ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ
Н. С. МОВСЕСОВА, А. М. ХРАМУШИНА

СПРАВОЧНИК
ПО НАЛАДКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
М. Г. ЗИМЕНКОВА, Г. В. РОЗЕНБЕРГА, Е. М. ФЕСЬКОВА

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
МОСКВА 1983

ББК 31.279
С74
УДК [621.31.002.5 : 658.26].001.41(035)

Рецензенты: А. Я. Дубинец, А. Б. Зеленов, Б. М. Дидух

Составители: *Г. З. Богорад, А. М. Вейнгер, Т. Г. Гильманов, В. А. Доманский, А. С. Дорофеюк, Г. Н. Дубинский, В. А. Игнатьев, В. А. Кривоносов, Н. И. Кутепов, Н. И. Литвинов, В. И. Лихошерст, Т. А. Орлова, Л. Ю. Персин, Ю. А. Порубанский, В. Б. Рабинович, Б. И. Решмин, Г. В. Розенберг, Г. А. Синельников, Ю. С. Тартаковский, С. В. Ушаков, В. И. Шухер, Д. С. Ямпольский*

Справочник по наладке электрооборудования
С74 промышленных предприятий/Под ред. М. Г. Зименкова, Г. В. Розенберга, Е. М. Феськова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 480 с. с ил. — (Электроустановки промышленных предприятий).

В пер.: 3 р. 60 к.

Помещены материалы, необходимые для пусконаладочных работ на смонтированных электроустановках промышленных предприятий. Приведены технические характеристики электрических аппаратов и оборудования. Третье издание переработано и дополнено по сравнению со вторым, вышедшим в 1976 г.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, монтажом, наладкой и обслуживанием электроустановок промышленных предприятий.

С $\frac{2302050000\text{-}088}{051(01)\text{-}83}$ 130-82

ББК 31.279
6П2.13

СПРАВОЧНИК
ПО НАЛАДКЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Редактор *И. С. Копытова*
Редактор издательства *Л. В. Копейкина*
Технический редактор *Л. Ф. Шкилевич*

ИБ № 2623

Сдано в набор 30.08 82. Подписано в печать 23.02.83. Т-06444. Формат 70×108$^1/_{16}$. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 42,0. Усл. кр.-отт. 42,0. Уч.-изд. л. 57,73. Тираж 70 000 экз. Заказ № 224. Цена 3 р. 60 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

© Издательство «Энергия», 1976
© Энергоатомиздат, 1983, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие народного хозяйства, требования научно-технической революции диктуют направления совершенствования промышленной электроэнергетики: создание экономичных надежных систем электроснабжения промышленных предприятий, автоматизированных систем управления электроприводами и технологическими процессами.

Все это ставит большие задачи перед работниками проектных, монтажных и пусконаладочных организаций, работающих в области электрификации промышленности.

Серия справочников «Электроустановки промышленных предприятий» позволит использовать практические рекомендации и указания, подготовленные большим коллективом специалистов электротехнических научно-исследовательских и проектных институтов, монтажных трестов и пусконаладочных управлений Главэлектромонтажа Министерства монтажных и специальных строительных работ СССР, обобщивших теоретические исследования, передовой опыт ведущих в области промышленной энергетики организаций, достижения отечественной и зарубежной науки и техники.

Третье переработанное и дополненное издание серии справочников «Электроустановки промышленных предприятий» включает: «Справочник по проектированию электроснабжения», «Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования», «Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами», «Справочник по монтажу электроустановок промышленных предприятий» в двух книгах и «Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий».

В третье издание справочника по наладке электрооборудования внесены значительные изменения и дополнения, вызванные совершенствованием технологии промышленного производства, предъявляющим повышенные требования к электрооборудованию, надежности электроснабжения и быстродействию управления технологическими процессами. За время, прошедшее после выпуска второго издания, появились более рациональные технические решения, новые типы электрооборудования и аппаратуры, значительно расширилась область применения бесконтактной техники на новой элементной базе. Произошел пересмотр ряда основных нормативных и руководящих документов (ПУЭ, СНиП, ГОСТ), стандартизированы многие термины, определения и условные обозначения.

В настоящем справочнике рассмотрены вопросы наладки электрооборудования промышленных предприятий: распределительных устройств и подстанций, релейной защиты, преобразовательных установок, автоматизированного электропривода, проверки и испытаний электрических машин, аппаратов и приборов. Даны рекомендации по методике и техническим средствам проведения наладочных работ, а также краткие сведения по организации наладки на пусковых промышленных объектах.

В справочнике обновлены рекомендации по всем видам наладочных работ с учетом внедрения новых типов электрооборудования, аппаратуры и схем управления.

Существенно переработан и дополнен материал справочника по системам автоматического регулирования электроприводов постоянного и переменного тока. Предложена усовершенствованная методика наладки регулируемых электроприводов постоянного тока с привлечением новых технических средств определения динамических параметров. Отражены особенности наладки комплектного электропривода постоянного тока. Значительно расширен материал в связи с внедрением новых видов электрооборудования для частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. Впервые даются методические и практические рекомендации по наладке нового класса электроприводов с регулированием частоты вращения с синхронными электродвигателями.

В справочнике даются сведения и практические рекомендации по контрольно-испытательному оборудованию УБСР-ДИ, УБСР-АИ и др. Более подробно рассмотрены вопросы борьбы с помехами в системах управления и автоматики.

В соответствии с введенными стандартами обновлена терминология, использованы новые графические и позиционные обозначения в электрических схемах.

Ввиду ограниченного объема справочника по возможности исключены сведения, относящиеся к вопросам, не получившим со времени второго издания дальнейшего развития, а также данные электрооборудования, снятого с производства (ртутно-преобразовательные установки, некоторые типы масляных и воздушных выключателей, электрооборудование на напряжение 3 и 15 кВ и др.).

Издательство и составители Справочника обращаются с просьбой к читателям присылать свои замечания и предложения по содержанию книги по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

СООТНОШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С ЕДИНИЦЕЙ СИСТЕМЫ СИ

Физическая величина	Единица	Соотношение с единицей СИ
Электрическая энергия	Вт·ч	3600 Дж
	кВт·ч	3,6 Дж
Удельное электрическое сопротивление	$\frac{\text{Ом·мм}^2}{\text{м}}$	10^{-6} Ом·м
Плотность электрического тока	А/мм^2	10^6 А/м^2
Мощность	л. с.	735,499 Вт
Магнитный поток	Мкс	10^{-8} Вб
Магнитная индукция	Гс	10^{-4} Тл
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	Гб	$(10/4\,\pi)$ А = 0,795775 А
Частота вращения	об/с	с$^{-1}$
	об/мин	$1/60$ с$^{-1}$ = 0,016(6) с$^{-1}$
Сила, вес (сила тяжести)[1]	кгс	9,80665 Н
Давление	кгс/см^2	98066,5 Па
	мм вод. ст.	9,80665 Па
	мм рт. ст.	133,322 Па
Напряжение (механическое)	кгс/мм^2	$9{,}80665 \cdot 10^6$ Па
Плоский угол	...°	$(\pi/180)$ рад
	...′	$(\pi/10\,800)$ рад
	...″	$(\pi/648\,000)$ рад
	град (гон)[2]	$(\pi/200)$ рад
Количество теплоты	кал	4,1868 Дж
Температура[3]	°С	См. сноску 3 к таблице

[1] На уровне моря и широте 45° (g=9,81 м/с^2) численное значение массы тела, выраженной в единицах системы СИ (кг), равно численному значению веса этого тела в единицах системы МКГСС (кгс). Это следует иметь в виду при пересчете грузоподъемности механизмов, а также при практических расчетах электропривода, при переводе численных значений махового момента вращающегося тела, взятого в единицах технической системы (кгс·м^2), в численные значения в единицах системы СИ (кг·м^2). В этом случае

$$GD^2 = mD^2 = 4J,$$

где G — вес тела, кгс; m — масса тела, кг; D и r — соответственно диаметр и радиус инерции, м; GD^2 — маховой момент, кгс·м^2; $J = mr^2$ — момент инерции, кг·м^2.

[2] Допускается применять в геодезии.

[3] По размеру градус Цельсия равен кельвину. Соотношение температуры Цельсия (t) с температурой Кельвина (T): $t = T - T_0$, где T_0 = 273,15 К. Интервал или разность температур Кельвина выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОБЩИЕ СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ
А. ОБЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1-1. ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

Таблица 1-1

Буквенные обозначения некоторых основных величин (по ГОСТ 1494-77)

Наименование величины	Обозначение	
	главное	запасное
Емкость электрическая	C	—
Заряд электрический	Q	—
Индуктивность взаимная	M	L_{mn}
Индуктивность собственная	L	—
Индукция магнитная	B	—
Коэффициент мощности при синусоидальных напряжении и токе	$\cos\varphi$	—
Коэффициент температурный электрической или магнитной величины	α	—
Коэффициент трансформации	n	—
Коэффициент трансформации трансформатора напряжения	K	K_U
Коэффициент трансформации трансформатора тока	K	K_I
Мощность активная	P	—
Мощность полная	S	P_S
Мощность реактивная	Q	P_Q
Мощность удельная	p	—
Намагниченность	M	—
Напряжение электрическое	U	—
Напряженность магнитного поля	H	—
Напряженность электрического поля	E	—
Отношение чисел витков	n	q
Период колебаний электрической или магнитной величины	T	—

Продолжение табл. 1-1

Наименование величины	Обозначение	
	главное	запасное
Постоянная времени электрической цепи	τ	T
Постоянная электрическая	ε_0	—
Потенциал электрический	V	φ
Поток магнитный	Φ	—
Разность электрических потенциалов	U	—
Сдвиг фаз между напряжением и током	φ	—
Сила электродвижущая	E	—
Скольжение	s	—
Сопротивление электрическое, сопротивление электрическое постоянному току	R	r
Сопротивление электрическое активное	R	r
Сопротивление электрическое полное	Z	—
Сопротивление электрическое реактивное	X	x
Сопротивление электрическое удельное	ρ	—
Ток	I	—
Угол потерь	δ	—
Функция передаточная	H	T
Частота колебаний электрической или магнитной величины	f	ν
Частота колебаний угловая электрической или магнитной величины	ω	Ω
Число витков	N	w
Число пар полюсов	p	—
Энергия электромагнитная	W	—

Таблица 1-2

Важнейшие единицы физических величин международной системы СИ (по стандарту СЭВ СТ СЭВ 1052-78)

Наименование величины	Единица	Обозначение	
		русское	международное
Основные единицы			
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Сила света	кандела	кд	cd
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Производные единицы пространства и времени			
Площадь	квадратный метр	$м^2$	m^2
Объем, вместимость	кубический метр	$м^3$	m^3
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$	m/s^2
Частота	герц	Гц	Hz
Частота вращения	секунда в минус первой степени	$с^{-1}$	s^{-1}
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	rad/s
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$рад/с^2$	rad/s^2
Производные единицы механических величин			
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	kg/m^3
Удельный объем	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$	m^3/kg
Момент инерции (динамический момент инерции)	килограмм-метр в квадрате	$кг \cdot м^2$	$kg \cdot m^2$
Сила, вес	ньютон	Н	N
Момент силы, момент пары сил	ньютон-метр	Н·м	N·m
Импульс силы	ньютон-секунда	Н·с	N·s
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	паскаль	Па	Pa
Работа, энергия	джоуль	Дж	J
Мощность	ватт	Вт	W
Производные единицы электрических и магнитных величин			
Количество электричества (электрический заряд)	кулон	Кл	C
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	В	V
Электрическая емкость	фарада	Ф	F
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	Ом·м	Ω·m
Электрическая проводимость	сименс	См	S
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	См/м	S/m
Магнитный поток	вебер	Вб	Wb
Магнитная индукция	тесла	Тл	T
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер	А	A
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	Гн	H
Абсолютная магнитная проницаемость, магнитная постоянная	генри на метр	Гн/м	H/m
Магнитное сопротивление	ампер на вебер	А/Вб	A/Wb
Магнитная проводимость	вебер на ампер	Вб/А	Wb/A
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	A/m

Продолжение табл. 1-2

Наименование величины	Единица	Обозначение	
		русское	международное
Мощность электрической цепи:			
активная	ватт	Вт	W
реактивная	вар	вар	var
полная	вольт-ампер	В·А	V·A
Производные единицы тепловых величин			
Количество теплоты	джоуль	Дж	J
Удельное количество теплоты	джоуль на килограмм	Дж/кг	J/kg
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)
Тепловой поток	ватт	Вт	W
Коэффициент теплообмена (теплоотдачи)	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м²·К)	W/(m²/K)
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)	W/(m·K)
Температурный коэффициент	кельвин в минус первой степени	$К^{-1}$	K^{-1}
Производные единицы световых величин			
Световой поток	люмен	лм	lm
Световая энергия	люмен-секунда	лм·с	lm·s
Освещенность	люкс	лк	lx
Светимость	люмен на квадратный метр	лм/м²	lm/m²
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м²	cd/m²

Таблица 1-3

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и наименований

Множитель	Приставка	Обозначения		Множитель	Приставка	Обозначения	
		русские	международные			русские	международные
10^{12}	тера	Т	T	10^{-1}	деци	д	d
10^{9}	гига	Г	G	10^{-2}	санти	с	c
10^{6}	мега	М	M	10^{-3}	милли	м	m
10^{3}	кило	к	k	10^{-6}	микро	мк	μ
10^{2}	гекто	г	h	10^{-9}	нано	н	n
10^{1}	дека	да	da	10^{-12}	пико	п	p

Таблица 1-4

Некоторые расчетные формулы

Формулы	Обозначение и единицы измерения
1. Сопротивление проводника постоянному току, Ом $R_0 = \rho \frac{l}{s}$	ρ — удельное сопротивление, 10^{-6} Ом·м; l — длина, м; s — сечение, мм²
2. Зависимость активного сопротивления проводника от температуры $R = R_1 [1 + \alpha (t - t_1)]$	R, R_1 — сопротивления проводника соответственно при температурах t и t_1 °С, Ом; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/°С

Продолжение табл. 1-4

Формулы	Обозначение и единицы измерения
3. Сопротивление цепи из двух параллельных резисторов $$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$	R, R_1 — сопротивления проводника соответственно при температурах t и t_1 °С, Ом; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/°С
4. Сопротивление цепи из n параллельных резисторов $$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$	
5. Реактивное (индуктивное) сопротивление, Ом $$X_L = \omega L = 2\pi f L$$	ω — угловая частота, рад/с; f — частота колебаний, Гц; L — индуктивность, Гн C — емкость, Ф
6. Реактивное (емкостное) сопротивление, Ом $$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$	
7. Реактивное сопротивление $$X = X_L - X_C$$	
8. Полное сопротивление, Ом $$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$	
9. Общая емкость при последовательном соединении конденсаторов $$C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n};$$ при параллельном соединении конденсаторов $$C = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n$$	
10. Закон Ома; цепь переменного тока $$I = \frac{U}{Z}$$	I — ток, А; U — напряжение, В; Z — полное сопротивление, Ом
11. Закон Кирхгофа для узла (1-й закон) $$\sum_{i=1}^{i=n} I_i = 0;$$ для замкнутого контура (2-й закон) $$E = \Sigma U = \Sigma IZ$$ Распределение тока в двух параллельных ветвях цепи переменного тока $$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$	I_i — токи в отдельных ветвях цепи, сходящихся в одной точке, A ($i = 1, 2, 3, \ldots, n$); E — э. д. с., действующая в контуре, В; U — напряжение на участке контура, В; Z — полное сопротивление участка, Ом; I_1 — ток первой ветви; I_2 — ток второй ветви; Z_1 — сопротивление первой ветви; Z_2 — сопротивление второй ветви
12. Закон электромагнитной индукции для синусоидального тока $$E = 4{,}44 f w B s \cdot 10^{-4}$$	E — наведенная э. д. с., В; f — частота, Гц; w — число витков обмотки; B — индукция магнитная, Тл; s — сечение магнитопровода, см^2

Продолжение табл. 1-4

Формулы	Обозначение и единицы измерения
13. Электродинамический эффект тока для двух параллельно расположенных проводников $F = 2I_{m1} I_{m2} \frac{l}{a} 10^{-7}$	F — сила, действующая на проводник, Н; I_{m1}, I_{m2} — амплитудные значения токов в параллельных проводниках, А; l — длина проводника, см; a — расстояние между проводниками, см
14. Тепловой эффект $Q = 0{,}24I^2Rt = 0{,}24UIt$	Q — количество выделяемого тепла, кал; t — время протекания тока, с; R — сопротивление, Ом
15. Зависимости для цепи переменного тока: ток в цепи $I = \sqrt{I_R^2 + I_X^2}$ $I_R = I\cos\varphi; \quad I_X = I\sin\varphi;$ напряжение в цепи $U = \sqrt{U_R^2 + U_X^2};$ $U_R = U\cos\varphi; \quad U_X = U\sin\varphi$	I — ток в цепи, А; I_R — активная составляющая тока, А; I_X — реактивная составляющая тока, А; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности; U — напряжение в цепи, В; U_R — активная составляющая напряжения, В; U_X — реактивная составляющая напряжения, В
16. Соотношение токов и напряжений в трехфазной системе: а) схема звезда $I_л = I_ф; \quad U_л = 1{,}73U_ф;$ б) схема треугольник $I_л = 1{,}73I_ф; \quad U_л = U_ф$	$I_л$ — ток линейный, А; $I_ф$ — ток фазный, А; $U_л$ — напряжение линейное, В; $U_ф$ — напряжение фазное, В
17. Коэффициент мощности $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_R}{U} = \frac{I_R}{I} = \frac{P}{S}$	P — активная мощность, Вт; S — полная мощность, В·А; R — активное сопротивление, Ом; Z — полное сопротивление, Ом
18. Мощность и энергия тока в цепи переменного тока: а) цепь однофазного тока $P = IU\cos\varphi; \quad Q = IU\sin\varphi;$ $S = IU = \sqrt{P^2 + Q^2};$ $W_R = IU\cos\varphi t; \quad W_X = IU\sin\varphi t$ б) цепь трехфазного тока $P = \sqrt{3}IU\cos\varphi; \quad Q = \sqrt{3}IU\sin\varphi;$ $W_R = \sqrt{3}IU\cos\varphi t; \quad W_X = \sqrt{3}IU\sin\varphi t$	Q — реактивная мощность, вар; W_R — активная энергия, Вт·ч; W_X — реактивная энергия, вар·ч; t — время протекания тока, ч
19. Реактивная мощность конденсатора, вар, $Q_C = U^2\omega C = U^2 \cdot 2\pi fC,$ где емкость конденсатора, Ф, $C = \frac{I_C}{2\pi fU} 10^6$	I_C — ток, протекающий через конденсатор, А; U — напряжение, приложенное к конденсатору, В
20. Синхронная частота вращения электрической машины, об/мин, $n = \frac{60f}{p}$	f — частота питающей сети, Гц; p — число пар полюсов машины
21. Вращающий момент электрической машины, Н·м, $M = 9{,}555\frac{P}{n}$	P — мощность, Вт; n — частота вращения, об/мин

Таблица 1-5

Зависимость тока от мощности источника трехфазного переменного тока

$$I = \frac{1000\,S}{1{,}73\,U}$$

Мощность S, кВ·А	Ток I, А, при напряжении U, В							Мощность S, кВ·А	Ток I, А, при напряжении U, В						
	127	220	380	660	3000	6000	10 000		127	220	380	660	3000	6000	10 000
1	4,6	2,6	1,5	0,91	0,19	0,10	0,06	40	182	105	60,8	35,5	7,7	3,9	2,3
2	9,1	5,3	3,0	1,75	0,38	0,19	0,12	45	205	118	68,4	39,5	8,7	4,3	2,6
3	13,7	7,9	4,6	2,66	0,58	0,29	0,17	50	228	131	76,0	44,0	9,6	4,8	2,9
4	18,2	10,5	6,1	3,5	0,77	0,39	0,23	75	341	197	114	66,0	14,5	7,2	4,3
5	22,8	13,1	7,6	4,4	0,96	0,48	0,29	100	455	263	152	84,5	19,3	9,6	5,8
6	27,3	15,8	9,1	5,24	1,2	0,58	0,35	135	614	355	206	118	26,0	13,0	7,8
7	31,9	18,4	10,6	6,15	1,4	0,67	0,40	180	819	473	274	158	34,8	17,3	10,4
8	36,4	21,0	12,1	7,0	1,5	0,77	0,46	240	1092	630	365	217	46,4	23,1	13,9
9	41,0	23,6	13,6	7,9	1,7	0,87	0,52	320	1456	841	486	282	61,6	30,9	18,6
10	45,5	26,3	15,2	8,9	1,9	0,96	0,58	420	1912	1105	640	370	81,0	40,5	24,3
15	68,2	39,4	22,8	13,2	2,9	1,5	0,87	560	2548	1470	851	492	108	54,0	32,5
20	91,0	52,5	30,4	17,6	3,8	1,9	1,2	750	3412	1970	1133	660	145	72,3	43,5
25	114	65,7	38,0	22,0	4,8	2,4	1,5	1000	4550	2627	1521	880	193	96,5	57,8
30	137	78,8	45,5	26,4	5,8	2,9	1,7	1600	7300	4220	2450	1440	310	155	93,0
35	159	92,0	53,3	30,4	6,7	3,4	2,0	2500	11 400	6600	3810	2200	482	241	145

Таблица 1-6

Электрохимический эквивалент

Вещество	α, мг/(А·с)	Вещество	α, мг/(А·с)	Вещество	α, мг/(А·с)	Вещество	α, мг/(А·с)
Алюминий	0,093	Кислород	0,0829	Свинец	1,0718	Цинк	0,34
Водород	0,01044	Медь	0,33	Серебро	1,1183		
Железо	0,29	Никель	0,30	Платина	1,009		

1-2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 1-7

Характеристика проводниковых материалов

Материалы	Плотность, г/см³	Температура плавления, °С	Удельное сопротивление, 10^{-6} Ом·м	Температурный коэффициент		Электрический потенциал, В
				сопротивления, 10^{-4}/°С	линейного расширения, 10^{-6}/°С	
Алюминий	2,7	657	0,029	40	24	—1,43
Бронза	8,8	900	0,021—0,05	40	17	—
Вольфрам	18,7	3400	0,055	40	4,3	—0,58
Висмут	9,8	271	1,2	40	13	—
Графит	1,9—2,3	—	13,5	80	—	—
Кадмий	8,6	321	0,76	40	29	—0,4
Латунь	8,4—8,7	960	0,03—0,07	20	18	—
Медь	8,9	1083	0,018	41	17	+0,34
Магний	1,74	650	0,04	38	26	—2,35
Молибден	10,2	2570	0,05	49	4	—
Никель	8,8	1452	0,09	68	13	—0,22
Олово	7,3	232	0,12	44	23	—0,14
Платина	21,4	1770	0,09	31	9	+0,46
Ртуть	13,6	—38,7	0,95	90	90	+0,86
Свинец	11,3	327	0,217	40	29	—0,13
Серебро	10,5	960	0,016	36	19	+0,8
Сталь	7,85	1500	0,145—0,25	60	12	—0,43
Сурьма	6,67	630	0,41	37	—	+0,2
Цинк	7,1	419	0,06	39	30	—0,76
Чугун	7,2	1200	0,5	9	10	—0,4

Примечания: 1. Электрический потенциал (гальванический эффект) приведен относительно водородного электрода, потенциал которого равен нулю.

2. Значения температурных коэффициентов сопротивления и расширения зависят в большей степени от примесей в материале; приведенные данные являются ориентировочными.

Таблица 1-8

Характеристика сплавов высокого сопротивления

Материал	Плотность, г/см³	Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-6} Ом·м	Температурный коэффициент		Наибольшая рабочая температура, °С
				сопротивления, 10^{-5}/°С	линейного расширения, 10^{-5}/°С	
Константан	8,9	1270	0,4—0,5	3—5	1,3	400—700
Манганин	8,4	960	0,42—0,5	3—6	1,9	250—300
Нихром	8,2	1400	1,0—1,2	12—15	1,4—1,5	900—1150
Фехраль	7,3	1490	1,26—1,35	5—6	1,4—1,5	750—1000
Хромель	7,1	1500	1,45	4—5	1,4—1,5	1000—1200

Таблица 1-9

Характеристики электроизоляционных материалов

Материал	Плотность, г/см³	Электрическая прочность при 20 °С, кВ/мм	Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц и 20 °С	Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·см	tg δ при 50 Гц и 20 °С
Асбоцемент (пропитан парафином)	1,6—1,8	2—3	6—8	10^8—10^9	—
Битумы	1	15—20	2—4	10^{13}—10^{15}	0,03—0,05
Бумага	0,7—0,87	5—10	2,5—3,5	10^{12}—10^{14}	0,017—0,025
Винипласт (изоляционный пластикат)	1,38	30—45	4,1	10^{14}—10^{15}	0,019
Воздух	0,00121	21,9—22,7 кВ/см	1,0	10^{19}—10^{20}	$(2 \div 4)10^{-7}$
Гетинакс	1,3—1,4	16—28	6—8	10^6—10^9	0,02—0,18
Древесина	0,6—0,78	2,2—5,6	Около 3,5	$2 \cdot 10^8 \div 4 \cdot 10^{11}$	—
Лавсан (полиэтилентерефталат)	1,38	160	3,1	10^{16}	0,008
Лакоткань:					
хлопчатобумажная	1—1,2	20—48	3—4	10^{12}—10^{14}	0,06—0,105
шелковая	0,9—1	33—75	3—4	10^{12}—10^{14}	0,03—0,08
стеклянная	1,25—1,35	20—65	3—4	10^{12}—10^{15}	0,02—0,06
Масло трансформаторное	0,84—0,89	15—20	2,1—2,4	10^{10}—10^{11}	0,0006—0,001
Миканиты прокладочные	2—2,2	15—24	5—8	10^{13}—10^{14}	0,03—0,05
Мрамор	2,5—2,9	1—4	2—9	10^7—10^9	0,05—0,01
Оргстекло (полиметилметакрилат)	1,18—1,2	27	3,8	10^{15}	0,02—0,03
Парафин	0,85—0,9	22—32	2—2,2	10^{16}—10^{18}	0,0003—0,0007
Полистирол (ПСМД)	1,05—1,08	20—30	2,5—2,8	10^{17}	0,0001—0,0006
Поливинилхлорид	1,2—1,6	6—15	6—8	10^{12}—10^{15}	0,05—0,08
Поликапролактам (капрон)	1,13—1,15	15—18	3,6—5	10^8—10^9	0,012—0,027
Полиэтилен (высокого давления)	0,90—0,94	40—45	2,2—2,4	10^{17}—10^{18}	0,0002—0,0006
Резина	1,7—2	20—45	2,5—5	10^{14}—10^{15}	0,01—0,03
Слюда	2,68—2,89	95—175	5,8—7,2	10^{13}—10^{15}	0,0004—0,015
Совол	1,54—1,56	17—18	4,8—5	10^{10}—10^{11}	0,015—0,03
Совтол	1,52—1,54	18—20	4,5—4,8	10^9—10^{10}	0,001—0,003
Стеатит	2,8—3,1	38—50	6,4—7	10^{15}—10^{16}	0,0005—0,0016
Стекло	2,5—2,7	30—45	3,8—16,2	10^8—10^{17}	0,0002—0,01
Текстолит (марки Г)	1,3—1,45	3—6	5—6	10^6—10^7	—
Фарфор	2,3—2,5	22—28	6—7	10^{13}—10^{14}	0,022—0,04
Фибра	1—1,2	3,5—7	—	10^8—10^{10}	—
Фторопласт	1,38—1,4	25	5,4	10^{15}	0,009
Шифер	2,7—2,9	0,5—1,5	6—8	10^8—10^9	0,08—0,12
Эбонит	1,15—1,25	15—20	3—3,5	10^{14}—10^{16}	0,005—0,015
Электрокартон	0,9—1,25	12—32	1,8—2,5	10^9—10^{10}	0,003—0,01

Таблица 1-10

Основные характеристики некоторых марок листовой электротехнической стали, предназначенной для магнитных цепей электрических машин, трансформаторов и приборов (по ГОСТ 21427.0-75—21427.3-75)

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более, при 50 Гц и магнитной индукции, Тл			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее				
		1,0	1,5	1,7	1000	2500	5000	10 000	30 000
1211(Э11)	1,0	5,8	13,4	—	—	1,53	1,63	1,76	2,00
1211(Э11)	0,5	3,3	7,7	—	—	1,53	1,64	1,76	2,00
1212(Э12)	1,0	5,4	12,5	—	—	1,53	1,62	1,76	2,00
1212(Э12)	0,5	3,1	7,2	—	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1213(Э13)	0,5	2,8	6,5	—	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1311(Э21)	0,5	2,5	6,1	—	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1312(Э22)	0,5	2,2	5,3	—	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1411(Э31)	0,5	2,0	4,4	—	—	1,46	1,57	1,72	1,94
1412(Э32)	0,5	1,8	3,9	—	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1511(Э41)	0,5	1,55	3,5	—	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1512(Э42)	0,5	1,40	3,1	—	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89
1513(Э43)	0,5	1,25	2,9	—	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
2211(Э1300)	0,5	2,6	5,8	—	1,40	1,56	1,65	1,76	2,00
2411(Э3100)	0,5	1,6	3,6	—	1,37	1,49	1,60	1,73	1,96
					при А/м, не менее				
					100	250	2500		
3411(Э310)	0,5	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75		
3412(Э320)	0,5	0,95	2,10	2,80	—	—	1,85		
3413(Э330)	0,5	0,80	1,75	2,50	—	—	1,85		
3414(Э330А)	0,5	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88		

Примечание: В скобках указаны старые обозначения марок стали. В обозначениях марки стали цифры означают: первая — класс по структурному состоянию и прокатке (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой); вторая — содержание кремния (2 — от 0,8 до 1,8 %; 3 — от 1,8 до 2,8 %; 4 — от 2,8 до 3,8 %; 5 — от 3,8 до 4,8 %); третья — группу по основной нормируемой характеристике: удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц.

Таблица 1-11

Свойства электротехнической стали в зависимости от содержания кремния (по ГОСТ 21427.0-75—21427.3-75)

Содержание кремния, %	Плотность стали, кг/м³	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-6} Ом·м	Число перегибов для листов толщиной 0,5 мм	Содержание кремния, %	Плотность стали, кг/м³	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-6} Ом·м	Число перегибов для листов толщиной 0,5 мм
0,8—1,8	7750—7800	0,25	10(2)	2,8—3,8	7650	0,50	5(1)
1,8—2,8	7750—7700	0,40	7(2)	3,8—4,8	7550	0,60	1(0,5)

Примечание. В скобках дано минимальное количество перегибов для каждого образца.

Таблица 1-12

Отношение удельных электрических сопротивлений металлов (сопротивление меди принято за единицу)

Металл или сплав	Отношение	Металл или сплав	Отношение	Металл или сплав	Отношение	Металл или сплав	Отношение
Серебро	0,9	Цинк	3,7	Олово	8,5	Реотан	28
Медь	1,0	Латунь	4,5	Сталь	12	Константан	29
Хром	1,6	Платина	5,5	Свинец	13	Чугун	30
Алюминий	1,61	Кобальт	6,0	Нейзильбер	17	Ртуть	60
Магний	2,8	Никель	6,5	Никелин	25	Нихром	60
Молибден	2,9	Железо	7,7	Манганин	26	Уголь	15 000
Вольфрам	3,6						

Таблица 1-13

Сопротивление медных проводников при различных температурах нагрева (сопротивление при 15 °С принято за единицу)

Температура, °С, десятки	Температура, °С, единицы									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,940	0,944	0,948	0,952	0,956	0,960	0,964	0,968	0,972	0,976
10	0,980	0,984	0,988	0,992	0,996	1,000	1,004	1,008	1,012	1,016
20	1,020	1,024	1,028	1,032	1,036	1,040	1,044	1,048	1,052	1,056
30	1,060	1,064	1,068	1,072	1,076	1,080	1,084	1,088	1,092	1,096
40	1,100	1,104	1,108	1,112	1,116	1,120	1,124	1,128	1,132	1,136
50	1,140	1,144	1,148	1,152	1,156	1,160	1,164	1,168	1,172	1,176
60	1,180	1,184	1,184	1,192	1,196	1,200	1,204	1,208	1,212	1,216
70	1,220	1,224	1,228	1,232	1,236	1,240	1,244	1,248	1,252	1,256
80	1,260	1,264	1,268	1,272	1,276	1,280	1,284	1,288	1,292	1,296
90	1,300	1,304	1,308	1,312	1,316	1,320	1,324	1,328	1,332	1,336
100	1,340	1,344	1,352	1,352	1,356	1,360	1,364	1,368	1,372	1,376

Таблица 1-14

Приближенные значения токов плавления проволоки из разных металлов

Ток плавления, А	Диаметр, мм					
	Медь	Алюминий	Никелин	Сталь	Олово	Свинец
1	0,039	0,066	0,065	0,132	0,183	0,210
2	0,069	0,104	0,125	0,189	0,285	0,325
3	0,107	0,137	0,185	0,245	0,380	0,425
5	0,180	0,193	0,25	0,345	0,53	0,60
7	0,203	0,250	0,32	0,45	0,66	0,78
10	0,25	0,305	0,39	0,55	0,85	0,95
15	0,32	0,400	0,52	0,72	1,02	1,05
20	0,39	0,485	0,62	0,87	1,35	1,52
25	0,46	0,560	0,73	1,00	1,56	1,75
30	0,52	0,640	0,81	1,15	1,77	1,98
35	0,58	0,70	0,91	1,26	1,95	2,20
40	0,63	0,77	0,99	1,38	2,14	2,44
45	0,68	0,83	1,08	1,50	2,30	2,65
50	0,73	0,89	1,15	1,60	2,45	2,78
60	0,82	1,00	1,30	1,80	2,80	3,15
70	0,91	1,10	1,43	2,00	3,10	3,5
80	1,0	1,22	1,57	2,20	3,40	3,8
90	1,08	1,32	1,69	2,38	3,65	4,1
100	1,15	1,42	1,82	2,55	3,90	4,4
120	1,31	1,60	2,05	2,85	4,45	5,0
160	1,59	1,94	2,28	3,20	4,9	5,5
180	1,72	2,10	2,69	3,70	5,8	6,5
200	1,84	2,25	2,89	4,05	6,2	7,0
225	1,99	2,45	3,15	4,4	6,75	7,6
250	2,14	2,60	3,35	4,7	7,25	8,1
275	2,2	2,80	3,55	5,0	7,7	8,7
300	2,4	2,95	3,78	5,3	8,2	9,2

Примечание. Длина проволоки 5—10 см.

1-3. ДОПУСТИМЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

Таблица 1-15

Допустимые температуры нагрева частей аппаратов напряжением выше 1000 В (ГОСТ 8024-69)

Наименование частей аппаратов	Наибольшая температура нагрева, °С		Превышение температуры нагрева над температурой окружающего воздуха+35°С	
	в воздухе	в масле	в воздухе	в масле
Токоведущие (за исключением контактных соединений) и нетоковедущие металлические части, не изолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами	120	—	85	—
То же, но соприкасающиеся с трансформаторным маслом	—	90	—	55
Токоведущие и нетоковедущие металлические части, изолированные или соприкасающиеся с изоляционными материалами, а также детали из изоляционных материалов. При изоляционных материалах классов нагревостойкости (по ГОСТ 8865-70):				
У	80	—	45	—
А	95	90	60	55
Е	105	90	70	55
В, F, Н и С	120	90	85	55

Продолжение табл. 1-15

Наименование частей аппаратов	Наибольшая температура нагрева, °С		Превышение температуры нагрева над температурой окружающего воздуха +35°С	
	в воздухе	в масле	в воздухе	в масле
Масло трансформаторное в верхнем слое:				
при использовании в качестве дугогасящей среды	—	80		45
при использовании в качестве только изолирующей среды	—	90		55
Контактные соединения из меди, алюминия или их сплавов с нажатием, осуществляемым болтами, винтами, заклепками и другими способами, обеспечивающими жесткость соединения	80	80	45	45
То же, но:				
с покрытием оловом	90	90	55	55
с гальваническим покрытием серебром	105	90	70	55
с уплотненным гальваническим покрытием серебром толщиной не менее 50 мк, а также с накладными пластинами из серебра	120	90	85	55
Контактные соединения из меди или ее сплавов без покрытия с нажатием, осуществляемым пружинами	75	75	40	40
То же, но:				
с гальваническим покрытием серебром	105	90	70	55
с накладными пластинами из серебра или композиций СОК-15, СОМ-10	120	90	85	55
Выводы аппаратов, предназначенные для соединений с подводящими проводами, с нажатием, осуществляемым болтами, винтами или другими способами, обеспечивающими жесткость соединения:				
без покрытия	80	—	45	—
с покрытием оловом	90	—	55	—
с гальваническим покрытием серебром	105	—	70	—
с уплотненным гальваническим покрытием серебром толщиной не менее 50 мк	120	—	85	—
с накладными пластинами из серебра	120	—	85	—
Металлические части, используемые как пружины:				
из меди	75	75	40	40
из фосфорной бронзы и аналогичных ей сплавов	105	90	70	55
из стали	120	90	85	55

Таблица 1-16

Допустимые превышения температуры в установках до 1000 В (по ГОСТ 10434-76)

Вид соединения	°С
Контактные соединения разборные и неразборные:	
а) шины, провода или кабели из меди, алюминия и его сплавов без защитных покрытий контактных поверхностей	55
б) то же с защитными покрытиями неблагородными металлами	65
в) шины, провода или кабели из меди и ее сплавов без изоляции или с изоляцией классов B, F и H по ГОСТ 8865-70 с защитным покрытием серебром	95

Примечание. Эффективное (расчетное) значение температуры воздуха принимается равным 40 °С.

Таблица 1-17

Классификация электроизоляционных материалов по нагревостойкости (по ГОСТ 8865-70)

Обозначение класса нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс, °С	Краткая характеристика основных электроизоляционных материалов
У	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал

Продолжение табл. 1-17

Обозначение класса нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс, °С	Краткая характеристика основных электроизоляционных материалов
A	105	Те же материалы в рабочем состоянии, пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал
E	120	Синтетические органические материалы (пленки, волокна, смолы, компаунды)
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбесты и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
F	155	Те же материалы, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, соответствующими данному классу нагревостойкости
H	180	Те же материалы, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
C	Свыше 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц или их комбинации, применяемые без связующих или с неорганическими или элементорганическими составами

Таблица 1-18

Допустимые превышения температуры частей аппаратов на напряжение до 1000 В при температуре окружающего воздуха 40 °С и продолжительном режиме работы (по ГОСТ 403-73)

Части аппаратов	В воздухе, °С	В трансформаторном масле, °С
Коммутирующие контакты главной цепи:		
а) из меди без покрытий	45	40
б) гальванически покрытые серебром	200	50
Коммутирующие контакты вспомогательной цепи с накладками из серебра или металлокерамических композиций на базе серебра	80	50
Детали из металла, работающие как пружины:		
а) из меди	35	35
б) из фосфористой бронзы и аналогичных ей сплавов	65	50
Контактные соединения выводов аппаратов с внешними проводниками	По ГОСТ 10434-76	
Масло в верхнем слое	—	40

Б. АППАРАТЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

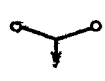
1-4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Таблица 1-19

Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы

Наименование	Условные обозначения
Род тока и количество измерительных механизмов	
Ток постоянный	
Ток переменный (однофазный)	
Ток постоянный и переменный	
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	
Ток трехфазный переменный при неравномерной нагрузке фаз (общее обозначение)	
Прибор с одним измерительным механизмом для трехпроводной сети	
Прибор с одним измерительным механизмом для четырехпроводной сети	
Прибор с двумя измерительными механизмами для трехпроводной сети при неравномерной нагрузке фаз	
Прибор с двумя измерительными механизмами для четырехпроводной сети при неравномерной нагрузке фаз	
Прибор с тремя измерительными механизмами для четырехпроводной сети при неравномерной нагрузке фаз	
Электробезопасность	
Напряжение испытательное 500 В	
Напряжение испытательное, превышающее 500 В (например, 2 кВ)	
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Прибор или вспомогательная часть под высоким напряжением	
Используемое положение	
Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Прибор применять при наклонном положении шкалы (например, под углом 60 °) относительно горизонтальной плоскости	
Общие условные обозначения	
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	

Продолжение табл. 1-19

Наименование	Условные обозначения
Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Логометр магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Прибор электромагнитный	
Прибор электромагнитный поляризованный	
Логометр электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Логометр электродинамический	
Логометр ферродинамический	
Прибор индукционный	
Логометр индукционный	
Прибор тепловой с нагреваемой нитью	
Прибор биметаллический	
Прибор электростатический	
Прибор вибрационный (язычковый)	
Термопреобразователь неизолированный	
Термопреобразователь изолированный	

Продолжение табл. 1-19

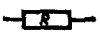
Наименование	Условные обозначения
Преобразователь электронный в измерительной цепи	
Преобразователь электронный во вспомогательной цепи	
Выпрямитель	
Шунт	
Сопротивление добавочное	
Сопротивление добавочное индуктивное	
Сопротивление добавочное полное	
Экран электростатический	
Экран магнитный	
Прибор астатический	*ast*
Зажим для заземления	
Корректор	
Ссылка на соответствующий документ	

Таблица 1-20

Достоинства, недостатки и область применения приборов

Приборы	Достоинства	Недостатки	Область применения
Магнитоэлектрические	Высокая чувствительность, большая точность. Относительно небольшое влияние внешних полей. Малое потребление энергии. Малое влияние температуры	Пригодны только для постоянного тока. Чувствительны к перегрузкам	Измерение силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. С термопреобразователями используются для измерения электрических величин в цепях переменного тока, а также для измерений неэлектрических величин (температуры, давлений и т. п.)

Продолжение табл. 1-20

Приборы	Достоинства	Недостатки	Область применения
Электромагнитные	Могут изготовляться на большой ток для непосредственного включения, устойчивы при перегрузках. Пригодность для постоянного и переменного тока, простота конструкции	Малая точность. Зависимость показания от внешних магнитных полей. Неравномерная шкала	Измерение силы тока и напряжения в цепях постоянного и переменного тока. Рекомендуется применять преимущественно для измерений в сетях переменного тока, так как недостаточно однородное качество железа сердечников понижает точность приборов, отградуированных для обоих родов тока
Электродинамические	Большая точность. Пригодны для постоянного и переменного тока	Зависимость показаний от внешних магнитных полей. Чувствительны к перегрузкам. Большое потребление электроэнергии. Неравномерность шкалы	Измерение тока, мощности, напряжения, частоты, угла сдвига фаз в цепях переменного тока, а также напряжения, тока и мощности в цепях постоянного тока
Термоэлектрические	Независимость показаний от частоты и формы кривой переменного тока и внешних магнитных полей. Пригодны для постоянного и переменного токов. Высокая чувствительность. Малое потребление электроэнергии	Чувствительны к перегрузкам. У приборов с фотокомпенсационным усилителем (например, у прибора Т-17 завода «Вибратор») чувствительность к перегрузкам значительно снижена	Измерение силы тока в цепях переменного тока промышленной и высокой частоты
Электростатические	Малое потребление электроэнергии. Независимость от частоты, температуры и внешних магнитных полей. Возможность непосредственного измерения высоких напряжений на низких и высоких частотах (до 40 МГц)	Зависимость от внешнего электрического поля и влажности воздуха	Измерение напряжения в цепях постоянного и переменного тока
Вибрационные	Простота конструкции и надежность в работе. Возможность включения прибора в цепи с разным напряжением	Вибрация пластин от внешних толчков. Прерывистость шкалы, вследствие чего затрудняется отсчет при промежуточной частоте	Измерение частоты переменного тока

Таблица 1-21

Классификация приборов по способу защиты от внешних электромагнитных полей

Наименование прибора	Исполнение защиты
Экранированный	*Магнитный или электростатический экран*
Астатический	Две части на оси измерительной системы, воздействие на которые магнитного поля вызывает моменты взаимно противоположных знаков
Неэкранированный	Защита отсутствует

1-5. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1-22

Приборы для измерения тока

Система	Тип	Класс точности	Пределы измерения	Примечания
		Амперметры		
Термоэлектрическая	Т18	1,5	0,1—2,5 А	С термопреобразователем Т109
			1—25 А	Т110
			10—50 А	Т111
	Т19	2,5	1—100 А	С трансформаторами тока И106, И107
	Т19/1	2,5	0,5—2,5 А	
Электромагнитная	Э514/1	0,5	1—2 А	—
	Э514/2	0,5	2,5—5А	—
	Э514/3	0,5	5—10 А	—
	Э316	1,0	1—2; 2,5—5; 5—20 А	—
Электродинамическая	Д5014	0,2	0,5—10 А	—
	Д5017	0,2	0,1—20 А	Восьмипредельный
		Милли-, микроамперметры		
Термоэлектрическая	Т15	1,0	20—300 мА	—
	Т15/1	1,0	1—50 мА	—
Магнитоэлектрическая	М2005	0,2	10—1000 мкА	—
Электродинамическая	Д5014	0,2	5—200 мА	—
Электромагнитная	Э514	0,5	10—1000 мА	—
	Э513/1	0,5	10—40 мА	—
	Э513/2	0,5	25—100 мА	—
	Э513/3	0,5	50—200 мА	—
	Э513/4	0,5	0,25—1 А	—
	Э316	1,0	10—20; 25—50; 50—100; 250—500 мА	—
Магнитоэлектрическая	М1690А	1,0	25—0—500 мкА	—
	М2027	0,5 и 1,0	50—500 мкА	—
	М2027	0,5 и 1,0	1—100 мА	—

Таблица 1-23

Приборы для измерения напряжения

Система	Тип	Класс точности	Пределы измерения	Примечания
		Вольтметры, милливольтметры		
Термоэлектрическая	Т16	1,0	0,2—3; 2—30; 3—50 В	—
Магнитоэлектрическая	М2004	0,2	0—1,5; 0—3; 0—7,5; 0—30; 0—75; 0—150; 0—300 В	—
	М2016	0,2	45—75 мВ; 3 В	—
Электродинамическая	Д5015	0,2	7,5—60 В; 75—600 В	—
Электростатическая	С502	0,5	30 В—3 кВ	9 модификаций
	С196	1,0	2—7,5; 4—15; 3—30 кВ	—
	С100	1,5	25—50—75 кВ	—
Электродинамическая	Д121	0,5	150—250 В	—
Магнитоэлектрическая	М250	0,5	3; 50; 200 или 400 В	—
Электромагнитная	Э515/1	0,5	1,5—15 В	—
	Э515/2	0,5	7,5—60 В	—
	Э515/3	0,5	75—600 В	—
	Э316	1,0	7,5—75; 150—600 В	—
Магнитоэлектрическая, выпрямительная	Ц4331	1,0	3; 6; 15; 30 В	Высокочастотный
Магнитоэлектрическая	М1202	1,0	0,3—750 мВ	—
Электронная	Ф584	0,5—1,0	0,2 мВ—300 В	—

Таблица 1-24

Приборы для измерения мощности

Тип	Класс точности	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Примечания
Д5004	0,5	30—600	0,01—10	Однофазный
Д5016	0,2	30—600	0,025—10	»
Д5020	0,5	30—600	0,25—10	Малокосинусный
Д5031/1	0,5	100; 250	1	Трехфазный
Д5031/2	0,5	100; 250	5	»
Д5031/3	0,5	375	1	»
Д5031/4	0,5	375	5	»
Д124	1,5	125—250—375	2,5—5	»
Д124/1	1,5	125—250—375	0,5	400—500 Гц

Таблица 1-25

Приборы комбинированные

Наименование	Тип	Класс точности	Пределы измерения	Примечания
Для измерения в цепях постоянного тока				
Милливольтмикроамперметр	М1200	0,5	0,003—750 В; 0,003—7,5 мА	—
Микроампервольтметр	М1201	0,5	0,3—750 мкА; 3—750 В	—
Милливольтмиллиамперметр	М2015	0,2	0,75—150 мА; 45 мВ	—
	М2017	0,2	3 мА; 45 мВ	—
	М2018	0,2	0,075 мА—30 А; 15 мВ—600 В	—
Ампервольтметр	М231	1,5	0,005—10А; 75 мВ—100 В	—
Ампервольтомметр	М351	1,0	75 мВ—1500 В; 15 мкА—3000 мА; 200 Ом—200 МОм	—
Для измерения в цепях переменного тока				
Вольтамперметр	Д128	1,0	30—150—300—450 В; 2,5—5—25—50 А	—
Вольтамперметр	Д128/1	1,5	150—300—450 В; 2,5—5—25—50 А	400 Гц
Вольтамперфазометр	ВАФ-85М	4,0	1—250 В; 10—250 мА; 1—10 А; 180°	—
Для измерения в цепях постоянного и переменного тока				
Ампервольтомметр	АВО-5М1	4	60 мкА—12 А; 3—6000 В пост. тока; 0,6 мА—12 А; 0,6—6000 В перем. тока; 3 Ом—3 МОм; —12÷+78 дБ	—
	Ц-20	4	0,3—750 мА; 3—600 В; 500 Ом—500 кОм	—
Ампервольтметр	Ц4311	0,5—1	300 мкА—7,5 А; 75 мВ—750 В пост. тока; 3 мА—7,5 А; 0,75—750 В перем. тока	—
Прибор комбинированный	Ц4312	1—1,5	300 мкА—6 А; 75 мВ—900 В; 0,2—3000 кОм	—
	Ц4313	1,5—2,5	60 мкА—1500 мА; 1,5—600 В; 0,5—5000 кОм	—

Продолжение табл. 1-25

Наименование	Тип	Класс точности	Пределы измерения	Примечания
Прибор комбинированный	Ц4314	2,5—4	0,012—1500 мА; 0,075—600 В; 1—10 000 Ом; 0,1 мкФ; —10÷ +12 дБ	—
	Ц4315	2,5—4	50 мкА—2,5 А; 75 мВ—1000 В; 300 Ом—5000 МОм; 30 000 пФ—0,5 мкФ	—
	Ц4317	1,5—2,5	0,1—1000 В; 0,05—5000 мА; 200 Ом—3 МОм; —14 ÷ +52 дБ	—
	Ц4323	5	0,05—500 мА; 0,5—1000 В; 0,5—500 кОм	—
	Ц4324	2,5—4	0,06—3000 мА; 0,6—1200 В; 0,5—5000 кОм; —10÷ +12 дБ	—
	Ц4340	1—2,5	$5 \cdot 10^{-2} \div 25 \cdot 10^{3}$ мА; 0,5—1000 В; 3—300 кОм	—
	Ц4341	2,5—4	60 мкА—600 мА; 0,3—900 В; 0,5—5000 кОм; параметры транзисторов	—
	Ц4360	2,5—4	0,05—2500 мА; 0,5—1000 В; 0,2—3000 кОм	—
	Ц4380	1,5—5	0,006—15 А; 0,075—600 В; 0,1—1000 кОм	—
	Ф4313	1,5—2,5	0,06—6000 мА; 0,06—1200 В; 0,3—5000 кОм; —20÷ +3 дБ	—
	Ф4318	1,5—2,5	0,001—30 000 мА; 0,001—1000 В; 0,5—5000 кОм; 0,5—500 мкФ; —70÷ +50 дБ	—

Таблица 1-26

Фазометры

Тип	Класс точности	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Номинальная частота, Гц
Д578/1	0,5	100; 127; 220	5; 10	50
Д578/2	0,5	100; 220; 380	5; 10	60
Д120	1,5	127; 220; 380	5	50
Э120	1,5	127; 220; 380	5	50
Э120/1	1,5	127; 220; 380	1	400—500
Д5000	0,2	100; 127; 220	5; 10	50

Таблица 1-27

Частотомеры

Тип	Класс точности	Номинальное напряжение, В	Пределы измерения, Гц	Потребляемая мощность, В·А	Примечания
Д577/1	0,5	100; 127; 220	45—55	8	Со световым указателем
Д577/3	0,5	100; 127; 220	450—550	8	То же
Д577/5	0,5	100; 127; 220	1350—1650	10	» »
Д126	1,5	127; 220; 380	45—55	6	—

Продолжение табл. 1-27

Тип	Класс точности	Номинальное напряжение, В	Пределы измерения, Гц	Потребляемая мощность, В·А	Примечания
Д126/1	1,5	127; 220; 380	450—550	6	—
Ф433/3	1,5—6	0,1—300	0,1—1000 кГц	—	—
Ф5043	0,5	1—50; 10—5000	110—1100—5500	13	—

Таблица 1-28

Омметры, мегаомметры, измерители заземления

Наименование	Тип	Пределы измерения	Основная погрешность или класс точности	Примечания
Омметр	М-218	0,1—1—10—100 Ом; 0,1—1—10—100 кОм; 0,1—1—10—100 МОм;	1,5—2,5 %	—
	М371	10—100 Ом; 100—1000—10 000 Ом; 0,1—10 МОм	1,5 %	—
	М372	0—50 Ом	1,5 %	—
	М57Д	0—1500 Ом	22 %	—
Микроомметр	М246	100—1000 мкОм; 10—100 мОм; 1—10 Ом	2; 3; 5 %	Питание от сети 110; 127; 220 В или от аккумуляторов 2 В
	Ф415	100 мкОм; 1—10—100 мОм; 1—10 Ом	1,5; 2,5; 4	Питание от сети 127 или 220 В или от аккумуляторов 6 В
Омметр	М4125	3; 30; 300 кОм	1,5	—
	М4125/1	3; 30; 300 кОм	1,5	Взрывобезопасный
	Ф410	0—10^7 Ом	1,5	Питание от сети 127/220 В
Мегаомметр	М4101/1	0—200 кОм; 0—100 МОм	1	100 В
	М4101/2	0—500 кОм; 0—250 МОм	1	250 В
	М4101/3	0—1000 кОм; 0—500 МОм	1	500 В
	М4101/4	0—1000 кОм; 0—1000 МОм	1	1000 В
	М4101/5	0—2000 кОм; 0—2500 МОм	1	2500 В
	М4121	0—1000 МОм	2,5	100, 250, 500, 1000 В
	М4122	0,5—20; 20—200; 100—2000; 1000—20 000 МОм	2,5; 4; 5; 10	2500 В
	Ф4100	100 000 МОм	2,5	Питание от сети 127/220 В, рабочее напряжение 2500 В
	Ф4101	20 000 МОм	2,5	Питание от сети 127/220 В или 12 В пост. тока. Рабочее напряжение 100; 500; 1000 В
	М1102/1	0—1000 кОм; 0—500 МОм	1	Применим в шахтах. Рабочее напряжение 500 В
	М4100/1—5	200—2000 кОм; 20—2000 МОм	1	Рабочее напряжение 2500 В
	М127	2 МОм	1,5	Для измерения цепей, находящихся под напряжением

Продолжение табл. 1-28

Наименование	Тип	Пределы измерения	Основная погрешность или класс точности	Примечания
Измеритель заземления	М416	0,1—10; 0,5—50; 2—200; 10—1000 Ом	5	Питание от аккумуляторов или сухих элементов
Измеритель заземления искробезопасный	М416/1	0,1—10; 0,5—50; 2—200; 10—1000 Ом	5	То же
Омметр — измеритель цепей заземления	М372	50 Ом	1,5	Контроль наличия напряжения 380 В

Прибор типа М417 предназначен для контроля сопротивления петли фаза — нуль без отключения питающего источника тока в электроустановках напряжением 380 В, частотой 50 Гц, с глухозаземленной нейтралью питающего трансформатора. Прибор обеспечивает автоматическое отключение измерительной цепи от контролируемой сети в течение не более 0,3 с, а также сигнализацию при появлении на объекте напряжения, превышающего 36 В (сопротивление петли фаза — нуль больше 2 Ом). В приборе предусмотрена сигнализация отсутствия обрыва заземляющей цепи.

Пределы измерения 0,1—2 Ом; потребляемая мощность прибора: при подготовительных операциях — не более 30 В·А, в момент измерения — не более 4,5 кВ·А.

МИКРОФАРАДМЕТРЫ

Микрофарадметр типа Д524М предназначен для измерения емкости конденсаторов с тангенсом угла диэлектрических потерь не более 0,003 и рабочим напряжением (действующее значение) не ниже 150 В переменного тока (прибор Д524М) и 250 В (прибор Д524М/1). Класс точности 1,0. Пределы измерения 1—2—5—10 мкФ. Номинальное напряжение сети: Д524М — 127 В; Д524М/1 — 220 В. Номинальная частота 50 Гц.

Микрофарадметр типа Д595 предназначен для измерения емкости конденсаторов с тангенсом угла диэлектрических потерь не более 0,02 и рабочим напряжением (действующее значение) не ниже 150 В переменного тока. Класс точности 1,0. Пределы измерения 0,1—0,2—0,5—1,0 мкФ. Номинальное напряжение 127 и 220 В. Номинальная частота 50 Гц.

Таблица 1-29

Мосты постоянного и переменного тока

Наименование	Тип	Пределы измерения	Основная погрешность или класс точности	Примечание
Мост Витстона	ММВ	0,5—50 000 Ом	2; 5; 15	—
Мост постоянного тока	МО-61	10^{-4}—10^{8} Ом	0,05	—
	МО-62	0,0001—10^{6} Ом	0,1	—
Мост одинарно-двойной	МОД-61	10^{-8}—10^{8} Ом	0,05—1	—
Мост постоянного тока	Р316	10^{-5}—10^{10} Ом	0,2—5	—
Мост постоянного тока одинарно-двойной	Р329	10^{-8}—10^{6} Ом	0,05—1,5	—
Мост постоянного тока	Р333	1—10^{6} Ом	0,5—5	Схема моста: петля Муррея; петля Варлея
Мост переменного тока	Р571	10^{-6}—10^{3} Гн; 10^{-5}—10^{3} мкФ; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}001 \div 2$	0,1—0,5	—
	Р577	$0{,}1$—$1{,}1 \cdot 10^{7}$ Ом; 10^{-6}—$1{,}1 \cdot 10^{3}$ мкФ; 10^{-3}—$1{,}1 \cdot 10^{5}$ мГн; $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3} \div 1$	1—20	—
	Р5026	$10^{-5} \cdot 10^{8}$ пФ; $\operatorname{tg}\delta = 10^{-4} \div 1{,}0$	1—5	—

1-6. ПРИБОРЫ САМОПИШУЩИЕ И ЦИФРОВЫЕ

Таблица 1-30

Приборы самопишущие

Наименование	Тип	Класс точности	Пределы измерения	Скорость движения диаграммы	Ширина диаграммы, мм
Амперметр	Н339	1,5—2,5	0,005—5 А; 5—500 В	20—5400 мм/ч	100
Микроампермилливольтметр	Н399	1,5	10; 50; 250 мкА; 1—250 мВ; 1—100 В	20—5400 мм/ч	100
Ампервольтметр	Н-390	1,5—2,5	5 мА—5 А; 5—500 В	20—5400 мм/ч	100
Двухкоординатный прибор	Н-306	—	По оси X — 3 мВ — 300 В; по оси Y — 2 мВ — 200 В	75 см/с	200×300

Прибор самопишущий типа Н338 предназначен для регистрации в аналоговой форме быстропротекающих процессов, изменяющихся в диапазоне 0—150 Гц и преобразованных в соответствующее значение электрического напряжения. В приборах типа Н338 использован измерительный механизм электромагнитной поляризованной системы с подвижным сердечником. Принцип действия основан на взаимодействии потока подмагничивания и магнитного потока управления, создаваемого выходным током усилителя. Измерительный блок включает в себя измерительный механизм, пишущее устройство и усилитель. Для обеспечения жесткости система измерительного механизма залита эпоксидным компаундом и является неразборной. Пишущее устройство измерительного блока съемное. Усилитель построен по принципу модуляции входного сигнала с последующей демодуляцией и состоит из модулятора, усилителя переменного тока, демодулятора, генератора прямоугольных импульсов, усилителя постоянного тока и звена обратной связи. Каждый многоканальный прибор снабжен отметчиками, расположенными по краям диаграммной ленты. Левый отметчик выполнен в одном блоке со стабилизатором, расположенным слева, и является отметчиком нулевой линии. Одновременно он может использоваться как отметчик событий. Правый отметчик выполнен в одном блоке со стабилизатором, расположенным справа, и работает в двух режимах: как секундный отметчик и как отметчик событий. Питание усилителя мощности измерительных блоков и блоков стабилизаторов осуществляется нестабилизированным напряжением +24 и —24 В, питание реле отметчиков и редуктора — напряжением 48 В. Для получения нестабилизированного напряжения в модификациях Н338-1, Н338-2, Н338-4 имеется один блок питания, в модификациях Н338-6 и Н338-8 — два блока питания, каждый из которых питает половину измерительных блоков. Каждая модификация прибора имеет два исполнения: с чернильной записью в криволинейной системе координат, капилляр пишущего устройства находится в соприкосновении с движущейся диаграммной лентой и чертит на ней линию, отражающую значение измеряемой величины; с записью на теплочувствительной бумаге в прямоугольной системе координат (в этом случае к шифру прибора добавляется индекс Б, например Н338-1Б). Нагретый конец пишущего устройства перемещается по изгибу движущейся диаграммной ленты, оплавляет теплочувствительный слой и чертит на основе линию, отображающую значение измеряемой величины. Определение значения измеряемой величины производится с помощью шкальной линейки.

Постоянные регистрации каждого измерительного канала . . . . . 0,02; 0,04; 0,08; 0,2; 0,4; 0,8; 2,4 В/см

Входные сопротивления каждого измерительного канала . . . . 10; 20; 40; 100; 200; 400; 1000; 2000 кОм

Скорости движения диаграммы . . . . . 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 250 мм/с

Питание от сети переменного тока . . . . 220 В, 50 Гц

Ширина записи каждого измерительного канала . . . . . 40 мм

Число измерительных каналов:
- Н338-1 1
- Н338-2 2
- Н338-4 4
- Н338-6 6
- Н338-8 8

Общая ширина диаграммы:
- Н338-1 . . . . . 50 мм
- Н338-2 . . . . . 100 мм
- Н338-4 . . . . . 200 мм
- Н338-6 . . . . . 290 мм
- Н338-8 . . . . . 380 мм

Таблица 1-31

Приборы цифровые

Тип	Пределы измерения	Примечание
Милливольтметр В3-52/1	1 мВ—300 В	Высокочастотный
Вольтметр:		
В2-35	0,1—1000 В	Постоянный ток
Щ1312	0—500 В	Постоянный ток, малогабаритный
Щ1513	0—1000 В	Постоянный ток
Ф4203	0,1599—1600 В	То же
Универсальный		
В7-25	1 мкВ—100 В; 0,01 Ом—10 МОм; 0,01 нА — 10 мА; 10 Гц — 10 МГц	» »
Ф4851	100 мкВ—1000 В; 400 мкВ—300 В	Постоянный ток Переменный ток
Щ68001	1 мкВ—1000 В; 100 мкВ—1000 В	Постоянный ток Переменный ток
Вольтамперметр Щ68000	10 мВ—1000 В; 1 мкА—1000 мА	Постоянный ток
Универсальный прибор Ф4800	0,1 Ом—1 МОм; 1 нФ—100 мкФ; 1мГн—1 Гн; 0,1 мА—1 А; 1—1000 кГц	—
Омметр Щ34	$10—10^{12}$ Ом	—
Частотомер Ч3-49	0,01 Гц—12 МГц	—
Частотомер Ч3-47А	0—500 МГц; 0,1 мкс—10^4 с	—
Частотомер-тахометр Ч3-28	60 об/с—600 000 об/мин	С фотоэлектрическим преобразователем
Частотомер-хронометр Ф599	$0,1—1,5 \cdot 10^3$ Гц; $10 \cdot 10^{-6}—10^5$ с	—

1-7. ГАЛЬВАНОМЕТРЫ

Гальванометр переменного тока вибрационный М501 применяют в качестве нулевого указателя в измерительных системах переменного тока частотой от 30 до 100 Гц. Постоянная гальванометра при частоте 100 Гц: по току — не более $16 \cdot 10^{-8}$ А/мм; по напряжению — $2{,}2 \times 10^{-5}$ В/мм; шкала со световым указателем.

Гальванометр переменного тока Ф4311 применяют для измерения малых токов в цепях переменного тока. Цена деления $3 \times \times 10^{-9}$ А/дел. со ступенчатым изменением: ×1, ×3, ×10, ×30, ×100, ×300, ×1000. Допустимое отклонение цены деления от нормальной ±10 %. Входное сопротивление 3 Ом — 3 кОм; частотный диапазон 40 Гц — 20 кГц.

Таблица 1-32

Технические данные гальванометра М122

Постоянная гальванометра по току, А/дел.	Сопротивление, Ом	
	внутреннее	внешнее критическое
$1 \cdot 10^{-7}$	5000±2000	5000—15 000
$3 \cdot 10^{-7}$	1000±300	500—1500
$1 \cdot 10^{-6}$	100±15	50—150
$3 \cdot 10^{-6}$	10±3	5—15
$4 \cdot 10^{-7}$	200±50	650—2000

Таблица 1-33

Технические данные гальванометров М195

Параметры	М195/1	М195/2	М195/3
Внутреннее сопротивление гальванометра, Ом	53	115	1300
Внешнее критическое сопротивление, Ом	230	2300	11 500
Цена деления по току, 10^{-9} А	9,2	3,5	1,38
Длина шкалы, мм	140	140	140

Гальванометр постоянного тока М122 применяют для обнаружения малых значений тока и напряжения в цепях постоянного тока (табл. 1-32).

Гальванометр постоянного тока М195 (табл. 1-33) применяют для измерения в цепях постоянного тока (преимущественно при нулевых измерениях).

Гальванометр М2031 применяют для измерения силы постоянного тока. Цена деления по току $5 \cdot 10^{-8}—10^{-6}$ А/дел. Внутреннее сопротивление гальванометра 15—5500 Ом. Разряд гальванометра 0,5.

1-8. ТРАНСФОРМАТОРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, ШУНТЫ, РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Таблица 1-34

Трансформаторы тока

Тип	Класс точности	Номинальный ток, А		Частота, Гц	Номинальная нагрузка, Ом	Коэффициент мощности
		первичный	вторичный			
И55/1	0,1	0,5—50 (6 пределов)	0,5	40—60	30	1
И515М	0,1	0,5—50 (7 пределов)	5	50	0,4	0,8—1
УТТ6М2	0,2	100—2000 (14 пределов)	5	50	0,2	0,8—1
УТТ5М	0,2	15—600 (7 пределов)	5	50	0,2	0,8
И56М	0,1	1—1000	1 и 5	50	15 и 0,6	—
И509	0,2	5—1000	5	5—1000	—	—

Таблица 1-35

Автотрансформаторы регулировочные

Тип	Мощность при одночасовом режиме	Напряжение, В		Пределы регулирования напряжения, В	Число регулируемых цепей	Ток нагрузки, А (одночасовой режим)
		сети	на выходных зажимах			
ЛАТР-1М	—	220	—	0—220	—	9,0
				220—250	—	8,0
	—	127	—	0—140	—	8,0
				140—150	—	6,0
ЛАТР-2М	—	220	—	0—220	—	2,0
				220—250	—	2,0
	—	127	—	0—140	—	2,0
				140—150	—	1,2
РНО-250-0,5	0,5	220	0—250	—	1	2,0
	0,5	127	0—250	—	1	1,2
РНО-250-2	2,0	220	0—250	—	1	8,0
	2,0	127	0—250	—	1	4,0
РНО-250-5	5,0	220	0—250	—	2	20,0
	5,0	127	0—250	—	2	12,0
РНО-250-10	10,0	220	0—250	—	2	40,0
	10,0	127	0—250	—	2	24,0

Примечания: 1. При длительной работе автотрансформаторов и регулировочных трансформаторов (более 1 ч) ток нагрузки снижается на 20 %.
2. Ток холостого хода для ЛАТР-1М не должен превышать 1 А, для ЛАТР-2М — 0,5 А.

Таблица 1-36

Шунты

Тип	Класс точности	Номинальный ток, А	Номинальное падение напряжения, мВ
Р114/1	0,1	75	45
Р114/1	0,1	150	45
Р114/1	0,1	300	45
75РИ	0,2	0,3—0,75	75
75РИ	0,2	1,5—7,5	75
75РИ	0,2	15—30	75
75РИ	0,2	75	75
75РИ	0,2	150	75
75ШС-0,2*	0,2	300—4000 (7 пределов)	75
75ШС*	0,5	5—50 (5 пределов)	75
75ШСМ*	0,5	75—7500 (8 пределов)	75

*Стационарный на один предел.

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Тип УТН-1. Класс точности 0,2. Номинальные напряжения: первичные 220; 380; 500 В; вторичные 100; $100/\sqrt{3}$; 100/3 В; номинальные мощности 15; 10; 5 В·А; коэффициент мощности 0,8—1.

Тип И510. Класс точности 0,1. Номинальные напряжения: первичные 3; 6; 10; 15 кВ; вторичные $100/\sqrt{3}$; 100 и 150 В. Частотная применяемость 50 Гц.

1-9. ЛЮКСМЕТРЫ

Приборы фотоэлектрической системы с измерительным механизмом магнитоэлектрической системы. Предназначены для измерения освещенности (табл. 1-37).

Таблица 1-37

Технические данные люксметров

Параметры	Ю-15	Ю-16	Ю-17
Пределы измерения, лк:			
основные	100—500	25—100—500	1—10—100
дополнительные, получаемые при помощи поглотителя	—	250—10 000—50 000	—
Основная погрешность на основных пределах измерения, %	15	10	10

1-10. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКТЫ

Комплекты измерительные К505 предназначены для измерений силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузке фаз. Измерительный комплект состоит из панели, на которой смонтированы приборы: фазоуказатель, вольтметр, амперметр и ваттметр со встроенным трансформатором тока до 10 А и добавочными сопротивлениями, а также переключатели номинальных напряжений и токов, переключатель фаз тока и напряжения, полярности ваттметра, переключатель работы комплекта с отдельным трансформатором тока и без него и зажимы для подключения к генератору и нагрузке. Соединения входящих в комплект К505 измерительных приборов (амперметра и вольтметра электромагнитной системы и ваттметра ферродинамической системы) и вспомогательных устройств, за исключением отдельного трансформатора тока УТТ5-М, выполнены стационарно внутри корпуса. Отдельный трансформатор тока УТТ5-М устанавливают в комплекте в специальную ячейку. По точности приборы комплекта относятся к классу 0,5 (на пределе 30 В к классу 1,0). Комплект К505 совместно с отдельным трансформатором тока УТТ5-М обеспечивает измерения на следующих пределах: по току — 0,5; 2,5; 5; 10 А (без отдельного трансформатора тока); 15; 50; 100; 150; 200; 300; 600 А (с отдельным трансформатором тока); по напряжению — 30; 75; 150; 300; 450; 600 В; по мощности — от 0,015 до 360 кВт в зависимости от номинального тока и напряжения. Номинальный коэффициент мощности для ваттметра равен 1. Нормальная область частот 40—65 Гц, расширения 65—500 Гц.

Комплекты измерительные К506 предназначены для измерения силы тока, напряжения, активной и реактивной мощностей в трехпроводных электрических цепях трехфазного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз, а также для измерений силы тока, напряжения и активной мощности в однофазных электрических цепях переменного тока. Измерительный комплект состоит из панели с измерительными механизмами (амперметр, вольтметр, ваттварметр) с добавочными сопротивлениями и трансформаторами тока. На панели смонтированы также фазоуказатель, переключатели номинальных напряжений и токов, переключатель фаз тока и напряжения, полярности ваттварметра, зажимы. Класс точности комплекта 0,5. Номинальные токи 1; 2,5; 5; 10; 25; 100 А. Номинальные напряжения 100—125; 250; 375; 600 В. Измеряемая мощность от 0,2 до 100 кВт (квар). Номинальные коэффициенты активной и реактивной мощности 1. Нормальная область частот от 40 до 65 Гц.

Комплекты чемоданные электроизмерительных приборов постоянного тока типов ЧК-1, ЧК-2, ЧК-3 предназначены для измерения тока или напряжения в цепях постоянного тока с непосредственным отсчетом по шкале. Комплекты состоят из магнитоэлектрических переносных приборов типа М45М, шунтов 75РИ и 75ШСМ и калиброванных проводников в металлических футлярах (чемоданах). Чемоданные комплекты представляют собой набор приборов, уложенных в металлический ящик. В чемоданах предусмотрены гнезда для размещения приборов, шунтов и соединительных проводников. В комплект типа ЧК-1 входят: милливольтметр типа М45М—75 мВ; вольтметр типа М45М на любой из пределов: 3—15—150; 3—15—150—300; 3—150—450; 150—300—600; 3—30—300; 30—75—150—300; 15—150—450; 150—300—600 В; три шунта типа 75РИ на любые из пределов: 0,3—0,75; 1,5—7,5; 15—30; 75; 150 А; пара калиброванных проводников общим сопротивлением 0,035 Ом; чемодан. В комплект типа ЧК-2 входят: вольтметр М45М на предел 75 мВ — 3—15—150 В; три шунта типа 75РИ на любые из пределов, указанных для ЧК-1; пара калибро-

ванных проводников общим сопротивлением 0,035 Ом; чемодан. В комплект типа ЧК-3 входят: два милливольтметра типа М45М на 75—0—75 мВ; вольтметр М45М на 150—300—600 В; два шунта типа 75ШСМ на 500 А; шунт 75ШСМ на 1500 А; калиброванные соединительные проводники сопротивлением 0,035 Ом; чемодан.

1-11. СВЕТОЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Осциллограф светолучевой типа Н115 предназначен для одновременной регистрации световым лучом на фотобумаге и визуального наблюдения на экране до 12 изменяющихся во времени величин (тока, напряжения). Число каналов 12. Ширина фотоленты 35; 60; 100; 120 мм. Скорость движения фотоленты 0,5; 1,25; 2,5; 5; 10; 25; 50; 125; 250; 500; 1000; 2500; 5000; 10 000 мм/с. Отметчик времени оптико-механический с интервалами между основными отметками 2; 0,2; 0,02; 0,002 с. Каждая десятая отметка имеет увеличенную ширину. Осциллограф укомплектован набором гальванометров, данные которых приведены в табл. 1-38.

Предельная скорость записи с ртутной лампой на фотобумаге УФ-67 2000 м/с, на фотобумаге с химическим проявлением чувствительностью 800 ед. с ртутной лампой 2600 м/с, с лампой накаливания ОП6, 8-11,5 180 м/с. Зеркальный барабан (с регулируемой скоростью развертки) имеет экран с миллиметровой шкалой и служит для визуального наблюдения стационарных периодических процессов и начальной расстановки световых пятен гальванометров. Питание — от сети переменного тока (напряжение 115, 127, 200, 220, 240 В, частота 50 Гц) через блок питания П133. Масса: осциллографа с кассетой 35 кг, блока питания 17 кг.

Осциллограф светолучевой типа Н117 предназначен для одновременной регистрации световым лучом на фотобумаге до 12 изменяющихся во времени величин (тока, напряжения). Осциллографирование производится на фотобумаге УФ с непосредственным проявлением на свету или на фотоленте с химико-фотографическим проявлением. Число каналов 12. Ширина фотоленты 35; 60; 100; 120 мм. Скорость движения фотоленты 0,5; 1,25; 2,5; 5; 10; 25; 50; 125; 250; 500; 1000; 2500; 5000; 10 000 мм/с. Отметчик времени оптико-механический с интервалами между основными отметками 2; 0,1; 0,02; 0,002 с. Каждая десятая отметка имеет увеличенную ширину. Гальванометры рамочные диаметром 6 мм. Осциллограф укомплектован набором гальванометров, данные которых приведены в табл. 1-38. Предельная скорость записи с ртутной лампой на фотобумаге УФ-67 2000 м/с; на фотобумаге с химическим проявлением чувствительностью 800 ед. с ртутной лампой 2600 м/с, с лампой накаливания ОП6, 8-11,5 180 м/с. Графление фотоленты продольное. Линии наносят через 2 мм, каждая пятая имеет увеличенную ширину. Включение и выключение исследуемой схемы автоматическое. Питание — от сети переменного тока (напряжение 115, 127, 200, 220, 240 В, частота 50 Гц) через блок питания типа П133. При работе с лампой накаливания — через блок питания или непосредственно от сети (220 В, 50 Гц). Масса: осциллографа с кассетой 33 кг; осциллографа без кассеты 30 кг; блока питания типа П133 17 кг.

Таблица 1-38

Технические данные гальванометров

Тип гальванометра	Рабочая полоса частот, Гц	Постоянная гальванометра по току (в осциллографе при длине луча 300 мм)	Сопротивление внутреннее, Ом	Наибольший рабочий ток, амплитудное значение
Успокоение обмоткой				
М010-20	0—12	0,056 мкА/мм	150	7 мкА
М010-40	0—24	0,200 мкА/мм	150	27 мкА
М010-80	0—48	0,470 мкА/мм	70	80 мкА
М005-0,15	0—90	1,670 мкА/мм	60	200 мкА
М005-0,3	0—180	6,700 мкА/мм	60	800 мкА
Успокоение жидкостью				
М014-10000	0—7000	10,000 мА/мм	15	80 мА
М015-15000	0—9000	4,600 мА/мм	300	30 мА
М004-0,6	0—300	0,042 мА/мм	13	4 мА
М004-1,2	0—600	0,167 мА/мм	13	13 мА
М004-2,5	0—1200	0,830 мА/мм	13	80 мА
М004-3,5	0—1700	2,300 мА/мм	17	80 мА
М004-7,0	0—3500	10,000 мА/мм	13	130 мА

Осциллограф светолучевой типа Н117/1 предназначен для одновременной регистрации световым лучом на фотоленте до 18 изменяющихся во времени электрических величин (тока, напряжения). Число каналов 18. Ширина фотоленты 35, 60, 100, 120 мм. Скорости движения фотоленты 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 250; 500; 1000; 2500; 5000; 10 000 мм/с. Линии отметок времени наносят через 2; 0,2; 0,02; 0,002 с по всей ширине фотоленты. Гальванометры рамочные типов М010, М014, М017 и М1005. Диапазон регистрируемых частот 0—10 кГц. Питание осциллографа от сети переменного тока (напряжение 220 В, частота 50 Гц) через блок питания. Масса осциллографа 33 кг.

Осциллограф светолучевой типа Н041 предназначен для регистрации световым лучом измерений во времени электрических или других величин, преобразованных в электрические. Количество каналов 16. Ширина фотоленты 60, 120 мм. Скорость движения фотоленты 2,5; 10; 40; 160; 640; 2500 мм/с. Линии отметок времени наносят через 0,1; 0,01 с. Гальванометры-вставки типов М019.1, М001.1А, М001.2, М001.3А, М001.4А, М001.5А, М019.7 диаметром 6 мм с диапазоном регистрируемых частот 0—5000 Гц. Источники света — лампы накаливания ОП7-0,5; РН6-3. Предельная скорость светового луча на фотоленте чувствительностью 1200 ед. 75 м/с. Питание осциллографа осуществляется от источника постоянного тока напряжением 27±2,7 В. Масса: осциллографа 20 кг, пульта управления 0,5 кг.

Преобразователи мощности типа П022 (табл. 1-39) предназначены для преобразования мощности постоянного тока, активной и

Таблица 1-39

Основные технические данные преобразователей мощности

Модификация преобразователя	Род тока	Номинальные значения	
		тока, А	напряжения, В
ПО22.1У4.2	Однофазный	5	100
ПО22.2У4.2	»	1; 5	100; 380
ПО22.3У4.2	»	1; 5; 10; 25	100; 380
ПО22.4У4.2	Постоянный	1; 5	100; 250
ПО22.5У4.2	Трехфазный	1; 5; 10; 25	100; 380
ПО22.6У4.2	Постоянный	1; 5	100; 250

мгновенной мощности однофазного и трехфазного токов частотой 50 Гц в напряжение постоянного и переменного тока с целью осциллографирования мощности. Являются вспомогательными частями светолучевых осциллографов. Работа основана на использовании датчика э. д. с. Холла, помещаемого в зазоре магнитной системы. Преобразователь можно подключать к исследуемым цепям непосредственно или через измерительные трансформаторы.

Выходное напряжение преобразователя при нагрузке 30 Ом и номинальных значениях входных параметров не менее 15 мВ при преобразовании мощности однофазного тока и не менее 25 мВ при преобразовании мощности трехфазного тока.

Преобразователь мощности типа П024 предназначен для преобразования активной мощности однофазного и трехфазного токов в напряжение постоянного тока с целью осциллографирования мощности. Преобразователь мощности может работать совместно с усилителем И37 и самопишущим прибором П37 или аналогичным другим выходным устройством. Работа преобразователя основана на использовании датчиков э. д. с. Холла, помещаемых в зазор магнитных систем. Номинальные значения входных сигналов: тока 1; 1,5; 2; 2,5 А; напряжения 40; 100 В; $\cos\varphi=1$; частоты 1000 Гц; нагрузки 200 Ом. Расширенная область частот 50—10 000 Гц. Мощность потребления в цепях напряжения преобразователя на номинальной частоте: не более 0,4 В·А на пределе 40 В; не более 1 В·А на пределе 100 В. Мощность потребления в цепях тока преобразователя на номинальной частоте не более 1,5 В·А. Номинальное значение выходного напряжения не менее 5 мВ. Отклонение выходного напряжения преобразователя от расчетного значения не более 1 % в диапазоне изменения входного тока от 0,1 до номинального или входного напряжения от 0,1 до 1,2 номинального.

Усилитель осциллографический типа Ф1510. Полупроводниковый пятиканальный усилитель постоянного и переменного напряжения типа Ф1510 с выходом по току предназначен для усиления небольших напряжений до уровня, позволяющего регистрировать их светолучевыми осциллографами, самопишущими и другими приборами. Выпускаются переносные и стационарные. Усилители Ф1510 имеют пять одинаковых каналов усиления (табл. 1-40).

Таблица 1-40

Технические данные осциллографических усилителей типа Ф1510

Входное напряжение, мВ	Входное сопротивление, кОм	Коэффициент передачи, мА/мВ	Входной ток, мА	Сопротивление нагрузки, Ом
10	20	3,0	30	300
		7,5	75	50
20	30	1,5	30	300
		3,75	75	50
50	40	0,6	30	300
		1,5	75	50
100	2	0,3	30	300
		0,75	75	50
200	4	0,15	30	300
		0,375	75	50
500	10	0,06	30	300
		0,15	75	50
1000	20	0,03	30	300
		0,075	75	50

1-12. ОСЦИЛЛОГРАФЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ

Осциллографы универсальные предназначены для исследования периодических (непрерывных и импульсных) сигналов (табл. 1-41).

Осциллографы однолучевые С1-40; С1-48Б; С1-65А; С1-72; С1-75; С1-76; С1-82; С1-9А; С1-92; С1-94.

Осциллограф С1-75 — самый быстродействующий из отечественных приборов. Прибор содержит встроенный генератор импульсов с амплитудой 200 мВ.

Осциллограф С1-92 имеет большие размеры рабочей части экрана (100×120 мм); позволяет производить одновременное исследование сигналов в двух временны́х масштабах.

Осциллограф С1-40 предназначен для особо точных измерений; обеспечивает высококачественное изображение сигнала и измерение его амплитудных и временны́х параметров с погрешностью 2 %.

Осциллографы С1-9А и С1-94 наиболее удобны для наладочных работ. Имеют массу всего 3,5 кг.

Осциллографы двухлучевые С1-55, С1-69, С1-102 предназначены для исследования одного или одновременно двух синхронных сигналов. Универсальное питание (от сети или батареи), возможность работы в жестких климатических условиях делают осциллограф С1-55 наиболее предпочтительным для наладочных работ.

Таблица 1-41

Основные технические данные электронно-лучевых осциллографов

Тип	Полоса пропускания, МГц	Коэффициент отклонения, мВ/дел.	Диапазон развертки			Рабочая часть экрана, мм
			от мкс/дел.	до с/дел.	коэффициент расширения	
Однолучевые						
С1-48Б	0—1	2	2	2	×5	60×80
С1-76	0—1	0,5	1	5	×10	60×100
С1-9А	0—1	10	1	0,5	—	30×50
С1-82	0—10	1	0,5	0,5	—	100×120
С1-72	0—10	20	0,05	0,05	—	36×60
С1-94	0—10	10	0,1	0,05	—	40×60
С1-40	0—20	50	0,02	0,1	—	60×80
С1-65А	0—50	5	0,01	0,05	—	64×80
С1-92	0—100	5	0,05	0,05	—	100×120
С1-75	0—250	10	0,02	0,1	×10	60×100
Двухлучевые						
С1-69	0—5	5	0,2	5	—	80×100
С1-55	0—10	10	0,02	0,02	×5	42×60
С1-102	0—10	0,5—200	0,1	5	×5	100×120

1-13. АППАРАТЫ И ПРИБОРЫ РАЗНЫЕ

Фазоуказатель типа Э500 предназначен для определения коэффициента мощности и фазового угла между векторами тока и напряжения (Э500/1) или фазового угла между двумя напряжениями (Э500/2) в симметричных трехфазных сетях переменного тока частотой 50 Гц и для определения порядка чередования фаз в трехфазной сети. Пределы измерения фазоуказателей 0—360°. Пределы измерения в значениях cos φ 1—0—1—0—1 (Э500/1). Номинальные линейные напряжения между зажимами трехфазной параллельной цепи фазоуказателей 110 и 380 В. Номинальный ток в однофазной (последовательной) цепи 5 А (кратковременно Э500/1). Номинальное напряжение между зажимами однофазной (второй параллельной) цепи 100 В (кратковременно Э500/1). Пределы допустимой погрешности фазоуказателей при токах или напряжениях в однофазных цепях 50—100 % номинальных — до ±5°. Пределы допустимой погрешности при токах или напряжениях в однофазных цепях 20—50 % номинальных — до ±10°. Ток потребления в трехфазной цепи фазоуказателей не более 25 мА. Ток потребления фазоуказателя Э500/2 в однофазной цепи не более 75 мА.

Фазоуказатель типа И517М предназначен для определения порядка чередования фаз в трехфазных цепях переменного тока. Номинальное напряжение 50—500 В в диапазоне частот 40—500 Гц. Продолжительность включения для напряжения 100 В и ниже не превышает 5 с; для остальных напряжений 3 с.

Электроизмерительные клещи типа Ц90 предназначены для измерения силы переменного тока частотой 50 Гц без разрыва цепи в сетях высокого напряжения. Класс точности 4. Пределы измерения: 15, 30, 75, 300, 600 А.

Электроизмерительные клещи типа Ц91 предназначены для измерения тока без разрыва цепи, а также напряжения в сетях низкого напряжения переменного тока с частотой 50 Гц. Класс точности 4,0. Пределы измерения: по току 10, 25, 100, 250, 500 А, по напряжению 300 и 600 В.

Электроизмерительные клещи типа Д90 предназначены для измерения мощности без разрыва цепи в сетях переменного тока частотой 50 Гц. Класс точности 4. Пределы измерения: при напряжении 220 В 25, 50, 75 кВт; при напряжении 380 В 50, 100, 150 кВт.

Прибор ПКВ-7 предназначен для проверки степени увлажненности силовых трансформаторов методами емкость—время и емкость—частота. Прибор позволяет измерять емкость изоляции на частотах 2 и 50 Гц, а также определять увеличение емкости за счет абсорбционной составляющей. Полученные при измерении отношения ($\Delta C/C$; C_2/C_{50}) определяют степень увлажненности обмоток трансформатора.

Аппарат типа АИИ-70 предназначен для испытания повышенным напряжением переменного и выпрямленного тока изоляции электрооборудования, а также для определения электрической прочности трансформаторного масла. Напряжение питающей сети 127/220 В; максимальное напряжение переменного тока 50 кВ; максимальное выпрямленное напряжение 70 кВ; максимальный выпрямленный ток 5 мА; мощность трансформатора (одноминутная) 2 кВ·А. В пусконаладочных управлениях Главэлектромонтажа Минмонтажспецстроя СССР кенотронная лампа КРМ-150, установленная в кенотронной приставке аппарата АИИ-70, заменяется полупроводниковым выпрямительным устройством высокого напряжения.

Секундомер электрический типа ПВ-53Л предназначен для измерения интервалов времени и применяется в основном для контроля времени срабатывания релейных электромеханических устройств. Цена деления секундной шкалы 0,01 с; счетчика секунд 1 с; питание от сети переменного тока 110 или 220 В; 50 Гц.

Секундомер электромеханический типа ИВ-2 предназначен для измерения интервалов времени и применяется в основном для контроля времени срабатывания релейных электромеханических устройств. Секундомер ИВ-2 может применяться для работы в шахтах. Цена деления секундной шкалы 0,01 с, счетчика секунд 1 с. Напряжение питания 380 или 660 В; 50 Гц.

Секундомер электромеханический типа П14-2М предназначен для измерения интервалов времени срабатывания релейных электромеханических устройств. Цена деления шкалы — секундной 0,01 с; 1 с; счетчика минут 1 мин. Напряжение питания 220 В; 50 Гц.

Секундомеры механические типов СДС, СОС, СОП (табл. 1-42) предназначены для измерения интервалов времени в долях секунды и секундах и применяются в качестве контрольных приборов при выполнении ряда наладочных работ. Обозначения расшифровы-

Таблица 1-42

Технические данные механических секундомеров

Параметры	Тип секундомера					
	СОПпр-2а-3	СОПпр-4а-3	СОСпр 6а-1	СОСпр-1-2	СДСпр-16-2	СДС-26-2
Количество шкал	2	3	2	2	2	2
Цена деления секундной шкалы, с	0,2	0,2	0,01	0,1	0,1	0,2
Цена деления счетчика, мин	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0
Класс точности	3	3	1	2	2	2
Емкость секундной шкалы, с	60	60	1	30	30	60

вают: первая буква С — секундомер; вторая буква О или Д — количество секундных стрелок: О — одна, Д — две; третья буква П или С — принцип действия: П — простой, С — суммирующий.

Измеритель временных параметров реле, типа Ф-738 с цифровой индикацией предназначен для определения времени включения или отключения реле с любой комбинацией двух пар контактов, а также времени кратковременного замыкания или размыкания контакта. Диапазон измеряемых интервалов времени от 1 мкс до 10 с (четыре предела); максимальная погрешность 10 %.

Электронный миллисекундомер типа ЭМС-54 предназначен для измерения промежутков времени, которые могут фиксироваться замыканием или размыканием контактных пар, например времени включения и отключения реле с размыкающими и замыкающими контактами; разницы во времени срабатывания любой комбинации двух пар контактов. Пределы измерения 5—500 мс (пять пределов). Основная погрешность измерения не более 5 % номинального значения шкалы на всех пределах.

Миллисекундомер цифровой Ф209 предназначен для измерения времени включения (отключения) реле с замыкающими и размыкающими контактами, разности времени срабатывания любой комбинации двух пар контактов, а также времени кратковременного замыкания (размыкания) контакта. Диапазон измеряемых интервалов времени 1—10^4 мс.

Измеритель расстояния до места повреждения кабеля Щ4120 предназначен для определения места заплывающего пробоя изоляции в силовых электрических кабелях высокого напряжения с бумагомасляной изоляцией с номинальным напряжением 6—35 кВ. Максимальное расстояние до места повреждения кабеля, определяемое прибором, от 40 до 20 000 м. Основная погрешность ±30 м. Питание от сети 220 В.

Индикаторы напряжения неоновые типа МИН-1 предназначены для проверки наличия в сети напряжения переменного тока с помощью свечения неоновой лампы. Номинальное напряжение 110—500 В, номинальная частота 50 Гц. Порог зажигания 90 В.

Индикаторы напряжения неоновые типа ПИН-90 предназначены для проверки наличия напряжения постоянного и переменного тока между токоведущими частями, а также между ними и заземленными частями с помощью свечения неоновой лампы. Применяются в шахтах, во взрывоопасных средах. Номинальное напряжение до 750 В. Порог зажигания 50 В (по постоянному току).

Указатели высокого напряжения УВН-80М предназначены для проверки наличия высокого напряжения с помощью свечения неоновой лампы. Диапазон проверки 2—10 кВ. Порог зажигания 550 В. Номинальная частота 50 Гц.

Указатели высокого напряжения УВН-90 предназначены для проверки наличия высокого напряжения с помощью свечения неоновой лампы. Диапазон проверки 9—110 кВ. Номинальная частота 50 Гц. Порог зажигания 9 кВ.

Тахометр электронный (ручной) типа ТЭ30-5Р предназначен для эпизодического измерения угловых скоростей вращающихся валов агрегатов. Тахометр представляет собой измеритель, выполненный на базе микроамперметра М93. Платы электронного преобразователя с батареями «Крона-ВЦ» заключены в пластмассовый корпус. Датчик выполнен отдельно, соединен с корпусом измерителя электрическим кабелем. При вращении ротора датчика в магнитопроводе возникает пульсирующий магнитный поток, а на зажимах катушки — электродвижущая сила, частота изменения которой пропорциональна частоте вращения вала агрегата. Для преобразования частоты э. д. с., индуктируемой датчиком, в пропорциональный ей ток служит электронный преобразователь частоты От датчика ток полученной частоты поступает на двухкаскадный усилитель, с выхода которого снимается аналоговый сигнал (ток). Диапазон измерения: 30—300, 300—3000, 3000—30 000 об/мин. Основная допустимая погрешность в рабочих диапазонах от верхнего предела измерений каждого диапазона не более ±1,5 % (в остальной части шкалы погрешность не нормируется). Тахометр работает в циклическом режиме с одним комплектом батарей не более 50 ч. Один цикл содержит восемь включений

по 5 с работы и 5 с отдыха. Промежуток между циклами не менее 5 мин.

Тахометр часовой типа ТЧ10-Р предназначен для измерения угловых и линейных скоростей способом непосредственного присоединения. Тахометр часовой интегрирующий — измерительный прибор, в котором происходит подсчет оборотов приводного вала за определенный промежуток времени, задаваемый часовым механизмом. Тахометр состоит из счетного и часового механизмов и механизма возврата стрелок. Пределы измерения: частоты вращения 50—10 000 об/мин; окружной скорости 1—1000 м/мин. Допустимая погрешность показаний: частоты вращения ±1 %; окружной скорости ±2 %.

1-14. АППАРАТЫ И ПРИБОРЫ, РАЗРАБОТАННЫЕ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ГЛАВЭЛЕКТРОМОНТАЖА МИНМОНТАЖСПЕЦСТРОЯ СССР

Передвижная автоэлектролаборатория УВЛ-03. Оборудование лаборатории размещено в кузове на базе автомашины ГАЗ-53А, позволяет выполнять следующие виды работы: испытание электрооборудования повышенным напряжением переменного тока до 100 кВ, испытание повышенным напряжением выпрямленного тока до 140 кВ; прожигание и отыскание мест повреждения силовых кабелей высокого напряжения; испытание изоляции обмоток электрических машин и трансформаторов; испытания заземляющих устройств. В электролаборатории УВЛ-03 для получения выпрямленного тока применены полупроводниковые выпрямители высокого напряжения.

Генератор командных сигналов ГКС предназначен для формирования стандартных сигналов, которые могут быть поданы на входы элементов, узлов и устройств систем регулирования и управления электроприводами с целью снятия и настройки характеристик, опробования режимов и выполнения других операций в процессе наладочных работ. Форма выходных сигналов — постоянное напряжение, регулируемое в пределах ±24 В; переменное напряжение прямоугольной, треугольной и синусоидальной формы; импульсы положительной и отрицательной полярности длительностью 50 мкс. Пределы регулирования частоты переменных и импульсных сигналов 0,1—1000 Гц. Пределы регулирования амплитуды переменных и импульсных сигналов от 0 до ±24 В. Сопротивление нагрузки не менее 240 Ом. Напряжение питания от сети однофазного тока 220 В.

Компаратор логический К-1 для наладки систем автоматики на логических элементах УБСР-ДИ предназначен для проверки правильности функционирования микросхем серий К155, КМ155, работающих в узлах и блоках аппаратуры. Действие компаратора основано на сравнении испытуемой и эталонной микросхемы по реакции на стимулирующие сигналы или сигналы, существующие при нормальной работе схемы. Логический компаратор имеет схемы для растяжения импульсов, которые позволяют обнаружить и показать динамические и статические ошибки. Обнаруживаются временные ошибки примерно 200 нс, на что указывает мигание светодиода. Таким образом, компаратор устраняет необходимость длительного и сложного анализа цифровых сигналов, определяя автоматически правильность сигнального уровня (высокий или низкий) в соответствии с таблицей функционирования проверяемой схемы. Компаратор состоит из решающего устройства со светоиндикатором и платы эталонной микросхемы. Он подключается к испытуемой микросхеме с помощью специального клипса, через который осуществляется питание от проверяемой микросхемы. Напряжение питания 5 В ±10 %. Регистрируемая временная неравнозначность не менее 200 нс. Максимальное количество выходов проверяемой микросхемы 7. Число единичных входов микросхем серии К155 или КМ155, дополнительно подключаемых к каждому выходу проверяемой микросхемы, 2. Дополнительная нагрузка на микросхемы, управляющие входами испытуемой микросхемы, — по одному входу ИМС К155.

Генератор нормированного числа импульсов ГНЧИ-1 для наладки систем автоматики на логических элементах УБСР-ДИ предназначен для использования в качестве портативного источника цифрового испытательного сигнала при наладке устройств, выполненных на микросхемах серий К155 и КМ155. Генератор позволяет получать серию импульсов тока, число которых заранее программируется в пределах от 1 до 9999, частота прохождения импульсов плавно регулируется от 1 до 10 000 Гц. Прохождение серии импульсов индицируется светодиодом. В генераторе предусмотрены режим непрерывной генерации импульсов с частотами, указанными выше, а также возможность работы от внешнего источника тактовой частоты. В этих режимах генератор может использоваться по синхронизирующему выходу как делитель тактовой частоты. Коэффициент деления определяется заданным числом импульсов серии основного выхода генератора. Используя такой делитель частоты, можно, например, синхронизировать осциллограф по любому от 1 до 9999 импульсов. Генератор ГНЧИ-1 может быть использован для проверки счетчиков, сумматоров, дешифраторов и других элементов вычислительной техники, где часто бывает необходимо подать на вход определенное число импульсов и по таблице истинности интегральной схемы проконтролировать уровни выходных сигналов (например, с помощью логического пробника П-1) Функционально ГНЧИ-1 состоит из задающего генератора, датчика импульсов, счетчика — опознавателя заданного числа импульсов, формирователя импульсов синхронизации, управления, индикатора серии импульсов. Генератор ГНЧИ-1 может использоваться совместно с частотомером или другими измерительными приборами. Питание ГНЧИ-1 осуществляется от источника питания проверяемой схемы (5 В) через модуль питания. Потребляемая мощность не более 1,5 Вт Форма импульсов тока — прямоугольная. Длительность импульса 0,3 мкс±10 %. Значение тока в импульсе не менее 0,7 А±10%.

Датчик импульсов Д-1 для наладки систем автоматики на логических элементах УБСР-ДИ предназначен для использования в качестве

нормированного источника зондирующего цифрового испытательного сигнала при наладочных работах в устройствах, выполненных на микросхемах серий К155 и КМ155.

Датчик генерирует одиночные импульсы или непрерывную их последовательность в точку схемы, которой касается его щуп. При низком уровне сигнала в точке присоединения датчик будет генерировать импульсы высокого уровня, при высоком уровне — импульсы низкого уровня. Для этого нет необходимости перестраивать или переключать датчик. Мощность импульса достаточно велика, чтобы гарантировать проверку узла. В то же время малая длительность импульса предотвращает повреждение испытуемой интегральной схемы. Функционально датчик импульсов состоит из узлов запускающих сигналов и формирования импульсов, управляемого источника разнополярного тока, цепи электропитания и защиты. Питание датчика осуществляется от источника питания проверяемой схемы через модуль питания. Напряжение питания 5 В±10 %. Потребляемая мощность не более 0,2 Вт. Форма импульсов тока — прямоугольная. Длительность импульса 0,3 мкс±10 %. Ток в импульсе не менее 0,7 А±10 %. Частота импульсов в режиме непрерывной генерации 100 Гц±20 %.

Пробник логический П-1 для наладки систем автоматики на логических элементах УБСР-ДИ является индикатором состояния любого транзисторно-транзисторного логического элемента (ТТЛ) и предназначен для наладки интегральных микросхем серий К155 и КМ155 при пусконаладочных работах. В проверяемой схеме сигнал существует в одном из трех уровней: высоком — логическая «1», низком — логический «0» и промежуточном. Каждому состоянию соответствует некоторое пороговое напряжение. Информация об уровне сигнала получается в момент касания иглы пробника проверяемой точки схемы. С помощью логического пробника можно определить, какому состоянию соответствует сигнал; уровню логический «0» соответствует отсутствие свечения индикатора, уровню логическая «1» — свечение индикатора, а неопределенный уровень сигнала индицируется изменением цвета свечения. Часто при настройке цифровых схем достаточно установления факта присутствия импульсной активности, чтобы удостовериться в исправной работе схемы. Особенностью пробника является устройство для растяжения импульсов, позволяющее индицировать одиночные импульсы (с длительностью не менее 50 нс) или серии импульсов с частотой до 10 МГц. Независимо от длительности контролируемых импульсов или частоты их следования мигание индикатора происходит с частотой 5—7 Гц, что легко воспринимается визуально. Схема пробника состоит из узлов для определения и индикации промежуточного уровня (от 0.8—2,0 В), нулевого (0—0,8 В) или единичного (более 2 В) уровней, индикации импульсной активности и цепи защиты от перенапряжений по входу пробника. По сравнению с осциллографом пробник является экономичным портативным прибором, не требующим времени на прогрев, поиск диапазонов, обеспечивающим получение достаточной информации о состоянии интегральной микросхемы.

Частотомер Ч-1 для наладки систем автоматики на логических элементах УБСР-ДИ предназначен для измерений параметров импульсных последовательностей. С помощью частотомера можно производить измерения: числа импульсов, длительности импульсов на уровне логической «1» или логического «0», длительности или частоты периодической последовательности импульсов, а также временных интервалов при ручном или автоматическом управлении. Входные сигналы частотомера совместимы с ТТЛ интегральными схемами серий К155 и КМ155. Функциональная схема частотомера содержит следующие узлы: формирования импульсов эталонной частоты и эталонных интервалов, входных усилителей, управления и переключения режимов, счета и индикаций. Питание частотомера осуществляется от источника питания проверяемой схемы (5 В) через модуль питания. Потребляемая мощность не более 5 Вт. Максимальная частота повторения регистрируемых импульсов 10^6 Гц. Диапазон измеряемых частот от 1 до 999 900 Гц. Диапазон измеряемых длительностей импульсов и временных интервалов от 10^{-5} до 100 с.

Измеритель углов управления вентильных преобразователей типа РС-1М предназначен для фазировки тиристорных преобразователей, измерения углов управления (запаздывания) управляющих импульсов относительно фазы напряжения питающей сети, проверки симметрии управляющих импульсов и силовых напряжений, а также прочих измерений фазовых сдвигов между напряжениями в вентильных преобразователях. Измеряемые углы управления от 0 до 200°. Относительная погрешность измерения (основная) 0,5 %. Напряжение управляющих импульсов (амплитудное значение) от 2,5 до 20 В. Напряжение питания не менее 3 В (сухой элемент 3338Л).

Цифровой измеритель фаз ЦИФ-2 применяют при наладке сложных электроприводов с тиристорными преобразователями для фазировки преобразователей, измерения углов управления управляющих импульсов относительно фазы напряжения питающей сети и прочих измерений фазовых сдвигов между напряжениями в вентильных преобразователях. ЦИФ-2 обеспечивает проведение измерений с непосредственной индикацией измеряемой величины в цифровой форме. Питание измерителя — от сети переменного тока 220 В; потребляемая мощность не более 15 Вт; форма воспринимаемых входных сигналов — синусоидальная; импульсы — положительной полярности; амплитудные значения входных сигналов — от 3 до 380 В; диапазон измеряемых углов 0—360°. Погрешность измерения синусоидальных сигналов ±1°, импульсных сигналов ±0,1°. Применение цифрового измерителя фаз ЦИФ-2 позволяет сократить время на измерение и существенно повысить его точность.

Генератор звуковой частоты типа ГЗЧ-Т2 предназначен для получения напряжения при частоте 1000 Гц. Применяется для определения трасс прокладки кабелей и при отыскании места повреждения в кабельных линиях. Потребляемая мощность не более 4,5 кВ·А; номинальная мощность на выходе не менее 2,0 кВ·А; диапазон регулирования частоты 900—1200 Гц; напряжение на выходных зажимах генератора 50—250 В; предельно допу-

стимый ток на выходе 8—40 А; частота следования модулирующих импульсов 0,7—1,5 Гц; время непрерывной работы генератора под нагрузкой 10 ч.

Генератор технической частоты типа ГТЧ-Т50 предназначен для проверки, регулировки и настройки частотных реле. Потребляемая мощность (не более) 150 В·А; номинальная мощность на выходе 50 В·А; диапазон регулирования выходного напряжения 20—150 В; коэффициент нелинейных искажений при выходной мощности от 0,2 $P_н$ до $P_н$ — 5 %. Диапазон регулирования частоты 45—55 Гц.

Измеритель петли заземления типа ИПЗ-Т предназначен для измерения тока однофазного к. з. в установках напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью при определении правильности уставок максимально-токовых защит. Пределы измерения токов к. з. 50—250; 250—2500 А; пределы измерения фазового угла в цепи к. з. 10—80 °.

Трансформатор нагрузочный типа НТ-10 предназначен для проверки первичным током максимально-токовых защит. Напряжение на вторичной обмотке при холостом ходе (не менее): при параллельном соединении 2—4 В, при последовательном 4—8 В; ток вторичной обмотки 10 кА; потребляемая мощность при номинальной нагрузке (не более) 50 кВ·А.

Переговорное устройство типа ПУ-71 предназначено для проводной связи по свободным жилам кабелей; выполнено на базе телефонно-микрофонной гарнитуры типа ТМГ-1; предусмотрена возможность регулирования громкости и посылки в линию тонального вызова; имеет защиту от случайного подключения его к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

Пробник типа УП-71 предназначен для проверки цепей в электрических установках при отсутствии на них напряжения. Предусмотрена возможность индикации наличия напряжения при случайном прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением до 380 В постоянного и переменного тока; допускает проверку электрических цепей с сопротивлением до 10 кОм, а также проверку целостности электрических цепей с сопротивлением до 10 Ом. Напряжение питания 2,6 В.

Высоковольтный полупроводниковый выпрямитель типа ВВК-200/0,5 предназначен для выпрямления высокого напряжения переменного тока при испытаниях изоляции электрооборудования и кабельных линий, а также для прожига дефектных мест в изоляции силовых кабелей. Выпрямитель собран из 40 последовательно соединенных выпрямительных столбов типа Д1006А. Номинальное обратное напряжение 200 кВ; испытательное обратное напряжение 220 кВ; номинальный выпрямленный ток (среднее значение) 0,5 А; допустимый прямой ток промышленной частоты в течение 1 с 6 А; допустимый кратковременный разрядный прямой ток 70 А.

Прибор типа ОНВ-3 для предварительного (до подключения к сети) определения направления вращения трехфазных электродвигателей. Принцип действия приборов основан на использовании остаточного намагничивания ротора двигателя. При повороте ротора от руки в обмотках статора возникает э. д. с. трехфазного тока. В качестве чувствительного фазоуказателя в приборе используется триггерная переключающая схема на полупроводниковых триодах. Возникающая при вращении ротора э. д. с. трехфазного тока переключает один из триггеров, что соответствует отклонению стрелки прибора влево или вправо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1-1. **Справочник** по электроизмерительным приборам/Под ред. К. К. Илюнина. 2-е изд. — Л.: Энергия, 1977. — 832 с.

1-2. **Электроизмерительные** приборы. Номенклатурный справочник. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1978. — 96 с.

1-3. **Регистрирующие** приборы. Номенклатурный справочник. — ЦНИИТЭИ приборостроения, 1978. — 44 с.

1-4. **Радиоизмерительные** приборы. Каталог-проспект. — М.: ЦООНТИ «ЭКОС», 1980. — 224 с.

1-5. **Средства** хронометрической техники. Каталог. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1978. — 100 с.

1-6. **ГОСТ 23217-78.** Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.

1-7. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка, А. П. Хечумяна. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ОРГАНИЗАЦИЯ НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

2-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Работы по наладке электроустановок являются специализированной, завершающей частью комплекса электромонтажных работ и, как правило, должны выполняться той организацией (объединение, трест), которая производит основные электромонтажные работы и несет за них ответственность.

Целью наладочных работ является обеспечение:

электрических параметров и режимов работы электрооборудования для возможности комплексного или по узлам опробования технологической установки в сроки, определяемые утвержденным графиком;

заданных проектом технических показателей (например, скорости, производительности) и надежности работы.

Для достижения указанных целей должен быть выполнен комплекс приемо-сдаточных испытаний, объем которых определяется гл. 1-8 ПУЭ действующими инструкциями министерств и ведомств, а также требованиями технологии производства.

В результате проведенных наладочных

операций и опробований должно быть дано заключение о возможности передачи электроустановки в эксплуатацию.

2-2. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

1. До начала наладочных работ должны быть выполнены следующие подготовительные мероприятия:

изучены электрическая часть проекта, а также ее связь с технологией производства и техническая документация заводов — поставщиков электрооборудования;

произведены поверочный расчет и согласование уставок реле управления и защиты;

составлен проект производства наладочных работ;

согласован график производства работ;

подобраны необходимые инструкции и техническая литература, подобраны и размножены в необходимом количестве формы протоколов;

подготовлен парк приборов и приспособлений.

2. На месте производства работ руководитель наладочных работ обеспечивает выполнение следующих подготовительных мероприятий:

определяет производственные помещения для хранения приборов и аппаратуры, для работы с проектной и отчетной документацией; помещения для лабораторий по проверке и настройке реле и отдельных электрических узлов (панелей управления, блоков УБСР, блоков на логических элементах и т. п.). Помещения должны находиться в непосредственной близости от налаживаемого объекта. Площадь помещений определяется проектом производства наладочных работ и уточняется на месте в зависимости от местных условий;

совместно с руководителем монтажных работ устанавливает начало наладочных работ и в соответствии с общим графиком выполнения наладки составляет график совмещенного производства монтажных и наладочных работ.

Организация монтажа строится с учетом постоянной и равномерной загрузки персонала наладчиков.

3. В соответствии с объемами и сроками выполнения наладки определяется сеть участков, бригад и звеньев на объекте.

Участок или бригаду должен возглавить квалифицированный инженер, имеющий опыт, старший инженер или прораб по наладочным работам; руководителем звена должен быть инженер или квалифицированный техник в зависимости от сложности налаживаемого оборудования.

4. Каждый участок, бригада, звено должны получить определенное задание и сроки выполнения работ. Это задание должно предусматривать выполнение всех наладочных операций, вплоть до ввода в эксплуатационный режим установки или агрегата. Работы по заданиям должны выполняться одной бригадой или одним звеном, как правило, постоянного состава. При наличии на участке сравнительно большого количества сходных объектов (подстанции, линии электропередачи высокого напряжения, преобразовательные агрегаты, приводы рольгангов и т. п.) целесообразно создание специализированных бригад (звеньев) по видам установок. При этом на первой стадии выполняют работы по однотипным установкам, на завершающей стадии предусматривается окончание наладочных работ в полном комплексе для данного объекта. Такой метод производства работ ввиду его однотипности значительно ускоряет наладку объектов и создает условия для повышения качества выполнения наладочных работ.

5. Проверяются организация и экипировка рабочих мест бригад (звеньев), каждое рабочее место размещается в непосредственной близости от налаживаемого оборудования. На рабочем месте должен быть установлен лабораторный стол достаточной прочности, необходимых размеров, обязательно из дерева для обеспечения электробезопасности. В непосредственной близости от рабочего места не должны производиться строительные или механомонтажные работы.

6. Временные питающие электрические сети должны быть выполнены открыто проводом соответствующего сечения с необходимой изоляцией и достаточной механической прочностью. Они должны быть надежно закреплены и подвешены на высоту, исключающую возможность прикосновения к ним людей и повреждений в монтажных условиях. Питание по временным схемам должно выполняться через выключатель, рубильник или автомат закрытого исполнения с защитой и четким обозначением включенного и отключенного положений. Последовательно с закрытым коммутационным аппаратом монтируют коммутационное устройство с видимым разрывом (например, штепсельный разъем). Не допускается подсоединение временных сетей или присоединение к ним набросом (например, осветительных ламп).

Рабочее место должно иметь достаточное освещение и надежное ограждение во всех местах, где может появиться напряжение; при производстве работ вывешивают предупредительные плакаты. Рекомендуется иметь три наиболее употребительных плаката: «Стой — высокое напряжение», «Не включать — работают люди», «Работать здесь».

7. Обязанности руководителя наладочных работ по объекту определяют в специализированных организациях должностной инструкцией; руководитель осуществляет:

общий контроль за ходом наладочных работ;

техническое и организационное руководство подразделениями;

решение всех возникающих вопросов с представителями заказчика, проектной и электромонтажной организациями;

сдачу в эксплуатацию отдельных узлов или электроустановок;

контроль за ведением оперативной технической документации и оформлением сдаточной документации.

С целью своевременной подготовки технической отчетной документации, подлежащей предъявлению заказчику во время проведения наладочных работ, ведутся оперативные записи результатов испытаний и измерений по ходу работ в соответствующий бланк протокола.

Формы протоколов должны отражать технологическую последовательность выполнения наладочных работ. Протоколы являются приемо-сдаточным документом, в котором приведены все результаты проверок, испытаний и измерений. Все изменения в схемах, замена приборов или аппаратов фиксируются в контрольном экземпляре чертежа проекта, подлежащего сдаче заказчику при окончании работ.

Замечания по проектной документации, монтажу и электрооборудованию записывают в специальный журнал регистрации дефектов проекта, монтажа и оборудования для доведения до сведения соответствующих организаций и дальнейшего их устранения. Все другие замечания, а также данные о замене конструкций, электроматериалов, приборов, аппаратов, о применяемых новых методах испытаний или особенностях наладки, представляющих технический интерес, записывают в рабочую тетрадь с последующим отражением в сводном техническом отчете. Это в особенности относится к электрооборудованию и электроустройствам импортных поставок.

2-3. ПРОЕКТ ОРГАНИЗАЦИИ НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

Проект организации наладочных работ или проект производства наладочных работ (ППНР) является документом, определяющим техническую подготовку и организацию наладочных работ на объекте.

Проект должен включать в себя следующие разделы:

объем в денежном и физическом выражении предстоящих наладочных работ (применительно к сметам);

численность и квалификация наладочного персонала, необходимого для выполнения работ в установленные сроки, с учетом средней выработки;

распределение исполнителей на объекте во времени и по участкам, узлам и т. д.;

результаты анализа проектной документации, программы (задания) по наладке наиболее сложного электрооборудования;

графики работ, в том числе графики совмещенного выполнения наладочных и монтажных работ;

перечень технической и сдаточной документации применительно к пунктам сметы (технологические карты, ПУЭ, инструкции и формы протоколов);

перечень приборов, приспособлений, материалов и средств техники безопасности, необходимых для производства наладочных работ;

для особых случаев специальные указания по технике безопасности с перечнем защитных средств;

перечень замечаний по проекту, монтажу и дефектов электрооборудования (заполняется в процессе выполнения наладочных работ);

предложения по организации и технической подготовке наладочного персонала (подбор инструкций, технологических карт, справочной и технической литературы, проведение технической учебы и инструктажа).

В проект производства наладочных работ должен быть включен отдельным пунктом объем наладочных работ, предназначенных для выполнения до монтажа электрооборудования на объекте, например предварительная наладка кабин мостовых кранов в МЭЗ или проверка блоков УБСР, статических преобразовательных агрегатов и др. в специально отведенных помещениях, находящихся вблизи объекта.

2-4. ВЗАИМООТНОШЕНИЯ С ЗАКАЗЧИКОМ И СМЕЖНЫМИ СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

1. Для оперативного решения организационных вопросов с заказчиком, возникающих у наладочной организации, не позже чем за 1 мес до начала наладочных работ заказчиком выделяется группа представителей или один ответственный представитель (в зависимости от объема наладочных работ), курирующий все наладочные работы (в дальнейшем изложении группа именуется заказчик).

2. Исходя из практики организации наладочных работ и оформления договорных отношений заказчик обязан:

в согласованные в зависимости от объема намечаемых работ сроки, но не позднее чем за 3 мес до начала наладочных работ, представить наладочной организации всю необходимую проектную документацию в двух экземплярах;

выделить наладочной организации помещение для размещения ее персонала и хранения измерительных приборов. Помещение предоставляется за счет заказчика и должно быть обособленным, отапливаемым, обеспеченным охраной, оборудованным инвентарем и местным телефоном;

обеспечить командированный персонал наладочной организации жилым помещением с отоплением, освещением и постельными принадлежностями (в гостинице, доме приезжих), с оплатой непосредственно командированными работниками или наладочной организацией по существующим коммунальным тарифам, но не более сумм, оплачиваемых командированному в возмещение расхода по найму жилой площади в соответствии с действующим законодательством;

обеспечить сохранность оборудования и установок, подлежащих наладке, и режим, исключающий доступ к ним посторонних лиц;

согласовать график производства работ, представляемый наладочной организацией;

для обеспечения производства наладочных работ заказчик совместно с электромонтажной организацией должен обеспечить временное электроснабжение зоны наладки. Подача и снятие напряжения должны осуществляться эксплуатационным персоналом по заявке руководителя наладочных работ или лица, им выделенного, с записью в журнале дежурного по эксплуатации.

3. В целях своевременного освоения нового электрооборудования, схем управления, защиты и автоматики заказчик выделяет из состава эксплуатационного персонала необходимых работников для введения последних, по согласованию с наладочной организацией, в состав бригад наладчиков.

4. В ходе производства наладочных работ заказчик:

согласовывает с проектной организацией или ее авторским надзором, а также с заводами — изготовителями электрооборудования вопросы, связанные с изменениями в проекте, необходимость которых выявилась в процессе производства наладочных работ;

обеспечивает при необходимости проведение проектной организацией авторского надзора;

обеспечивает замену отбракованного и комплектацию недостающего электрооборудования;

согласовывает с энергосистемой уставки релейной защиты и порядок подачи напряжения на объекты;

принимает и оценивает качество работ, выполняемых наладочной организацией, как локальных, так и полностью законченных по данной установке;

следит за своевременным выполнением монтажных работ, проводящихся в связи с изменением проекта, устранением дефектов оборудования и замечаниями приемочной комиссии;

организует подготовку и проведение пробной режимной эксплуатации, приемо-сдаточных и государственных испытаний;

составляет программу и утверждает методику испытаний технологического оборудования на период пробной режимной эксплуатации.

5. После окончания наладочных работ и получения протоколов испытания и наладки заказчик организует приемку оборудования в эксплуатацию, для чего совместно с электромонтажной, механомонтажной и наладочной организациями организует комплексные испытания сдаваемого оборудования и пробную его эксплуатацию в течение обусловленного времени (в пределах 24—72 ч, если нет специальных указаний в проекте или нормативных документах).

Сдача — приемка электроустановок оформляется наладочной организацией и заказчиком совместным актом.

6. К моменту подачи напряжения на объект наладки по постоянной схеме вводится эксплуатационный режим, при этом заказчик должен обеспечить дежурство своего персонала для обслуживания находящихся под напряжением распределительных устройств, подстанций и электрооборудования, связанного с технологическими установками.

С введением эксплуатационного режима обеспечение общих условий техники безопасности, оформление нарядов и допусков для производства наладочных или монтажных работ в действующих установках, а также надзор во время их проведения осуществляются эксплуатационным персоналом заказчика.

7. Взаимоотношения с электромонтажной организацией (главным инженером, начальником участка, производителем работ) определяются следующими положениями:

до начала производства наладки руководитель наладочных работ совместно с руководителем монтажных работ определяет степень готовности объекта, устанавливает дату начала наладки в соответствии с согласованным графиком совмещенного производства монтажных и наладочных работ, намечает мероприятия, обеспечивающие безопасность производства совмещенных работ;

разрешение на производство наладочных работ оформляется руководителем электромонтажных работ и руководителем наладочных работ (на узле, участке, объекте) путем записи в «Журнале производства наладочных и монтажных работ» (форма 1). При этом должна быть точно определена рабочая зона производства наладочных работ (место, где расположено электрооборудование и где будет собрана испытательная схема); при подаче напряжения в испытательную схему должны соблюдаться требования правил техники безопасности (вывешены плакаты, установлены ограждения и т. п.). «Журнал производства наладочных и монтажных работ» хранится у руководителя наладочных работ. График совмещенных работ должен быть доведен до сведения всего монтажного и наладочного персонала, участвующего в выполнении работ;

монтажный персонал устраняет все дефекты и недоделки, выявленные в процессе наладочных работ и записанные в «Журнале регистрации дефектов проекта, монтажа и оборудования» (форма 2). Устранение незначительных дефектов монтажа производится монтажным персоналом под наблюдением наладчиков без оформления в «Журнале производства наладочных и монтажных работ». В остальных случаях для ликвидации недоделок или исправления дефектов монтажа установка передается монтажной организации в отключенном состоянии с оформлением в «Журнале производства наладочных и монтажных работ»;

перед подачей напряжения на электроустановку представители монтажной и наладочной организаций производят осмотр и определяют возможность подачи напряжения, а в дальнейшем участвуют в пробных пусках.

8. Взаимоотношения наладочной организации с генподрядчиком осуществляются через электромонтажную организацию. Представитель наладочной организации принимает участие в оперативных совещаниях и комиссиях, рассматривающих вопросы устранения недоделок, порядка и сроков испытаний и т. п.

9. Подготовка к сдаче в эксплуатацию простейших электротехнических установок, которые не требуют производства сложных измерений, настройки режимов или регулировки уставок, должна производиться монтажным персоналом.

К таким работам относятся:

в сетях электроснабжения напряжением до 1000 В — проверка фазировки, измерение сопротивления изоляции электропроводок и токопроводов в жилых, коммунальных и культурно-бытовых зданиях и бытовках промышленных объектов;

измерение изоляции, определение направления вращения и пусковое опробование асинхронных короткозамкнутых электродвигателей (с местным управлением без устройства блокировки и автоматики), находящихся в жилых, коммунальных и культурно-бытовых объектах, а также на промышленных объектах, если эти двигатели не входят в комплекс пускаемого наладочным персоналом оборудования;

Форма 1

ЖУРНАЛ

производства наладочных и монтажных работ
(предприятие, объект, участок или электроустановка)

(левая сторона)

Наименование узлов схемы или механизма, а также панелей щитов, шкафов или помещений, в которых расположена аппаратура	Цель передачи электрооборудования. Мероприятия по технике безопасности и кем выполняются	Срок выполнения мероприятий по технике безопасности

(правая сторона)

Дата и время передачи	Для выполнения наладочных работ		Для выполнения монтажных работ
	Люди сняты и предупреждены. Подавать напряжение разрешаю (руководитель монтажных работ)	Установку под наладку принял (руководитель бригады наладчиков)	Напряжение снято. Монтажные работы производить разрешаю (руководитель бригады наладчиков)

(Последняя страница)

В журнале_____ листов
пронумеровано и скреплено печатью

Начальник участка _____ (подпись)

Прораб _____ (подпись)

«_____» _____ 19___ г.

Форма 2

ЖУРНАЛ

регистрации дефектов проекта, монтажа и оборудования
предприятие, объект, участок или электроустановка)

Дата записи в журнал	Наименование узла, схемы или механизма, а также панелей шкафов, в которых расположена аппаратура	Описание дефекта (руководитель бригады наладчиков, руководитель монтажных работ, представитель заказчика)	Дефекты устранены	
			Дата	(руководитель монтажных работ, представитель заказчика, руководитель бригады наладчиков)

(последняя страница)

В журнале_____ листов
пронумеровано и скреплено печатью

Начальник участка _____ подпись

Прораб _____ подпись

«_____» _____ 19___ г.

Форма 3

ЖУРНАЛ

опробования механизмов

Объект _____

Заказчик _____
(левая сторона первого листа)

Для подачи заявок на опробование механизмов выделяются следующие работники:

От электромонтажной организации _____
(наименование организации)

1. _____
(занимаемая должность, фамилия, и. о.)

2. _____
(должность лица, назначившего ответственных лиц) для подачи заявок

3. _____
(дата и его подпись)

От наладочной организации _____
(наименование организации)

1. _____
(занимаемая должность, фамилия, и. о., квалификационная группа)

2. _____
(должность лица, назначившего ответственных лиц) для подачи заявок

3. _____
(дата и его подпись)

От механомонтажной организации _____
(наименование организации)

1. _____
(занимаемая должность, фамилия, и. о.)

2. _____
(должность лица, назначившего ответственных лиц) для подачи заявок

3. _____
(дата и его подпись)

(лицевая и оборотная стороны листов 2-го, 3-го и т. д.)

Дата, время (часы, минуты)	Номер или наименование механизма	Содержание записи (заявки), Должность и подпись сделавшего заявку	Примечание

(последняя страница)

В настоящем журнале _____ листов

пронумеровано и скреплено печатью

Начальник участка _____
(подпись)

«_____» _____ 19 г.

проверка осветительных устройств производственных корпусов и других объектов, аналогичных по технической сложности.

10. Взаимоотношения между механомонтажной организацией (главный инженер, начальник участка, производитель работ) и наладочной организацией в период пробных пусков и опытной эксплуатации определяются следующими положениями:

механомонтажной организацией должны быть выделены и генподрядчиком утверждены на пусковой период ответственные представители, по разрешению которых будет производиться опробование технологических механизмов;

персонал механомонтажной организации совместно с наладочным персоналом электрической части должен произвести настройку механических узлов, которые воздействуют на электрические схемы управления (путевые и конечные выключатели, датчики, тормозные устройства, сельсины и т. д.); готовность механизма (агрегата) к пуску оформляется в «Журнале опробования механизмов» (форма 3) ответственным представителем механомонтажной организации и ответственными за подачу напряжения представителями электромонтажной и наладочной организаций. «Журнал опробования механизмов» хранится у представителя заказчика.

11. Заявка службе эксплуатации на подачу напряжения подается накануне опробования механизма совместно ответственными представителями электромонтажной, механомонтажной и наладочной организаций. Первые пуски механизмов проводят по согласованной и утвержденной заинтересованными организациями программе, в которой предусматриваются режимы работы механизма.

Пуск и остановку механизма производят по указаниям представителя механомонтажной организации; пуск без представителя указанной организации не допускается. Безопасность в зоне работы механизма обеспечивается механомонтажной организацией В период опытной эксплуатации опробование отдельных механизмов и комплекса в целом производится согласно общей программе, составленной механомонтажной, наладочной организациями и технологами производства.

2-5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Работы, проводимые вне зоны монтажа. При наличии крупных партий сложного электрооборудования (блоки логических элементов, комплектные шкафы тиристорных преобразователей и блочных систем управления приводом, датчики, кабины кранов, панели релейной защиты, объемные посты управления, комплектное электрооборудование в контейнерной поставке и т. п.), если это предусмотрено проектом производства работ, производится предварительная наладка (проверка и испытание) электрооборудования до готовности строительно-монтажных работ и передачи его в монтажную зону. При этом должны быть выполнены:

проверка соответствия проекту приборов и аппаратуры блоков, комплектных устройств, панелей;

проверка и настройка блоков систем управления приводом;

проверка и регулировка релейно-контакторной аппаратуры и приборов релейной защиты;

проверка и настройка систем импульсно-фазового управления вентильных преобразователей и силовых блоков;

проверка работы преобразователей на балластное сопротивление или макет привода;

проверка работы шкафов систем управления совместно с моделью объекта регулирования.

Работы выполняются с использованием специальных стендов или временных испытательных схем.

Ответственность за технику безопасности при выполнении этих работ несет руководитель наладочных работ.

Наладочные работы, выполняемые по совмещенному графику одновременно с монтажными работами.

а) К началу наладочных работ непосредственно на объекте должны быть установлены шкафы, пульты и станции управления, панели релейной защиты, автоматики и сигнализации со смонтированными на них приборами и аппаратами. В распределительных устройствах должны быть установлены трансформаторы тока и напряжения, выключатели, разъединители и приводы к ним.

Состояние помещений, в которых смонтировано электрооборудование, подлежащее наладке, должно обеспечить нормальные и безопасные условия производства работ. Строительные и отделочные работы в зоне наладочных работ должны быть закончены.

Подход к электрооборудованию должен быть свободным — убраны леса, подмости, опалубка и т. п. Должны быть закрыты люки, ямы и проемы, траншеи и кабельные каналы или над последними должны быть мостики согласно СНиП и действующим правилам техники безопасности.

В помещениях или местах, где будут производиться наладочные работы, должны быть смонтированы постоянные или временные сети подачи электроэнергии, постоянного освещения, а также воды и сжатого воздуха, если последние необходимы для опробования налаживаемого электрооборудования.

Для проезда автолаборатории необходимо устройство постоянных или временных подъездных дорог к объектам испытаний.

До полного окончания монтажа наладочные работы ведутся по совмещенному с монтажниками графику с оформлением в «Журнале производства наладочных и монтажных работ», в котором четко определена зона производства наладочных работ.

Общие меры безопасности при производстве совмещенных монтажных и наладочных работ обеспечиваются руководителем электромонтажных работ. Ответственность за технику безопасности непосредственно в зоне производства наладочных работ несет руководитель наладочных работ.

При совмещенном проведении наладочных и монтажных работ выполняют только те наладочные операции, которые не требуют подачи напряжения в монтируемые электрические

установки. При этом выполняют следующие наладочные операции:

проверка соответствия установленного электрооборудования проекту, его комплектность и исправность;

проверка монтажа вторичной коммутации и приводов согласно принципиальным и монтажным схемам в пределах отдельных панелей, пультов и распределительных устройств;

проверка и настройка реле на заданные уставки;

проверка заземляющих устройств.

Все выявленные дефекты и недоделки записывают в «Журнале регистрации дефектов проекта, монтажа и оборудования» (форма 2), который находится у руководителя наладочных работ.

Журнальные записи передают для ознакомления руководителю монтажных работ, который после устранения недоделок и дефектов делает в журнале соответствующую отметку.

б) К моменту полного окончания монтажа электроустановки до подачи напряжения по постоянной схеме должны быть устранены все выявленные в ходе наладки дефекты и недоделки монтажа и закончены следующие работы:

очищены и покрашены помещения и электрооборудование;

сделаны надписи на электрооборудовании в соответствии с проектом;

закончены ревизия и регулировка механической части электрооборудования (выключатели и разъединители с приводами, камеры КРУ, КТП и т. д.);

отревизованы и высушены электрические машины;

смонтированы источники оперативного тока;

заполнено трансформаторным маслом соответствующее электрооборудование (выключатели, трансформаторы и т. д.).

По требованию наладочной организации электромонтажная организация представляет для ознакомления необходимую документацию на скрытые работы, ревизию оборудования, сушку машин и аппаратов, анализ трансформаторного масла, устройство заземлителей и пр.

в) К моменту окончания наладочных работ по совмещенному графику с монтажными работами наладочной организацией должно быть выполнено следующее:

закончена проверка правильности выполнения монтажа первичных и вторичных цепей, а также коммутации между панелями и пультами;

проверены аппаратура, приборы, реле, сняты необходимые характеристики и выставлены уставки;

проведены испытания повышенным напряжением изоляции кабелей, распределительных устройств и другого оборудования;

подано напряжение на шинки и цепи управления, защиты, автоматики и сигнализации;

проверено функционирование отдельных элементов схем, узлов и схем в целом;

для объектов электроснабжения проведена проверка релейной защиты первичным током;

подготовлена документация (протоколы испытания и наладки), дающая основание для подачи напряжения по постоянной схеме.

г) С момента подачи напряжения в оперативные и силовые цепи по постоянной схеме на электроустановке вводится эксплуатационный режим.

Заказчик обязан оповестить все строительные и монтажные организации, относящиеся к данному объекту, о подаче напряжения на вводимую в эксплуатацию электроустановку. После введения эксплуатационного режима обслуживание электроустановки, механизмов и обеспечение техники безопасности осуществляются эксплуатационным персоналом. Допуск к производству наладочных работ производится службой эксплуатации в соответствии с действующими правилами техники безопасности.

К временной эксплуатации установок наладчики не допускаются.

Все работы по опробованию и прокрутке механизмов должны производиться по программе, согласованной со всеми смежными строительно-монтажными организациями, а также со службой эксплуатации и технологами производства.

д) После введения эксплуатационного режима наладочной организацией должно быть выполнено следующее:

опробование электроприводов на ручном (местном) управлении;

комплексное опробование узлов и технологических линий без нагрузки с имитацией возможных режимов для опробования защит, блокировок и сигнализации;

регулировка и настройка электрооборудования вхолостую и под нагрузкой в соответствии с заданными проектом технологическими режимами;

приборы и датчики КИП должны быть включены в схему и опробованы в автоматическом режиме;

снятие основных характеристик работы электроприводов (диапазон регулирования, быстродействие, устойчивость режимов и пр.);

комплексные испытания отдельных механизмов и групп механизмов, входящих в производственный комплекс, связанный общей технологией, для получения выпускаемой продукции;

при необходимости проведение осциллографирования процессов в электрических цепях и снятие векторных диаграмм;

обработка отчетной документации (протоколы испытаний и наладки и корректировка принципиальных схем).

е) Во время опытно-промышленной эксплуатации на сложных объектах производится режимная наладка, обеспечивающая получение заданных параметров по производительности, надежности и режимам работы.

Режимная наладка производится по поручению заказчика специальной группой наладочной организации с привлечением в случае необходимости представителей проектных организаций. Длительность опытно-промышленной эксплуатации должна быть не менее 1 мес, если в техническом или рабочем проекте нет специального определения.

Опытно-промышленная эксплуатация производится по программе, составляемой заказ-

чиком, согласованной с наладочными и монтажными организациями. По окончании опытно-промышленной эксплуатации производится сдача объекта в промышленную эксплуатацию. Приемо-сдаточные испытания оформляются актом специальной комиссии, организуемой заказчиком.

2-6. СДАЧА — ПРИЕМКА ВЫПОЛНЕННЫХ НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

1. Окончание наладочных работ на объекте оформляется специальным актом с передачей заказчику отчетной документации. Отчетной документацией являются протоколы на проведенные проверки и испытания, а также исполнительные принципиальные схемы. Отчетная документация передается заказчику в одном экземпляре.

2. Для крупных или сложных в техническом отношении объектов должен быть составлен технический отчет, содержащий материалы, характеризующие технологические и электрические параметры объекта, методику выполнения наладочных работ и достигнутые окончательные результаты.

Рекомендуемый объем сдаточной документации по наладочным работам включает следующие протоколы:

проверки и наладки схем управления, защиты, сигнализации и автоматики;

испытаний и опробования оборудования высокого напряжения;

испытаний и проверки машин, трансформаторов, электродвигателей и преобразователей;

проверки заземляющих устройств;

проверки сопротивления изоляции, а также испытаний изоляции оборудования высокого напряжения и кабельных линий на электрическую прочность.

2-7. УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Требования к наладочному персоналу. Каждый работник, принимающий непосредственное участие в наладочных, экспериментальных и лабораторных работах по электрооборудованию, обязан:

пройти медицинское освидетельствование;

пройти проверку знаний и получить квалификационную группу по технике безопасности;

получить вводный инструктаж и инструктаж на рабочем месте по технике безопасности;

изучить правила, действующие на объекте, касающиеся мер индивидуальной защиты и личной гигиены;

освоить методику проведения соответствующих работ с учетом требований правил техники безопасности по наладке электрооборудования.

Лица, не достигшие 18-летнего возраста, не могут быть допущены к наладочным работам в электроустановках.

Персонал пусконаладочных организаций, не имеющих практического опыта работы, наряду с обучением по технике безопасности обязан пройти стажировку в течение 3—12 смен. После окончания срока стажировки производится проверка знаний правил техники безопасности.

Периодичность прохождения медицинского осмотра 1 раз в 2 года.

Повторная проверка знаний правил техники безопасности проводится 1 раз в год, а также после каждого случая нарушения правил.

Проверка знаний наладчиков по правилам безопасности производится комиссиями, назначаемыми приказами или распоряжениями по организации. В состав комиссии входят: главный инженер или его заместитель (председатель), инженер по технике безопасности, представитель профсоюзной организации. Председателем проверочной комиссии может быть также руководитель наладочного участка по поручению руководства.

Не допускается проведение экзаменов квалификационной комиссией в составе менее 3 чел.

Изучение правил и инструкций по технике безопасности проводится персоналом наладчиков самостоятельно. Все работники должны быть обучены мерам оказания первой помощи при несчастных случаях. Для этого инженер по технике безопасности организует краткосрочные семинары под руководством врача.

Персонал наладчиков, выполняющий наладочные работы в электроустановках, должен:

знать «Правила техники безопасности при электромонтажных и наладочных работах», «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и гл. IV СНиП III-4-80 «Техника безопасности в строительстве» в объеме, соответствующем квалификационной группе по технике безопасности;

иметь отчетливое представление об опасностях, возникающих при работе в электроустановках, и мерах предупреждения несчастных случаев от поражения электрическим током;

уметь практически оказать первую помощь пострадавшему в случаях поражения электрическим током или другой производственной травмы, знать и уметь практически применять приемы искусственного дыхания.

Общие правила безопасности при выполнении наладочных работ. Наладочные работы, связанные с подачей напряжения, должны производиться не менее чем двумя лицами, одно из которых с квалификационной группой не ниже IV при работе в электроустановках выше 1000 В и не ниже III — при работе в электроустановках до 1000 В.

Руководитель наладочных работ (старший прораб, прораб, старший инженер) перед началом наладочных работ на объекте обязан:

проверить выполнение заказчиком технических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасное ведение наладочных работ;

ознакомиться сам и ознакомить наладчиков с правилами внутреннего распорядка на объекте и организовать общий инструктаж со стороны ответственного представителя заказчика;

Форма 4

(лицевая сторона)

Министерство _____

Главное управление _____

Трест _____

Управление _____

Участок _____

ЖУРНАЛ
регистрации инструктажа по технике безопасности на рабочем месте

Начат «_____»_____19 г.

Окончен «_____»_____19 г.

№ п/п	Монтажный объект	Фамилия, имя, отчество инструктируемого	Специальность Дата и разряд

(правая сторона)

Содержание производственного инструктажа	Подпись получившего инструктаж	Подпись и должность производившего инструктаж

(последняя страница)

В журнале_____ листов
пронумеровано и скреплено печатью

Главный инженер_____
(подпись)

проверить срок удостоверения у каждого наладчика и при выдаче задания учитывать квалификационную группу исполнителя работ;

провести инструктаж по технике безопасности на рабочем месте всего персонала, работающего под его руководством; проверить состояние защитных средств, которые будут применяться в процессе работы; выполнить необходимые мероприятия по технике безопасности на рабочих местах. В процессе работ осуществлять трехступенчатый контроль за соблюдением правил техники безопасности.

Особо следует обратить внимание наладчиков на следующие указания действующих правил техники безопасности:

запрещается для сборки схем применять столы с металлической рабочей поверхностью или с металлическим обрамлением, а также пользоваться металлическими подставками и лестницами;

каждый наладчик обязан знать схему временного и постоянного электропитания участка производства наладочных работ и места отключения напряжения;

при перерыве или окончании наладочных работ линия временного питания должна быть отключена;

металлические корпуса переносных приборов, аппаратов должны быть заземлены;

перед подачей оперативного тока для наладки и опробования схем, управление которыми производится из нескольких мест, должна быть устранена возможность управления с других мест, кроме одного;

выводы силовых и измерительных трансформаторов на все время работ (за исключением времени, необходимого для измерения и испытаний) должны быть закорочены и надежно заземлены;

предохранители в цепях трансформаторов напряжения и силовых трансформаторов на время наладочных работ должны быть сняты и храниться у наладчиков до включения установки на рабочее напряжение;

запрещается включать прибор последовательно в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, находящегося в работе, не замкнув обмотку накоротко при помощи токовых зажимов; неиспользованные вторичные обмотки трансформаторов тока должны быть надежно закорочены и заземлены;

все работы, в том числе и работы, связанные с измерениями переносными приборами в установках, где введен эксплуатационный режим, производят по наряду двумя наладчиками, один из которых должен иметь квалификационную группу V по технике безопасности,

а другой — не ниже группы III при напряжении выше 1000 В. При этом оформляется соответствующая запись в «Журнале регистрации инструктажа по технике безопасности» (форма 4).

Ответственность за технику безопасности при совмещенном производстве наладочных и монтажных работ. Совмещенные монтажные и наладочные работы разрешаются в том случае, когда исключается опасность поражения электрическим током монтажного и наладочного персонала. Ответственность за общие мероприятия по технике безопасности несет руководитель монтажных работ. Ответственность за безопасное производство пусконаладочных работ, точное выполнение всех мер безопасности несет руководитель наладочных работ.

Исполнители-наладчики отвечают за соблюдение ими действующих правил техники безопасности и инструкций, за достаточность и полноту принятых на рабочем месте и в рабочей зоне мероприятий, обеспечивающих собственную безопасность и безопасность окружающих лиц.

При работах на действующих установках с частичным или полным снятием напряжения ответственность за выполнение требований безопасности работ несет служба эксплуатации заказчика.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ

А. ИЗМЕРЕНИЕ ТИПОВЫХ ВЕЛИЧИН И РЕГИСТРАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Общие указания. Перед проведением измерений, связанных с наладкой или испытанием устройств, должен быть выполнен комплекс подготовительных мероприятий:

тщательный осмотр испытываемого объекта с целью выявления и устранения дефектов;

изучение электрической схемы и установление норм испытательных напряжений и токов;

составление схемы измерения с указанием необходимых приборов, их класса, предела измерения, допустимого сопротивления изоляции и т. п.;

обеспечение необходимых условий при измерении (температура, влажность, чистота поверхности, освещение и т. п.) и безопасного производства работ;

подготовка рабочего места и необходимого оборудования в соответствии со схемой измерения.

При производстве измерений высокого напряжения особое внимание необходимо уделить качеству подсоединения оборудования к контуру заземления, проверив его визуально или с помощью омметра.

Все работы следует проводить, строго соблюдая правила техники безопасности.

Выбор приборов. Измерительные приборы в зависимости от их назначения, области применения и условий работы должны выбираться по следующим основным принципам:

1) должна существовать возможность измерения исследуемой физической величины;

2) пределы измерения прибора должны охватывать все возможные значения измеряемой величины. При большом диапазоне изменений последней целесообразно использовать многопредельные приборы;

3) прибор должен обеспечивать требуемую точность измерений. Поэтому следует обратить внимание не только на класс выбираемого прибора, но и на факторы, влияющие на дополнительную погрешность измерений: несинусоидальность токов и напряжений, отклонение положения прибора при установке его в положение, отличное от нормального, влияние внешних магнитных и электрических полей и т. п.;

4) при проведении некоторых измерений важную роль играют экономичность (потребление) измерительного прибора, его масса, габариты, расположение органов управления, равномерность шкалы, возможность считывания показаний непосредственно по шкале, быстродействие и пр.;

5) подключение прибора не должно существенно влиять на работу исследуемого устройства, поэтому при выборе приборов следует учитывать их внутреннее сопротивление. При включении измерительного прибора в согласованные цепи входные или выходные сопротивления должны быть требуемого номинального значения;

6) прибор должен удовлетворять общим техническим требованиям техники безопасности при производстве измерений, устанавливаемым ГОСТ 22261-76, а также техническим условиям или частным стандартам;

7) не допускается использовать приборы: с явными дефектами измерительной системы, корпуса и т. д.; с истекшим сроком поверки; нестандартные или не аттестованные ведомственной метрологической службой; не соответствующие по классу изоляции напряжениям, на которые подключается прибор.

Определение погрешности измерения. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называют погрешностью измерения.

Погрешность, свойственная средству измерения, находящемуся в нормальных условиях применения (ГОСТ 22261-76), является основной. При отклонении одной из влияющих величин за пределы, установленные для нормального значения или области нормальных значений, появляются дополнительные погрешности. Пределы допустимых основной и дополнительной погрешностей средств измерений устанавливаются в виде абсолютных, приведенных, относительных погрешностей или в виде определенного числа делений.

Абсолютная погрешность измерения Δ выражается в единицах измеряемой величины и определяется как разность между измеренным $X_{изм}$ и истинным значениями измеряемой величины X, т. е. $\Delta = X_{изм} - X$.

В связи с тем, что истинное значение из-

меряемой величины неизвестно, на практике пользуются действительным значением величины, найденным экспериментальным путем и максимально приближающимся к истинному значению.

Наиболее полно качество измерения характеризуется относительной погрешностью измерения δ, равной отношению абсолютной погрешности измерения к истинному (действительному) значению измеряемой величины,

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X}.$$

Обычно относительная погрешность, %,

$$\delta\% = \pm \frac{100\Delta}{X}.$$

Для сравнительной оценки точности стрелочных приборов пользуются понятием приведенной погрешности прибора γ, % — отношение абсолютной погрешности к предельному значению шкалы X_N

$$\gamma = \pm \frac{100\Delta}{X_N}.$$

Величина X_N принимается равной: конечному значению шкалы — для приборов с односторонней шкалой; сумме конечных значений шкалы прибора — для приборов с двусторонней шкалой; разности конечного и начального значений диапазона — для приборов с безнулевой шкалой; длине шкалы, если шкала имеет резко сужающиеся деления.

Средствам измерения, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в виде относительных или приведенных погрешностей, согласно ГОСТ 13600-68 присваивают классы точности, выбираемые из ряда чисел (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6) 10^n, где $n = 1; 0; -1; -2$. Число 3 применять не рекомендуется.

Для стрелочных приборов класс точности определяет максимально допустимое значение основной приведенной погрешности измерения. Зная класс точности прибора, можно определить предел относительной погрешности измерения

$$\delta = \gamma \frac{X_N}{X}.$$

Часто значение искомой величины A определяют косвенно по результатам нескольких измерений, связанных с искомой величиной известными зависимостями. В этом случае относительная погрешность определяется следующим образом:

1) если значение искомой величины определяется как сумма или разность нескольких однородных величин, то максимально возможная относительная погрешность измерения

$$\delta_A = (|B\delta_B| + |C\delta_C| + |D\delta_D| + \cdots)/A,$$

где δ_B, δ_C, δ_D — относительные погрешности измерения величин B, C, D;

2) если искомая величина определяется как произведение нескольких измеренных величин

$$A = B^m C^n D^p \cdots,$$

где m, n, p — целые, дробные, положительные или отрицательные числа, то максимально возможная относительная погрешность измерения

$$\delta_A = |m\delta_B| + |n\delta_C| + |p\delta_D| + \cdots$$

3-2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Измерение постоянного тока и напряжения чаще всего производится щитовыми приборами магнитоэлектрической, а при измерении высоких напряжений — электростатической и ионной систем. Иногда применяют приборы электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем, они значительно уступают приборам магнитоэлектрической системы в отношении точности, чувствительности, потребляемой мощности, имеют неравномерную шкалу, чувствительны к воздействию внешних магнитных полей. Для проведения точных измерений все большее применение находят цифровые вольтметры, амперметры и комбинированные приборы, обладающие большим быстродействием и малой погрешностью измерения (0,01—0,1 %).

Простейшим способом измерения тока и напряжения является непосредственное включение приборов в цепь, возможное при выполнении условий:

1) максимальный предел измерения амперметра (вольтметра) не меньше максимального тока (напряжения) в цепи;

2) номинальное напряжение амперметра не менее номинального напряжения сети;

3) сопротивление амперметра R_a намного меньше, а сопротивление вольтметра намного больше сопротивления измеряемой цепи $R_н$; значительное сопротивление амперметра снижает ток в цепи при его включении на величину

$$\Delta I = \frac{U_c}{R_н} - \frac{U_c}{R_н + R_a};$$

4) соблюдение полярности включения приборов.

Для расширения пределов измерения приборов используют преобразователи в виде шунтов, добавочных сопротивлений, делителей напряжения, измерительных трансформаторов и измерительных усилителей. Шунт представляет собой сопротивление, включаемое параллельно измерительному прибору в цепь измеряемого тока. Шунты на токи до 50—100 А обычно устанавливают внутри прибора. Для больших токов применяют наружные шунты, имеющие токовые зажимы для включения в цепь измеряемого тока и потенциальные зажимы для подключения измерительного прибора. С целью унификации измерительных приборов шунты изготовляют по ГОСТ 8042-78. Класс точности шунтов 0,05—0,5.

Подключив к шунту милливольтметр с пределом измерения, соответствующим номинальному падению напряжения на шунте, получим соответствие полной шкалы прибора номинальному току шунта. Измеренный ток

$$I = I_н \frac{U}{U_н},$$

где $I_н$, $U_н$ — номинальные ток шунта и паде-

ние напряжения на шунте; U — показание милливольтметра.

Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с измерительным прибором включают добавочное сопротивление $R_д$.

Измеренное напряжение

$$U = U_в \left(\frac{R_д}{R_в} + 1\right) = U_в P,$$

где $P = R_д/R_в + 1$ — коэффициент расширения предела измерения прибора; $U_в$ — показание вольтметра; $R_в$ — входное сопротивление вольтметра.

Добавочные сопротивления могут быть как внутренние (помещенные в корпус прибора), так и наружные для измерения напряжений свыше 500 В.

Номинальные токи добавочных сопротивлений стандартизированы ГОСТ 8623-78 при номинальном падении напряжения на них. Основная погрешность добавочных сопротивлений $\pm(0{,}1 \div 0{,}5)$ %. Для расширения пределов измерения приборов с высоким входным сопротивлением используют делители напряжения с фиксированным коэффициентом деления, обычно кратным 10. В установках высокого напряжения электропередач постоянного тока и в сильноточных цепях могут быть использованы кроме указанных преобразователей измерительные трансформаторы постоянного тока.

Требуемый класс точности шунтов, добавочных сопротивлений и измерительных трансформаторов приведен в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Требуемые классы точности преобразователей

Класс точности прибора	Класс точности шунта или добавочного сопротивления	Класс измерительных трансформаторов
0,5	0,2	0,2
1,0	0,5	0,5
1,5	0,5	0,5
2,5	0,5	1,0

Измерение переменного напряжения и тока может производиться непосредственно измерительными приборами любого принципа действия, за исключением магнитоэлектрического. Магнитоэлектрические приборы могут быть использованы после преобразования переменного тока в постоянный. Приборы различного принципа действия имеют свои достоинства и недостатки: разные частотные и температурные диапазоны, разную чувствительность к помехам и механическим воздействиям и др.; знание этих параметров необходимо для правильного выбора измерительного прибора. Для расширения пределов измерения переменного напряжения вместо активных добавочных сопротивлений иногда применяют емкостные. Измеряемое напряжение U создает в конденсаторе ток $I = j\omega CU$, который может быть измерен амперметром электромагнитной системы. Однако при наличии высших гармоник нарушается прямая пропорциональность между током и напряжением, поэтому вместо добавочного конденсатора предпочитают емкостный делитель, а измерение производят электростатическим, ламповым или цифровым вольтметром.

При непосредственном включении измерительного прибора должны соблюдаться те же требования, что и при измерении постоянного тока и напряжения.

Для измерения больших переменных токов и напряжений часто используют измерительные трансформаторы тока и напряжения. Трансформаторы напряжения подключают параллельно измеряемой цепи, и работают они в режиме, близком к холостому ходу, трансформаторы тока включают последовательно в измерительную цепь, и работают они в режиме, близком к короткому замыканию. При измерении с помощью трансформаторов тока и напряжения должны быть выполнены следующие требования:

1) номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора тока (напряжения) должно быть не менее напряжения в измеряемой цепи;

2) номинальный ток $I_а$ (напряжение $U_в$) измерительного прибора должен быть не меньше номинального тока $I_{2н}$ (напряжения $U_{2н}$) вторичной обмотки трансформатора; обычно они совпадают.

Пересчетный коэффициент прибора

$$k_а = \frac{I_{1н} I_а}{I_{2н} N}; \quad k_в = \frac{U_{1н} U_в}{U_{2н} N} k,$$

где $I_{1н}$ ($U_{1н}$) — номинальный ток (напряжение) первичной обмотки трансформатора тока (напряжения); k — коэффициент схемы; N — максимальное показание по шкале прибора.

Для случаев $I_а = I_{2н}$ или $U_в = U_{2н}$

$$k_а = \frac{I_{1н}}{N}; \quad k_в = \frac{U_{1н}}{N} k.$$

Значения коэффициента схемы для различных схем присоединения измерительных приборов к трансформаторам напряжения приведены в табл. 3-2.

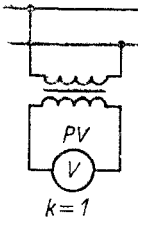
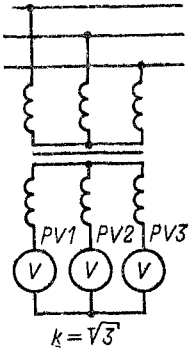
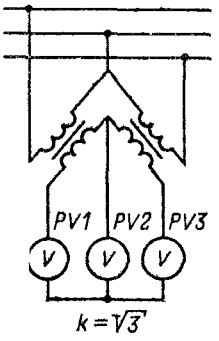
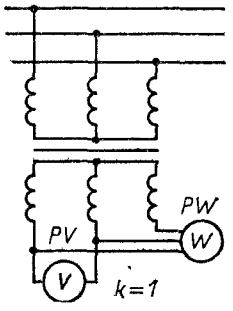
3) номинальная нагрузка трансформатора в принятом классе точности должна быть не менее нагрузки, подключаемой к трансформатору. Номинальное сопротивление нагрузки, для трансформатора тока наибольшее, а для трансформатора напряжения — наименьшее, указываются в паспорте на трансформатор и определяют то сопротивление, которое можно включить во вторичную обмотку трансформатора без увеличения погрешности выше допустимой.

4) при работе с фазочувствительными приборами необходимо следить за порядком включения обмоток трансформатора. Изменение порядка влечет за собой поворот соответствующего вектора на 180°.

Требуемый класс измерительного трансформатора в зависимости от класса точности измерительного прибора приведен в табл. 3-1.

Таблица 3-2

Значения коэффициента схемы

Схема включения			
			
		Фазы нагрузки симметричны	Неравномерное распределение нагрузки между фазами

3-3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Мощность в цепи постоянного и однофазного тока можно измерить косвенным методом при помощи вольтметра и амперметра или непосредственно электродинамическим ваттметром. Измерение мощности косвенным путем производится по схемам рис. 3-1. Обеим схемам присуща методическая погрешность.

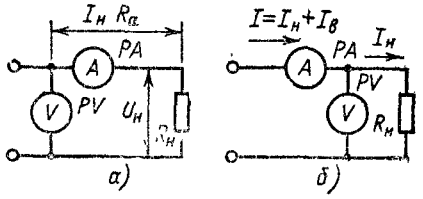


Рис. 3-1. Схемы измерения мощности методом амперметра-вольтметра.

а — вольтметр включен параллельно нагрузке; *б*—амперметр включен последовательно с нагрузкой.

В первой схеме вольтметр включен параллельно источнику питающего напряжения и показывает сумму напряжений на нагрузке и падения напряжения на амперметре.

Замеренная мощность

$$P = I_н (U_н + I_н R_а) = P_н + I_н^2 R_а,$$

где P, $I_н$, $U_н$ — мощность, ток и напряжение в нагрузке; $R_а$ — сопротивление амперметра; $I_н^2 R_а$ — ошибка в измерении мощности.

При измерении мощности по второй схеме также появляется ошибка в измерении, вызванная тем, что амперметр измеряет сумму токов через нагрузку и вольтметр. Замеренная мощность определяется по формуле

$$P = U_н (I_н + I_в) = P_н + \frac{U_н^2}{R_в} = P_н + P_в,$$

где $I_в$, $P_в$ — ток и мощность, потребляемая вольтметром; $R_в$ — входное сопротивление вольтметра; $P_в$ — ошибка измерения.

Аналогично методу амперметра и вольтметра включение ваттметра возможно двумя способами (рис. 3-2). Для правильного включения ваттметра один из каждой пары зажимов (последовательной и параллельной цепей)

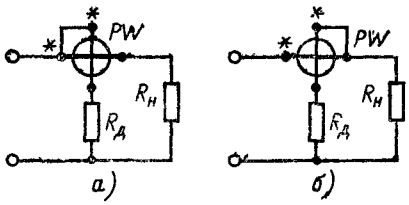


Рис. 3-2. Схемы измерения мощности ваттметром.

а — токовая обмотка включена последовательно с нагрузкой; *б* — обмотка напряжения включена параллельно нагрузке.

обозначают звездочками и называют генераторным зажимом. Генераторные зажимы подключают к одному полюсу источника. Обе схемы дают погрешности, обусловленные теми же причинами, что и в соответствующих схемах на рис. 3-1.

Электродинамические ваттметры с несколькими пределами измерения по току и напряжению имеют неименованную шкалу. В этом случае показание прибора умножают на постоянную прибора C, Вт/дел.

$$C = \frac{U_{ном} I_{ном}}{\alpha_m},$$

где $U_{ном}$, $I_{ном}$ — номинальные значения напряжения и тока для предела, на котором производится измерение; α_m — число делений шкалы.

Мощность однофазного тока можно также измерить косвенным методом по схемам (рис. 3-3) или ваттметрами электродинамической, ферродинамической и, редко, индукционной систем.

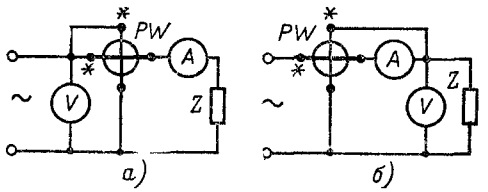


Рис. 3-3. Схемы измерения мощности однофазного переменного тока.

а—амперметр включен последовательно с нагрузкой; *б* — вольтметр включен параллельно с нагрузкой.

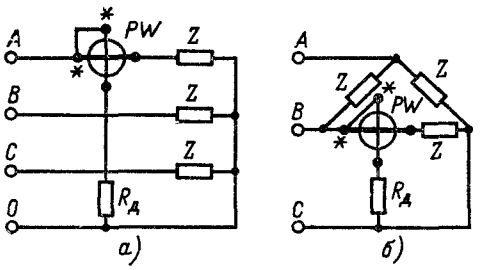


Рис. 3-4. Схемы измерения мощности трехфазного переменного тока при соединении нагрузок.

а — по схеме звезды с доступной нулевой точкой; *б* — по схеме треугольника с помощью одного ваттметра.

Если нужно знать активную и реактивную мощности, необходимо определить угол φ между током и напряжением с помощью фазометра либо воспользоваться схемой на рис. 3-3. По показаниям вольтметра и амперметра рассчитывают полную мощность $S = UI$; ваттметр измеряет активную мощность $P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi$, откуда $\cos\varphi = P/S$ и $\varphi = \arccos P/S$.

Реактивная мощность $Q = UI\sin\varphi$.

Методические погрешности при этих измерениях такие же, как и в схеме на рис. 3-1 и 3-2.

Реактивная мощность может быть замерена также реактивным ваттметром, применяемым, как правило, для лабораторных измерений.

Основные требования к ваттметрам устанавливает ГОСТ 8476-78.

Мощность в цепи трехфазного тока может быть измерена с помощью одного, двух и трех ваттметров.

Метод одного прибора применяют в трехфазной симметричной системе. Активная мощность всей системы равна утроенной мощности потребления по одной из фаз.

При соединении нагрузки звездой с доступной нулевой точкой или если при соединении нагрузки треугольником имеется возможность включить обмотку ваттметра последовательно с нагрузкой, можно использовать схемы включения, показанные на рис. 3-4. Если нагрузка соединена звездой с недоступной нулевой точкой или треугольником, то можно применить схему с искусственной нулевой точкой (рис. 3-5). В этом случае сопротивления должны быть равны $R_{вт}+R_a=R_b=R_c$.

Для измерения реактивной мощности токовые концы ваттметра включают в рассечку любой фазы, а концы обмотки напряжения — на две другие фазы (рис. 3-6). Полная реактивная мощность определяется умножением показания ваттметра на $\sqrt{3}$. (Даже при незначительной асимметрии фаз применение данного метода дает значительную погрешность)

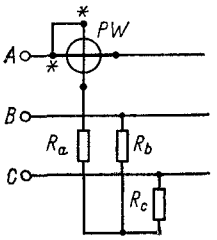


Рис 3-5. Схема измерения мощности трехфазного переменного тока одним ваттметром с искусственной нулевой точкой.

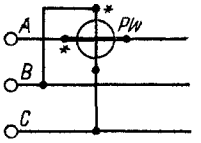


Рис. 3-6. Схема измерения реактивной мощности трехфазного переменного тока одним ваттметром.

Методом двух приборов можно пользоваться при симметричной и несимметричной нагрузке фаз. Три равноценных варианта включения ваттметров для измерения активной мощности показаны на рис. 3-7. Активная мощность определяется как сумма показаний ваттметров.

При измерении реактивной мощности можно применять схему рис. 3-8, *а* с искусственной нулевой точкой. Для создания нулевой точки необходимо выполнить условие равенства сопротивлений обмоток напряжений ваттметров и резистора R. Реактивная мощность вычисляется по формуле

$$Q = \sqrt{3}\,(P_1 - P_2),$$

где P_1 и P_2 — показания ваттметров.

По этой же формуле можно вычислить реактивную мощность при равномерной загрузке фаз и соединении ваттметров по схеме рис. 3-7. Достоинство этого способа в том, что по одной и той же схеме можно определить активную и реактивную мощности. При равномерной загрузке фаз реактивная мощность может быть измерена по схеме рис. 3-8, *б*. Значение мощности получается при умножении суммы показаний ваттметров на $\sqrt{3}/2$.

Метод трех приборов применяется при любой нагрузке фаз. Активная мощность может быть замерена по схеме рис. 3-9. Мощность всей цепи определяется суммированием показаний всех ваттметров.

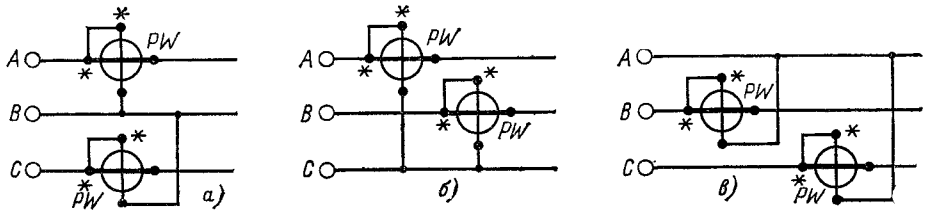


Рис. 3-7. Схемы измерения активной мощности трехфазного переменного тока двумя ваттметрами.

а — токовые обмотки включены в фазы *A* и *C*; *б* — в фазы *A* и *B*, *в* — в фазы *B* и *C*.

Реактивная мощность для трех- и четырехпроводной сети измеряется по схеме рис. 3-10 и вычисляется по формуле

$$Q = \frac{P_A + P_B + P_C}{\sqrt{3}},$$

где P_A, P_B, P_C — показания ваттметров, включенных в фазы *A*, *B*, *C*.

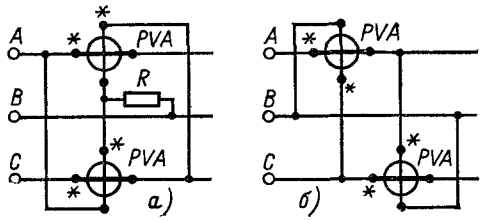


Рис. 3-8. Схемы измерения реактивной мощности трехфазного переменного тока двумя ваттметрами.

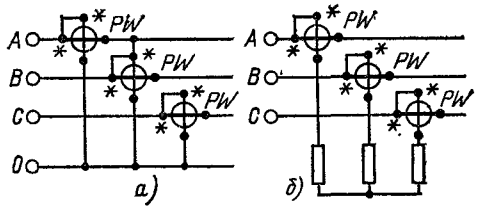


Рис. 3-9. Схемы измерения активной мощности трехфазного переменного тока тремя ваттметрами.

а — при наличии нулевого провода; *б* — с искусственной нулевой точкой.

На практике обычно применяют одно-, двух- и трехэлементные трехфазные ваттметры соответственно методу измерения.

Чтобы расширить предел измерения, можно применить все указанные схемы при подключении ваттметров через измерительные трансформаторы тока и напряжения. На рис. 3-11 в качестве примера показана схема измерения мощности по методу двух приборов при включении их через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

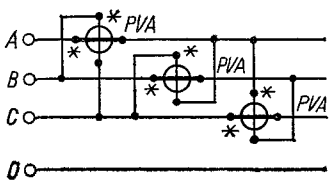


Рис. 3-10. Схемы измерения реактивной мощности тремя ваттметрами.

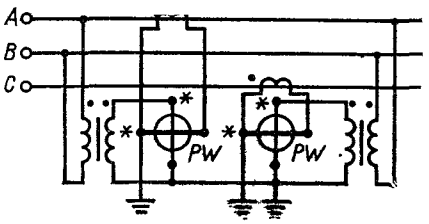


Рис. 3-11. Схемы включения ваттметров через измерительные трансформаторы.

3-4. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Выбор приборов. Для учета количества электричества и энергии в цепях постоянного тока изготовляют счетчики магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической и электролитической систем. Расход электроэнергии постоянного тока определяется из выражения $W = UIt$, поэтому при $U = \text{const}$ ($I = \text{const}$) достаточно учитывать ток (напряжение) и длительность его протекания. Эту задачу выполняют счетчики: миллиампер-часов — СМА, ампер-часов — СА и вольт-часов — СВ. Расход электроэнергии определяется после умножения показания счетчика на постоянное значение напряжения или тока.

В общем случае в цепи постоянного тока могут быть использованы счетчики типов СВТ, СКВТ, СМВТ — счетчики ватт-, киловатт- и мегаватт-часов. По ГОСТ 13600-68 счетчики изготовляют следующих классов точности: СМА, СА, СВ — 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; СВТ, СКВТ, СМВТ — 0,5; 1,0; 1,5; 2,5.

Все указанные типы счетчиков могут быть как непосредственного включения, так и с измерительными преобразователями. Счетчики,

предназначенные для включения через измерительные трансформаторы, имеют надпись ТПТ I_1/I_2 (I_1 — номинальный первичный ток, I_2 — вторичный ток).

Общие технические условия на счетчики постоянного тока устанавливаются ГОСТ 10287-75.

Учет активной и реактивной энергии в цепях переменного тока частотой от 40 до 60 Гц производится счетчиками индукционной системы, общие технические требования к которым установлены ГОСТ 6570-75. Индукционные счетчики выпускают в однофазном и трехфазном исполнении. Обозначение счетчиков для измерения активной энергии — СО, СОУ, СА3, СА4, СА3У, СА4У, реактивной энергии — СР4, СР4У. Обозначения расшифровываются: С — счетчик, О — однофазный, А — активной энергии, Р — реактивной энергии, У — универсальный, 3 или 4 — для трех- или четырехпроводной сети.

Универсальные счетчики типов СОУ, СА3У, СА4У выполняют для включения только с измерительными трансформаторами. Счетчики остальных типов выпускают как для непосредственного включения, так и для включения через измерительные трансформаторы.

Счетчики активной энергии имеют классы точности: 0,5; 1,0; 2,0 и 2,5, а реактивной — 1,5; 2,0 и 3,0. Класс точности счетчиков для включения через измерительные трансформаторы не ниже 2,0.

Погрешности измерений электроэнергии, требования к измерительным трансформаторам. Выбор класса точности счетчиков зависит от назначения, способа включения и вида измеряемой энергии (активная или реактивная).

По назначению счетчики можно разделить на следующие категории: расчетные и предназначенные для технического (контрольного) учета, а по способу включения — на счетчики непосредственного включения и включающиеся через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Класс точности счетчиков непосредственного включения должен быть при измерении активной энергии не ниже 2,5, а при измерении реактивной — не ниже 3,0. Для расчетных счетчиков, включенных через измерительные трансформаторы, класс точности при измерении активной и реактивной энергии должен быть не менее 2,0, соответственно для счетчиков технического учета — не ниже 2,0 и 2,5.

Измеряя большую мощность, рекомендуется применять расчетные счетчики активной мощности класса не ниже 1,0, реактивной — не ниже 1,5. При работе с расчетными счетчиками измерительные трансформаторы тока и напряжения должны иметь класс не ниже 0,5 (допускается использовать трансформаторы тока класса 1,0 при условии, что их действительная погрешность при нагрузке во вторичной цепи не более 0,4 Ом не превысит погрешности, допустимой для трансформаторов тока класса 0,5); для работы со счетчиками технического учета необходимо использовать трансформаторы класса не ниже 1,0. Нагрузка вторичных цепей измерительных трансформаторов не должна превышать номинальной для данного класса точности. Исходя из этого ориентировочно принимают сопротивление соединительных проводов, подводимых к вторичной цепи трансформатора, не более 0,2 Ом. Рассчитанные из этих соображений наименьшие допустимые сечения соединительных проводов приведены в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Наименьшие допустимые сечения проводов от трансформаторов тока к счетчикам

Длина провода в один конец, м	До 10	10—15	15—25	25—35	35—50
Наименьшее сечение медного провода, мм²	2,5	4	6	8	10

Счетчики непосредственного включения дают показания непосредственно в киловаттчасах или киловольт-ампер-часах реактивных.

Для счетчиков, включенных через измерительные трансформаторы тока и напряжения, и для универсальных трансформаторных счетчиков, предназначенных для включения через измерительные трансформаторы с любым коэффициентом трансформации, показания умножают на коэффициент $k=k_т k_н$, где $k_т$ и $k_н$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения.

Показания трансформаторных счетчиков, предназначенных для включения через измерительные трансформаторы с заданным коэффициентом трансформации, на коэффициент не умножают. Если такой счетчик включить через измерительные трансформаторы с коэффициентами трансформации $k'_т$ и $k'_н$, отличными от заданных, то его показания умножают на

$$k = \frac{k'_т k'_н}{k_т k_н}.$$

При включении счетчиков через трансформаторы тока категорически запрещается устанавливать предохранители во вторичной цепи трансформаторов. Корпуса, а также вторичные (одноименные) зажимы трансформаторов тока и напряжения рекомендуется заземлять.

Схемы включения счетчиков. Правила и схемы включения счетчиков учета активной и реактивной энергии аналогичны правилам и рассмотренным в § 3-3 вариантам схем включения ваттметров. Требуемая точность учета расхода электроэнергии будет обеспечена, если подобная схема подключения ваттметра обусловливает требуемую точность. С целью исключения ошибок учета, связанных с необходимостью пересчета показаний счетчика и введением коэффициентов, обусловленных схемой включения, рекомендуется использовать счетчики в строгом соответствии с их назначением и подключать их по схемам, предусмотренным для данного типа счетчика и изображенным на съемной крышке коробки зажимов счетчика. Зажимы, обозначенные буквами «Г» и «Н», означающие «генератор» и «нагрузка», аналогичны звездочкам у генераторных зажимов ваттметров.

Ниже приведено несколько вариантов схем включения счетчиков. На рис. 3-12 даны схемы включения однофазных счетчиков типов СО, СОУ. Двумя такими счетчиками, включенными по схеме, аналогичной рис. 3-7 или 3-8, можно измерить соответственно расход активной или реактивной энергии в сети трехфазного тока при симметричной или несим-

метричной нагрузке. С помощью схем на рис. 3-9 и 3-10 однофазными счетчиками можно измерить расход активной или реактивной энергии в трехфазной сети при любой асимметричной нагрузке.

При сложной асимметрии нагрузок фаз активная энергия в трех- и четырехпроводных сетях учитывается с помощью трехфазных че-

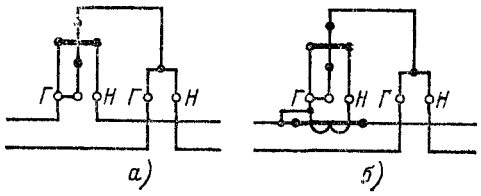


Рис. 3-12. Схемы включения однофазных счетчиков.

а — типа СО; *б* — типа СОУ.

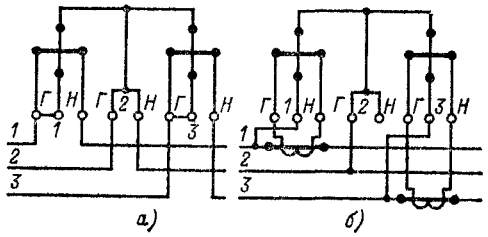


Рис. 3-13. Схемы включения трехфазных двухэлементных счетчиков активной энергии.

а — непосредственное СА3; *б* — трансформаторного СА3 и универсального СА3У с трансформаторами тока.

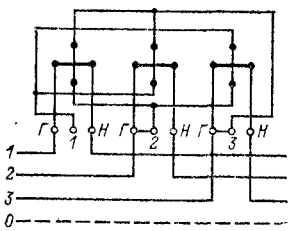


Рис. 3-14. Схема непосредственного включения трехфазного четырехпроводного трехэлементного счетчика реактивной энергии СР4 (*Г*, *Н*, *1*, *2* и *3* — обозначение зажимов).

тырехпроводных счетчиков типов СА4 и СА4У, которые имеют три измерительных элемента и учитывают расход электроэнергии пофазным суммированием. В трехфазных трехпроводных сетях учет выполняют трехфазными двухэлементными счетчиками типов СА3, СА3У, включенными по схеме двух ваттметров (рис. 3-13).

Учет реактивной энергии при сложной асимметрии нагрузок фаз выполняется трехэлементным счетчиком реактивной энергии типа СР4 (рис. 3-14).

3-5. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Электрическое сопротивление постоянному току. Выбор метода измерений зависит от ожидаемого значения измеряемого сопротивления и требуемой точности. Основными методами измерения сопротивлений постоянному току являются: косвенный, метод непосредственной оценки и мостовой.

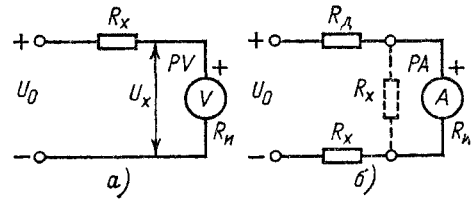


Рис. 3-15. Схемы пробников для измерения больших (*а*) и малых (*б*) сопротивлений.

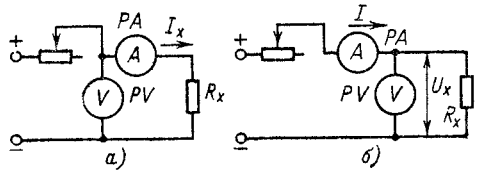


Рис. 3-16. Схемы измерения больших (*а*) и малых (*б*) сопротивлений методом амперметра — вольтметра.

В основных схемах косвенного метода применяют измерители напряжения и тока. На рис. 3-15, *а* представлена схема, пригодная для измерения сопротивлений одного порядка со входным сопротивлением $R_в$ вольтметра $R_и$. Измерив при короткозамкнутом R_x напряжение U_0, сопротивление R_x определяют по формуле

$$R_x = R_и (U_0/U_x - 1).$$

При измерении по схеме рис. 3-15, *б* резисторы большого сопротивления включают последовательно с измерителем, а малого — параллельно.

Для первого случая $R_x = (R_и + R_д)(I_и/I_x - 1)$, где $I_и$ — ток через измеритель при короткозамкнутом R_x; для второго случая

$$R_x = \frac{R_и R_д}{R_и + R_д}(I_и/I_x - 1),$$

где $I_и$ — ток через измеритель при отсутствии R_x; $R_д$ — добавочный резистор.

Более универсален метод амперметра — вольтметра, позволяющий измерять сопротивления при определенных режимах их работы, что важно при измерении нелинейных сопротивлений (см. рис. 3-16).

Для схемы рис. 3-16, *а*

$$R'_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U_x + U_а}{I_x} = R_x + R_а.$$

Относительная методическая погрешность измерения

$$\delta = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_a}{R_x}.$$

Для схемы рис. 3-16, *б*

$$R_x' = \frac{U_x}{I} = \frac{U_x}{I_x + I_в} = \frac{R_x}{1 + \dfrac{R_x}{R_в}}.$$

Относительная методическая погрешность измерения

$$\delta = -\frac{R_x}{R_в + R_x};$$

R_a и $R_в$ — сопротивления амперметра и вольтметра.

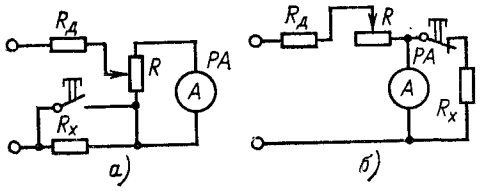


Рис. 3-17. Схемы омметров с последовательной (*а*) и параллельной (*б*) схемами измерения.

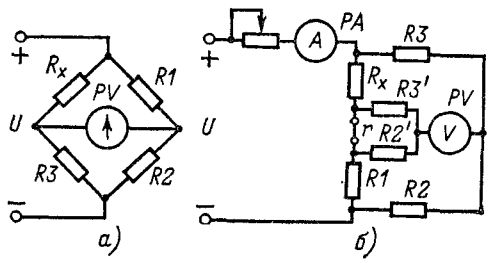


Рис. 3-18. Мостовые схемы измерения сопротивлений.

а — одинарный мост; *б* — двойной.

Из выражений для относительной погрешности видно, что схема на рис. 3-16, *а* обеспечивает меньшую погрешность при измерении больших сопротивлений, а схема на рис. 3-16, *б* — при измерении малых.

Погрешность измерения по методу амперметра-вольтметра рассчитывается по формуле

$$\delta_R = \gamma_в \frac{U_п}{U_x} + \gamma_а \frac{I_п}{I_x},$$

где $\gamma_в$, $\gamma_а$ — классы точности вольтметра и амперметра; $U_п$, $I_п$ — пределы измерений вольтметра и амперметра.

Непосредственное измерение сопротивлений постоянному току выполняется омметрами. Если значения сопротивлений более 1 Ом, применяют омметры с последовательной схемой измерения (рис. 3-17, *а*), а для измерения малых сопротивлений — с параллельной схемой (рис. 3-17, *б*). При пользовании омметром с целью компенсации изменения напряжения питания необходимо произвести установку стрелки прибора. Для последовательной схемы стрелка устанавливается на нуль при шунтированном измеряемом сопротивлении. (Шунтирование производится, как правило, специально предусмотренной в приборе кнопкой). Для параллельной схемы перед началом измерения стрелку устанавливают на отметку «∞».

Чтобы охватить диапазон малых и больших сопротивлений, строят омметры по параллельно-последовательной схеме. В этом случае имеются две шкалы отсчета R_x.

Наиболее высокая точность может быть достигнута при использовании мостового метода измерения. Средние сопротивления (10 Ом — 1 МОм) измеряют с помощью одинарного моста (рис. 3-18, *а*), а малые — с помощью двойного (рис. 3-18, *б*).

Измеряемое сопротивление R_x включают в одно из плеч моста, диагонали которого подключают соответственно к источнику питания

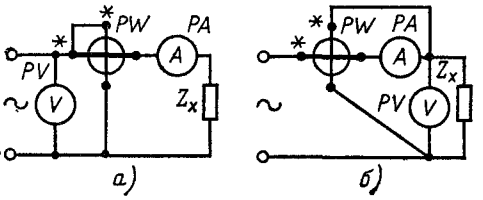


Рис. 3-19. Схемы измерения больших (*а*) и малых (*б*) сопротивлений переменному току.

и нуль-индикатору; в качестве последнего могут быть использованы гальванометр, микроамперметр с нулем посередине шкалы и др.

Условие равновесия обоих мостов определяется выражением

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}.$$

Плечи R_1 и R_3 обычно выполняют в виде магазинов сопротивлений (магазинный мост). С помощью R_3 устанавливают ряд значений отношений R_3/R_2, обычно кратных 10, а с помощью R_1 уравновешивают мост. Отсчет измеряемого сопротивления производится по значению, установленному ручками магазинов сопротивлений. Уравновешивание моста может также производиться плавным изменением отношения резисторов R_3/R_2, выполненных в виде реохорда, при определенном значении R_1 (линейный мост).

Для многократных измерений степени соответствия сопротивлений некоторому заданному значению $R_н$ применяют неуравновешенные мосты. Они уравновешиваются при $R_x = R_н$. По шкале индикатора можно определить отклонение R_x от $R_н$ в процентах.

На принципе самоуравновешивания работают автоматические мосты. Напряжение, возникающее при разбалансе на концах диагонали моста, после усиления воздействует на электродвигатель, перемещающий движок реохорда. При уравновешивании моста движок останавливается, а положение реохорда определяет значение измеряемого сопротивления.

Измерение сопротивления переменному току может быть произведено методом амперметра—вольтметра по схемам рис. 3-16. Если необходимо определить составляющие полного сопротивления, используют метод трех прибо-

ров: амперметра — вольтметра — ваттметра. Большие сопротивления измеряют по схеме рис. 3-19, *а*, малые сопротивления — по схеме на рис. 3-19, *б*. Значения полного сопротивления определяют по формулам

$$Z = \frac{U}{I}; \quad R = \frac{P}{I^2};$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{I^2},$$

где P, U, I — показания ваттметра, вольтметра и амперметра соответственно.

Точность указанных методов невелика; к ним прибегают при определении параметров нелинейных элементов, когда измерение производится в рабочих условиях.

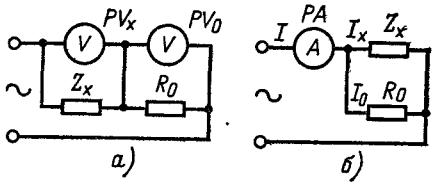


Рис. 3-20. Схемы измерения сопротивлений по методу сравнения.

а — последовательное соединение сравниваемых сопротивлений; *о* — параллельное.

Для измерения полного сопротивления и его составляющих можно использовать метод сравнения неизвестного сопротивления Z_x с известным активным сопротивлением R_0.

При последовательном соединении Z_x и R_0 (рис. 3-20, *а*) полное сопротивление и его составляющие определяют по формулам

$$Z_x = R_0 \frac{U_x}{U_0};$$

$$\cos\varphi = \left(U^2 - U_x^2 - U_0^2\right) / \left(2U_x U_0\right).$$

При параллельном соединении Z_x и R_0 (рис. 3-20, *б*)

$$Z_x = R_0 \frac{I_0}{I_x};$$

$$\cos\varphi = \left(I^2 - I_x^2 - I_0^2\right) / \left(2I_x I_0\right);$$

$$R_x = Z_x \cos\varphi; \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}.$$

Для измерения полного сопротивления, а также его активной и реактивной составляющих широко применяют разнообразные мосты переменного тока. Питание мостов осуществляют током той частоты, на которой требуется произвести измерения. Обычно активная и реактивная составляющие измеряемого сопротивления определяются отдельно по значениям регулируемых элементов.

3-6. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ

Приборы непосредственной оценки и сравнения. К приборам непосредственной оценки значения измеряемой емкости относятся микрофарадметры, действие которых базируется на зависимости тока или напряжения в цепи переменного тока от значения включенной в нее измеряемой емкости. Значение емкости определяют по шкале стрелочного измерителя.

Более широко для измерения параметров конденсаторов и индуктивностей применяют уравновешенные мосты переменного тока, позволяющие получить малую погрешность измерения (до 1 %). Питание моста осуществляется от генераторов, работающих на фиксированной частоте 400—1000 Гц. В качестве индикаторов применяют выпрямительные или электронные милливольтметры, а также осциллографические индикаторы.

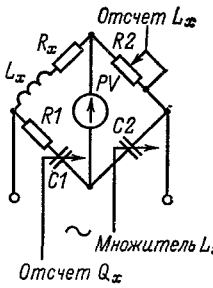


Рис. 3-21. Схема моста для измерения индуктивности.

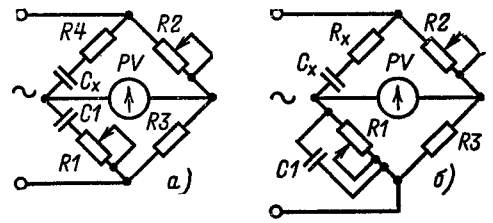


Рис. 3-22. Схема моста для измерения емкости с малыми (*а*) и большими (*б*) потерями.

Измерение производят балансированием моста в результате попеременной подстройки двух его плеч. Отсчет показаний берется по лимбам рукояток тех плеч, которыми сбалансирован мост. В качестве примера рассмотрим измерительные мосты, являющиеся основой измерителя индуктивности Е3-3 (рис. 3-21) и измерителя емкости Е8-3 (рис. 3-22).

При балансе моста (рис. 3-21) индуктивность катушки и ее добротность определяют по формулам

$$L_x = R_1 R_2 C_2; \quad Q_x = \omega R_1 C_1.$$

При балансе мостов (рис. 3-22) измеряемая емкость и сопротивление потерь определяют по формулам

$$C_x = C_1 \frac{R_3}{R_2}; \quad R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3}.$$

Для измерения малых емкостей (не более 0,01—0,05 мкФ) и высокочастотных катушек индуктивности в диапазоне их рабочих частот широко используют резонансные методы. Резонансная схема обычно включает в себя генератор высокой частоты, индуктивно или через емкость связанный с измерительным LC-контуром. В качестве индикаторов резо-

нанса применяют чувствительные высокочастотные приборы, реагирующие на ток или напряжение.

Методом амперметра — вольтметра измеряют сравнительно большие емкости и индуктивности при питании измерительной схемы от источника низкой частоты 50—1000 Гц. Для измерения можно воспользоваться схемами рис. 3-19.

По показаниям приборов полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2+X^2} = \frac{U}{I},$$

где $X_c = \frac{1}{2\pi f C_x}$; $X_L = 2\pi f L_x$; $R = \frac{P}{I^2}$;

из этих выражений можно определить

$$L_x = \frac{1}{2\pi f I^2}\sqrt{U^2 I^2 - P^2};$$

$$C_x = \frac{I^2}{2\pi f \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}.$$

Когда можно пренебречь активными потерями в конденсаторе или катушке индуктивности, используют схему рис. 3-16. В этом случае

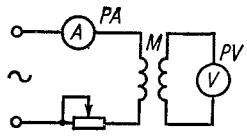


Рис. 3-23. Измерение взаимной индуктивности по методу амперметра — вольтметра.

$$Z \approx X = \frac{U}{I}; \quad L_x = \frac{U}{2\pi f I}; \quad C_x = \frac{I}{2\pi f U}.$$

Измерение взаимной индуктивности двух катушек можно произвести по методу амперметра — вольтметра (рис. 3-23) и методу последовательно соединенных катушек.

Значение взаимной индуктивности при измерении по методу амперметра — вольтметра

$$M = \frac{E}{I\omega},$$

где E — э. д. с., индуктируемая во вторичной катушке при токе I в первичной катушке. Для увеличения точности измерения сопротивление вольтметра должно быть возможно большим.

При измерении по второму методу замеряют индуктивности двух последовательно соединенных катушек при согласном L' и встречном L'' включении катушек. Взаимоиндуктивность вычисляется по формуле

$$M = \frac{L' - L''}{4}.$$

Измерение индуктивности может быть произведено одним из описанных ранее методов.

3-7. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Непосредственное измерение частоты производят частотомерами, в основу которых положены различные методы измерения в зависимости от диапазона измеряемых частот и требуемой точности измерения. Наиболее распространенными методами измерения частоты являются:

Метод перезаряда конденсатора за каждый период измеряемой частоты. Среднее значение тока перезаряда пропорционально частоте и измеряется магнитоэлектрическим амперметром, шкала которого проградуирована в единицах частоты. Выпускают конденсаторные частотомеры с пределом измерения 10 Гц—1 МГц и погрешностью измерения ±2 %.

Резонансный метод, основанный на явлении электрического резонанса в контуре с подстраиваемыми элементами в резонанс с измеряемой частотой. Измеряемая частота определяется по шкале механизма подстройки. Метод применяется на частотах более 50 кГц. Погрешность измерения можно уменьшить до сотых долей процента.

Метод дискретного счета лежит в основе работы электронно-счетных цифровых частотомеров. Он основан на счете импульсов измеряемой частоты за известный промежуток времени. Обеспечивает высокую точность измерения в любом диапазоне частот.

Метод сравнения измеряемой частоты с эталонной. Электрические колебания неизвестной и образцовой частот смешиваются таким образом, чтобы возникли биения некоторой частоты. При частоте биений, равной нулю, измеряемая частота равна образцовой. Смешение частот осуществляют гетеродинным способом (способ нулевых биений) или осциллографическим. При последнем способе применяют осциллограф с отключенным генератором внутренней развертки. Напряжение образцовой частоты подают на вход усилителя горизонтальной развертки, а напряжение неизвестной частоты — на вход усилителя вертикального отклонения. Изменяя образцовую частоту, получают неподвижную или медленно меняющуюся фигуру Лиссажу. Форма фигуры зависит от соотношения частот, амплитуд и фазового сдвига между напряжениями, подаваемыми на отклоняющие пластины осциллографа. Если мысленно пересечь фигуру по вертикали и горизонтали, то отношение числа пересечений по вертикали m к числу пересечений по горизонтали n равно при неподвижной фигуре отношению измеряемой f_x и образцовой $f_{обр}$ частот. При равенстве частот фигура представляет собой наклонную прямую, эллипс или окружность. Частота вращения фигуры будет точно соответствовать разности Δf между частотами f'_x и f_x, где $f'_x = f_{обр}\frac{m}{n}$ и, следовательно, $f_x = f_{обр}\frac{m}{n} + \Delta f$. Точность способа определяется в основном погрешностью задания образцовой частоты и определения величины Δf.

Другой способ измерения частоты методом сравнения — с использованием осциллографа, имеющего калиброванное значение длительности развертки либо встроенный генератор калиброванных меток. Зная длительность развертки осциллографа и подсчитав, сколько периодов измеряемой частоты укладывается

на выбранной длине центрального участка экрана осциллографа, имеющего наиболее линейную развертку, можно легко определить частоту. Если в осциллографе имеются калибрационные метки, то, зная временной интервал между метками и подсчитав их число на один или несколько периодов измеряемой частоты, определяют длительность периода.

3-8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ И СНЯТИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

Определение порядка следования фаз и снятия векторных диаграмм необходимы для проверки правильности выполнения схем: а) дифференциальных токовых защит (по взаимному расположению векторов тока); б) включения щитовых ваттметров, счетчиков электроэнергии, фазометров, реле сопротивления и др. (по взаимному расположению векторов напряжения и тока, подведенных к прибору или реле); в) токовой стабилизации автоматических регуляторов напряжения.

Определение порядка следования фаз производят обычно фазоуказателем индукционной системы типа И517М, представляющим собой асинхронный короткозамкнутый двигатель, вращение которого при подключении к зажимам питающей сети с нормальным чередованием фаз происходит по направлению указанной на нем стрелки или против — при обратном чередовании фаз.

Порядок следования фаз и углы фазового сдвига могут быть определены с помощью одного из следующих приборов: однофазного фазометра (например, Д578), вольтамперфазоиндикатора ВАФ-85М, однофазного ваттметра, электронного осциллографа.

При снятии векторных диаграмм в качестве «опорных векторов» обычно используют симметричную трехфазную систему фазных или линейных векторов напряжения, по отношению к которым строят векторы токов. Поэтому на первом этапе измерения необходимо проверить правильность чередования и симметрию фаз, измерить значения фазных (линейных) напряжений и в произвольном масштабе на миллиметровой бумаге под углом 120° (для симметричной системы) нанести векторы напряжения; измерить ток нагрузки, который для получения более точных результатов должен составлять не менее 20—30 % номинального. При измерении однофазным фазометром зажим обмотки напряжения фазометра, обозначенный звездочкой, подключают к фазе A, а другой — к нулевому проводу. Токовую обмотку фазометра подключают последовательно нагрузке зажимом, помеченным звездочкой, — к генератору или выводу трансформатора тока (при трансформаторной схеме включения). Замерив угол, откладывают его от вектора U_A и строят вектор тока I_A в принятом масштабе. Аналогично определяют векторы токов I_B и I_C (рис. 3-24, *а*). В случае использования линейных векторов напряжения в качестве опорных фазометр подключают на линейные напряжения. При измерении с помощью **вольтамперфазоиндикатора типа ВАФ-85М** в качестве опорного принят вектор линейного напряжения U_{AB}. Отсчет измеренных углов ведется от вектора U_{AB} по часовой стрелке при индуктивном характере нагрузки и против часовой — при емкостном (рис. 3-24, *б*). Угол определяют по лимбу, вращением которого стрелка показывающего прибора устанавливается на нуль. Угол установлен правильно, если при смещении лимба стрелка движется в ту же сторону, что и лимб; в противном случае угол будет отличаться от отсчитанного на 180°. Снятие тока производят без разрыва цепи токопровода с помощью токосъемной клещевой приставки.

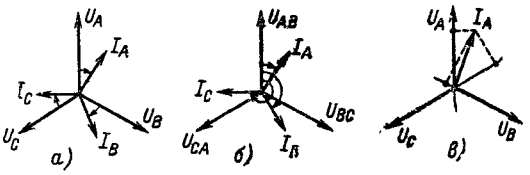


Рис. 3-24. Векторная диаграмма, построенная с помощью однофазного фазометра (*а*), прибора ВАФ-85М (*б*) и однофазного ваттметра (*в*).

При измерении **однофазным ваттметром** токовую обмотку включают последовательно и согласно с нагрузкой в цепь фазы A. Начало обмотки напряжения поочередно включают на фазные напряжения U_A, U_B и U_C (конец обмотки на нулевом проводе) и записывают показания ваттметра.

Если на векторах опорных напряжений отложить в выбранном масштабе измеренные мощности соответственно включению обмотки напряжения с учетом их знаков и восстановить из их концов перпендикуляры, то точка пересечения последних будет являться концом вектора фазы A (рис. 3-24, *в*). Аналогично определяют положение векторов токов фаз B и C.

При измерении с помощью **электронного осциллографа** фазовый сдвиг между током и напряжением можно определить методом *линейной развертки, сравнивая на экране осциллографа* кривую опорного напряжения и кривую тока, снимаемую с датчика тока (например, шунта). Совмещая линии их разверток при использовании двухлучевого осциллографа или засинхронизировав развертку по опорному напряжению — при использовании одно-лучевого осциллографа, можно рассчитать значение и знак фазового угла. Найденный угол сдвига откладывается от соответствующего опорного напряжения, и строится вектор тока.

3-9. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Нормы качества электроэнергии при нормальном режиме работы электрических сетей устанавливает ГОСТ 13109-67.

Допустимые значения показателей качества электрической энергии:

1) усредненные за 10 мин отклонения частоты от номинального значения $\pm 0{,}1$ Гц;

2) размах колебаний частоты не должен превышать 0,2 Гц;

3) отклонения напряжения: на зажимах приборов рабочего освещения от —2,5 до

+5 % номинального; на зажимах электродвигателей от —5 до +10 % номинального; у остальных приемников ±5 % номинального;

4) допустимые размахи изменений напряжения на зажимах ламп накаливания, выраженные в процентах, в зависимости от частоты или интервала между изменениями напряжения определяют по кривой, приведенной в ГОСТ 13109-67;

5) несинусоидальность формы кривой напряжения, при которой действующее значение всех высших гармоник не превышает 5 % действующего значения напряжения основной частоты.

Действующее значение напряжения гармоник определяют по формуле

$$U_{д} = \sqrt{\sum_{\gamma=3}^{\infty} U_{\gamma}^2},$$

где U_{γ} — действующее значение высшей гармоники γ-го порядка; $\gamma = 3, 5, 7 \ldots$ — номер гармоники (предполагается, что четные гармоники отсутствуют). Верхний предел суммирования может быть ограничен $\gamma = 13$;

6) напряжение обратной последовательности, которое характеризует несимметрию трехфазной системы напряжений, не должно превышать 2 % номинального напряжения

$$U_{-} = \frac{100}{\sqrt{3}\,U_{н}} \left| \dot{U}_A + \dot{a}^2 \dot{U}_B + \dot{a} U_C \right|,$$

где U_{-}—напряжение обратной последовательности; $U_{н}/\sqrt{3}$ — номинальное фазное напряжение; $\dot{a} = C^{j \cdot \frac{2}{3}\pi}$;

7) коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (выраженное в процентах отношение действующего значения всех гармонических составляющих выпрямленного напряжения к постепенной составляющей этого напряжения на зажимах электродвигателей постоянного тока) не должен превышать 8 %.

Рекомендуемые приборы и методы измерений. Частота является одним из основных показателей качества электроэнергии. Контроль частоты постоянно ведется на электростанциях и крупных подстанциях с использованием щитовых частотомеров. Колебания и отклонения частоты, возникающие в энергосистеме при аварийных ситуациях, фиксируются при помощи автоматически включающихся светолучевых осциллографов.

Для оценки отклонений напряжения в электросетях со стабильными нагрузками можно использовать обычные вольтметры электромагнитной системы. Наиболее удобно применять для этой цели цифровые регистрирующие вольтметры типа В2-9 и самопишущие приборы: многопредельный ампервольтметр Н390, электромагнитный вольтметр Э59/1. С помощью регистрирующих приборов можно проводить также статистический контроль отклонений напряжения.

Сократить объем вычислительной работы при определении статистических характеристик отклонений напряжения позволяют статистические анализаторы САКН-1, САКН-2, выпускаемые бывш. Рижским опытным заводом Латвэнерго. По показателям этого прибора можно построить гистограмму отклонений напряжения в контрольном пункте.

Для измерения колебаний напряжения применяется метод теневого осциллографирования. Суть его состоит в том, что исследуемое напряжение фильтруется при помощи *LC*-фильтра нижних частот, имеющего частоту среза 50 Гц, выпрямляется и подается через стабилитрон на гальванометр светолучевого осциллографа; скорость протяжки ленты выбирается в пределах 25—50 мм/с. При таком способе записи на осциллограмме регистрируется только изменяющаяся часть огибающей напряжения, так как ее постоянная часть ограничивается стабилитроном. Обработка осциллограмм, полученных способом теневого осциллографирования, ведется статистическими методами.

Для измерения и контроля несинусоидальности рекомендуется применять анализатор несинусоидальности АН, выпускаемый бывш. Рижским опытным заводом Латвэнерго. Прибор имеет два предела измерения коэффициента несинусоидальности 0—10 % и 0—50 %, погрешность измерения не более 2 %.

Если коэффициент несинусоидальности выше 5 %, необходимы дополнительные измерения для определения доминирующих гармонических составляющих. В случае спокойной нагрузки для этой цели применяется анализатор гармоник типа С5-3. Этот прибор позволяет последовательно измерять действующие значения напряжений гармонических составляющих.

При резкопеременной нагрузке используют другой способ, который состоит в осциллографировании напряжения при скорости движения ленты 2500—5000 мм/с, расшифровка осциллограммы состоит в разложении кривой напряжения в ряд Фурье одним из известных методов.

Для измерения и контроля несимметрии напряжений применяется анализатор несимметрии типа АНЕС (бывш. Рижский опытный завод Латвэнерго).

Если имеется необходимость, статистические характеристики несимметрии напряжений могут быть получены с помощью трех приборов САКН-1 или САКН-2.

При спокойном характере нагрузки несимметрия напряжений может быть определена по показаниям вольтметров, включенных на линейные или фазные напряжения сети.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения можно определить, измерив переменную и постоянную составляющие напряжения электронным цифровым вольтметром типов ВК7-10, В7-16.

3-10. ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Испытание полупроводниковых приборов (ПП) может производиться на одном из уровней: 1) оценка общей работоспособности; 2) определение основных параметров; 3) снятие основных характеристик.

В большинстве случаев наладки аппаратуры применим первый способ оценки неисправности ПП по принципу годен — негоден.

При измерении в схемах с ПП необходимо учитывать их чувствительность к температурным воздействиям и перегрузкам по токам и напряжениям, значительный разброс параметров и характеристик приборов одного типа и подверженность ПП старению. Основное требование к приборам для измерений в схемах с ПП — не вносить изменений в режимы работы ПП. Рекомендуется применять ламповые и цифровые приборы, а также авометры с высоким входным сопротивлением (около

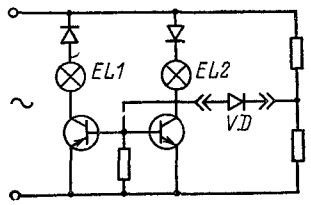


Рис. 3-25. Схема оценки работоспособности диодов.

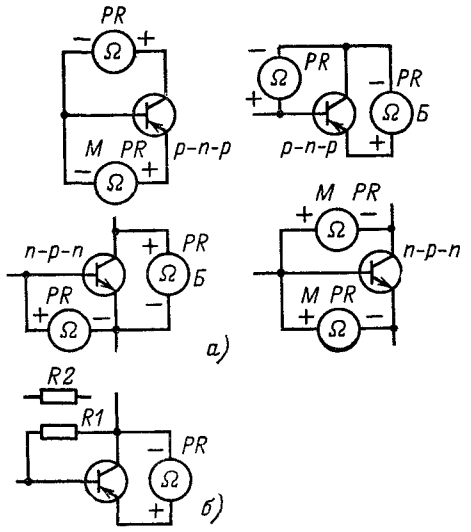


Рис. 3-26. Схемы оценки работоспособности транзисторов.

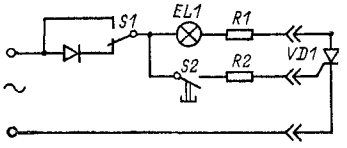


Рис. 3-27. Схема оценки работоспособности тиристоров.

20 кОм/В и более) и малым собственным потреблением. Класс применяемых приборов определяется требуемой точностью измерения, а диапазон рабочих частот прибора должен перекрывать частоты, возможные в исследуемой схеме. Испытание ПП следует производить при комнатной температуре не ранее чем через 10 с после подключения ПП к испытательной схеме. Ток и напряжение режима испытания не должны превышать максимально допустимых для испытываемого ПП.

Общая оценка работоспособности диодов может производиться многопредельным омметром. Начинать измерение необходимо на пределах измерения омметра, имеющих высокое сопротивление, так как есть опасность повреждения точечных диодов большим током омметра на пределах измерения с низким сопротивлением.

Простейшая схема прибора оценки работоспособности диодов приведена на рис. 3-25. Диод *VD* имеет обрыв — лампы *EL1* и *EL2* не горят. Диод *VD* пробит — обе лампы горят. При исправном диоде *VD* и установке его, как показано на схеме, горит лампа *EL1*.

Общая оценка работоспособности транзисторов может быть проведена с помощью многопредельного омметра с напряжением питания не более 1,5 В (рис. 3-26).

Начинать измерение необходимо с предела с высоким сопротивлением. С помощью схем рис. 3-26, *а* также можно выявить выводы и структуру транзистора.

Прямое сопротивление эмиттерного и коллекторного переходов у транзисторов малой мощности 50—100 Ом, средней и большой — 10—30 Ом (на рисунке обозначение *М*). Большое значение сопротивления прямого перехода свидетельствует об обрыве. Обратное сопротивление перехода у транзисторов малой мощности должно быть не менее десятков килоом, а у транзисторов средней и большой мощности — более 1 кОм (обозначение *Б*). Малое значение этого сопротивления — признак пробоя перехода.

Приближенную оценку статического коэффициента передачи тока можно производить по схеме рис. 3-26, *б*

$$B_{ст} \approx \frac{R_1 - R_2}{R_{кэ1} - R_{кэ2}},$$

где $R_{кэ1}$ и $R_{кэ2}$ — значения сопротивления перехода *К-Э* при сопротивлениях в цепи *Б—К*, соответственно R_1 и R_2.

Общая оценка работоспособности тиристоров может производиться с помощью простого устройства со световой индикацией (рис. 3-27). При нажатой кнопке *S2* и любом положении переключателя *S1* лампа *EL1* не должна светиться. Свечение лампы сигнализирует о пробое переходов. Из-за большого разброса напряжения включения разных типов тиристоров параметры приведенной схемы необходимо выбирать для каждого конкретного случая испытания.

При проверке интегральных микросхем (ИМС) невозможно измерить режимы работы отдельных их элементов, поэтому при испытании достаточно проверить работоспособность ИМС в целом Измерения в схемах с ИМС производятся так же, как и в схемах с полупроводниковыми элементами; на входе ИМС создают рабочие режимы и измеряют параметры микросхемы, подключенной, как правило, на эквивалентную нагрузку. Учитывая, что амплитуды сигналов ИМС лежат обычно в пределах ±10 В, а временные параметры могут меняться в пределах от десятых долей до десятков наносекунд, при выборе измерительной

ных приборов надо учитывать требования к чувствительности приборов в каждом конкретном случае.

Для проверки основных параметров ИМС существуют три метода испытаний: статический, динамический и стендовый.

Статические параметры измеряются на постоянном токе в установившемся режиме и характеризуются величинами: выходного и входного токов, высокого и низкого уровня напряжений, коэффициента усиления, устойчивости к влиянию статических помех и т. д.

Динамические параметры измеряются в импульсных режимах и характеризуются: временем включения, выключения, нарастания, распространения сигнала; входным и выходным сопротивлениями, помехоустойчивостью и др.

При стендовых испытаниях определяют работоспособность ИМС в рабочих условиях.

Для большинства случаев при настройке аппаратуры, выполненной на ИМС, нет необходимости в получении информации о точном значении рассматриваемого параметра; достаточно знать, что его значение находится в заданном диапазоне. Это положение относится прежде всего к цифровым ИМС.

В последнее время в ряде отечественных и зарубежных публикаций появились сведения о разработке различных устройств и комплектов, предназначенных для контроля состояния и динамики прохождения сигналов в аппаратуре, выполненной на цифровых ИМС. Как правило, это малогабаритные логические устройства типа логического пробника со световой индикацией или комплекты, содержащие логический пробник, датчик испытательных импульсов, компаратор цифровых сигналов и ряд других вспомогательных устройств различной сложности. Кроме малых габаритов эти устройства имеют еще ряд преимуществ:

1) наладчик оперативно получает безызбыточную информацию о функционировании устройств и прохождении сигналов;

2) питание устройств, как правило, осуществляется от источников напряжения настраиваемой аппаратуры. Это становится возможным из-за малого потребления энергии и однородности элементной базы устройств наладки и настраиваемой аппаратуры. При этом напряжение питания устройства наладки является безопасным для наладчика;

3) резко снижается влияние субъективного фактора при наладке, так как результаты измерения выражаются в бинарном или цифровом виде.

Наиболее полным комплектом устройств, предназначенных для наладки систем автоматики, выполненных на цифровых ИМС, является КН—ДИ, разработанный ЛенПЭО ВНИИпроектэлектромонтаж и предназначенный для работы с ИМС серий К133, К155.

В комплект входят следующие устройства: логический пробник, датчик импульсов, генератор нормированного числа импульсов, частотомер, логический компаратор и модуль питания (см. разд. 1).

Логический пробник П-1 является индикатором состояния логического сигнала: высокого (логическая «1»), низкого (логический «0») и неопределенного. Каждое состояние определяется пороговым напряжением. Уровню логический «0» соответствует отсутствие свечения индикатора, логический «1» — свечение индикатора, неопределенному уровню сигнала — изменение цвета свечения индикатора. Часто при настройке цифровых ИМС установления факта присутствия импульсной активности, как правило, уже достаточно, чтобы удостовериться в исправной работе ИМС. Особенностью пробника является то, что он имеет устройство для растяжения импульсов, позволяющее индицировать узкие (не менее 50 нс) импульсы.

Основой общего принципа испытания электронных схем являются стимуляция и контроль реакции ИМС. Для определения исправной работы ИМС необходимо на вход подать сигнал и наблюдать за реакцией. Решить эту задачу позволяет логический датчик импульсов Д-1, генерирующий разнополярные мощные — до 0,4 А при длительности 0,3 мкс — одиночные импульсы или их серию и подающий их в любую точку схемы.

Для проверки счетчиков, сумматоров, дешифраторов и других элементов вычислительной техники часто бывает необходимо подать на вход определенное число импульсов и по таблице истинности ИМС проконтролировать уровни выходных сигналов. Для этой цели может быть использован генератор нормированного числа импульсов ГНЧИ, позволяющий получать серию импульсов тока, число которых заранее программируется в пределах от 1 до 9999; частота прохождения импульсов плавно регулируется от 1 до 10 000 Гц. В генераторе предусмотрен режим непрерывной генерации импульсов с частотами, указанными ранее, а также возможность питания от внешнего источника тактовой частоты. В этих режимах генератор может быть использован как делитель тактовой частоты по синхронизирующему выходу с коэффициентом деления, определяемым заданным числом импульсов серии основного выхода генератора.

Частотомер Ч-1 является специализированным цифровым прибором, предназначенным для измерения параметров импульсных последовательностей. С его помощью можно производить измерения числа и длительности импульсов на уровне логической «1» или логического «0» и временны́х интервалов от 10^{-5} до 100 с, а также частоты периодической последовательности импульсов т 1 до 10^{6} Гц. Предусмотрен режим ручного и автоматического управления. Хотя испытание по методу стимуляции реакция является основой поиска неисправностей в электронных схемах, тем не менее цифровая природа сигналов испытываемой схемы позволяет осуществлять более быстрый способ проверки исправности работы ИМС. Этот способ основан на сравнении. Стимулируя эталонную ИМС теми же сигналами, что и испытуемую ИМС, и сравнивая их реакции, можно судить об исправности работы ИМС. Для этой цели служит логический компаратор К-1. Любая разница в реакции эталонной и испытуемой ИМС, выходящая из допустимого для ИМС допуска разброса параметров, указывается светодиодом. Компаратор позволяет обнаруживать статические (непрерывное свечение светодиода) и динамические порядка 200 нс отклонения параметров, на что указывает мигание светодиода.

Для подключения указанных приборов к источнику питания настраиваемого устройства или к отдельному источнику питания напряжением +5 В ±10% служит модуль питания И-1. Напряжение источника питания автоматически коммутируется для подключения его к приборам в заданной полярности. Модуль питания имеет защиту от перегрузок и попадания повышенного напряжения на его выход.

3-11. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Длительные интервалы времени (от десятков минут до нескольких часов) измеряют стационарными или наручными часами. Интервалы времени от нескольких секунд до нескольких десятков минут измеряют ручными пружинными хронометрами, например типов С1-2А, 51СД и т. п. Для измерения промежутков времени в пределах от 0,1 до 10 с в наладочной практике применяют электрические секундомеры типа ПВ-53Л с питанием от сети 110 или 220 В (50 Гц). Прибор имеет две шкалы. Цена деления малой шкалы 1 с, верхний предел 10 с. Цена деления большой шкалы 0,01 с, верхний предел 1 с. Погрешность измерения в диапазоне 0—3 с не более ±0,03 с, в диапазоне 3—10 с — не более ±0,05 с. Остановка секундомера производится отключением от сети или закорачиванием зажимов 0 и *.

Для измерения сотых и тысячных долей секунды применяют миллисекундомер типа ЭМС-54, имеющий пять пределов измерения времени: 0—25; 0—50; 0—100; 0—250; 0—500 мс. Питание миллисекундомера от сети 110, 127 или 220 В, 50 Гц.

Для измерения более коротких интервалов времени могут использоваться электронные частотомеры, например типа Ч3-33, Ч3-34, электронные осциллографы, имеющие калиброванную длительность горизонтальной развертки, или генератор калибрационных меток и светолучевые осциллографы (см. § 3-12). Подав на вход электронного осциллографа измеряемый сигнал, с помощью масштабной сетки определяют, какую часть известной длительности развертки занимает интересующий интервал, или при наличии калибрационных меток — сколько меток при известном периоде между ними уложится в интересующий отрезок времени. При использовании осциллографа, не имеющего калиброванной развертки и калибрационных меток, например С1-1, можно воспользоваться методом сравнения, подавая на вход осциллографа напряжение известной частоты (например, сети 50 Гц), а затем, не меняя положения ручек, исследуемый сигнал. Для измерения временных интервалов при использовании светолучевых осциллографов длительность интервала подсчитывается по осциллограмме по числу меток времени и их «цене», соответствующей скорости записи.

3-12. РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Применение электронно-лучевых осциллографов. Электронно-лучевой осциллограф является универсальным измерительным прибором широкого назначения, позволяющим визуально наблюдать и фиксировать случайные, одиночные непериодические и периодические электрические процессы в диапазоне частот от нуля (постоянный ток) до единиц гигагерц. Помимо качественной оценки исследуемых процессов осциллограф позволяет измерить:

амплитуду и мгновенное значение тока и напряжения;

временные параметры сигнала (скважность, частота, длительность фронта, фаза и т. д.);

сдвиг фаз;

частоту гармонических сигналов (метод фигур Лиссажу и круговой развертки), амплитудно-частотные и фазовые характеристики и т. д.

Осциллограф может быть использован как составная часть более сложной измерительной аппаратуры, например в мостовых схемах в качестве нуль-органа, в измерителях частотных характеристик и т. д.

Высокая чувствительность осциллографа определяет возможность исследования очень слабых сигналов, а большое входное сопротивление обусловливает его малое влияние на режимы исследуемых цепей. По назначению электронно-лучевые осциллографы подразделяют на универсальные и общего назначения (тип С1), скоростные и стробоскопические (тип С7), запоминающие (тип С8), специальные (тип С9), регистрирующие с записью на фотобумагу (тип Н). Все они могут быть одно-, двух- и многолучевыми.

Универсальные осциллографы обладают многофункциональностью за счет применения сменных блоков (например, предусилителей в С1-15). Полоса пропускания от 0 до сотен мегагерц, амплитуда исследуемого сигнала от десятков микровольт до сотен вольт. Осциллографы общего назначения применяют для исследования низкочастотных процессов, импульсных сигналов. Имеют полосу пропускания от 0 до десятков мегагерц, амплитуда исследуемого сигнала от единиц милливольт до сотен вольт. Наиболее широко применяемые осциллографы общего назначения и их технические характеристики приведены в разд. 1.

Скоростные осциллографы предназначены для регистрации однократных и повторяющихся импульсных сигналов в полосе частот порядка единиц гигагерц.

Стробоскопические осциллографы предназначены для исследования быстродействующих повторяющихся сигналов в полосе частот от нуля до единиц гигагерц при амплитуде исследуемого сигнала от единиц милливольт до единиц вольт.

Запоминающие осциллографы предназначены для регистрации однократных и редко повторяющихся сигналов. Полоса пропускания до 20 МГц при амплитуде исследуемого сигнала от десятков милливольт до сотен вольт. Время воспроизведения записанного изображения от 1 до 30 мин.

Для регистрации быстропротекающих и переходных процессов на фотобумаге применяют электронно-лучевые осциллографы с фотооптическим способом переноса луча на носитель записи, например НО23. Высокая скорость записи (до 2000 м/с) и большой диапазон регистрируемых частот (до сотен кило-

герц) позволяют применять эти осциллографы, если невозможно использование светолучевых, имеющих сравнительно небольшую скорость записи и диапазон регистрируемых частот. Основные технические характеристики осциллографов НО23 и НО63 приведены в разд. 1.

Применение светолучевых осциллографов. Для получения видимой записи быстропротекающих процессов наибольшее распространение получили светолучевые осциллографы с записью на специальной осциллографической фотобумаге, чувствительной к ультрафиолетовым лучам. В последнее время более широко начинают внедряться электрографичеекие светолучевые осциллографы с записью на дешевой электрографической бумаге. Основным достоинством светолучевых осциллографов является возможность получения видимой записи в прямоугольных координатах в большом динамическом диапазоне (до 50 дБ). Рабочая полоса частот светолучевых осциллографов не превышает 15 000 Гц. Предельная скорость записи у светолучевых осциллографов до 2000 м/с, у электрографических светолучевых осциллографов 6—50 м/с. Для одновременного наблюдения и регистрации нескольких электрических процессов осциллографы имеют несколько осциллографических гальванометров (обычно магнитоэлектрической системы), число которых может достигать 24 (в осциллографе НО43.2) и более.

Осциллографирование может производиться на фотобумагу УФ или фотоленту с химикофотографическим проявлением. Осциллографирование на бумагу УФ производится ртутной лампой с непосредственным проявлением на свету, что намного ускоряет процесс осциллографирования, и применяется в тех случаях, когда требуется получить, например, пробную осциллограмму. Недостаток фотобумаги УФ в том, что полученные на ней осциллограммы со временем теряют контрастность вследствие потемнения фона. Чувствительность фотобумаги и яркость освещения следует выбирать тем выше, чем больше скорость осциллографирования, и устанавливать снятием пробных осциллограмм.

Осциллографы обычно укомплектовывают гальванометрами с различными полосами рабочих частот. При использовании гальванометра, рабочая частота которого неизвестна, верхнюю границу частоты можно принять равной половине собственной частоты гальванометра. Собственная частота гальванометра указана на нем через тире после обозначения типа. Для ограничения рабочего тока гальванометра используют стандартные магазины шунтов и добавочных резисторов. Для случаев осциллографирования больших токов (более 6 А) или больших напряжений (более 600 В) обычно используют измерительные трансформаторы.

Чтобы получить наибольший размах луча на осциллограмме (70—80 % ширины применяемой бумаги), следует выбирать гальванометр, рабочий ток которого будет близок к максимальному.

Наиболее широко применяемые типы светолучевых осциллографов и их основные технические данные приведены в разд. 1.

Б. ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

3-13. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ МЕГАОММЕТРАМИ

Измерение сопротивления изоляции мегаомметрами может производиться непрерывно для сетей переменного трех- и однофазного тока и постоянного тока щитовыми приборами М143/2, М1503, М1603, М1604/1, М1508, М1608 и др., а также обесточенных электрических цепей переносными приборами, наиболее распространенные типы которых приведены в разд. 1.

Выбор типа мегаомметра производится в зависимости от номинального сопротивления объекта (силовые кабели 1—1000, коммутационная аппаратура 1000—5000, силовые трансформаторы 10—20 000, электрические машины 0,1—1000, фарфоровые изоляторы 100—10 000 МОм), его параметров и номинального напряжения. Как правило, для измерения сопротивления изоляции оборудования номинальным напряжением до 1000 В (цепи вторичной коммутации, двигатели и т. д.) используют мегаомметры на номинальное напряжение 100, 250, 500 и 1000 В, а в электрических установках с номинальным напряжением более 1000 В применяют мегаомметры на 1000 и 2500 В. Основная масса выпускаемых переносных мегаомметров — индукторного типа (М4100/1-5). Общими узлами индукторных мегаомметров являются генератор переменного тока, обычно с ручным приводом; выпрямитель и измерительный прибор логометрического типа.

Находят применение также электронные мегаомметры, например типов Ф2, Ф3 разработки Союзтехэнерго, имеющие источник стабилизированного напряжения и ламповый вольтметр, измеряющий падение напряжения на эталонном сопротивлении. В некоторых случаях при измерении сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции индукторные мегаомметры с ручным приводом не могут обеспечить требуемую точность отсчета. В этом случае применяют мегаомметры, имеющие источник стабилизированного напряжения, питаемый от сети 127/220 В, 50 Гц (М4101/1-5, Ф4100, Ф4101) или источника постоянного напряжения (Ф4101).

Для проведения измерений в полевых условиях и контроля исправности линейных подвесных и подстанционных штыревых фарфоровых изоляторов Союзтехэнерго разработана штанга-мегаомметр ШИ-1, представляющая собой мегаомметр, встроенный в изолирующую штангу и питающийся от шести элементов типа «Сатурн» или «Марс».

При проведении измерений мегаомметрами рекомендуется следующий порядок операций:

измерить сопротивление изоляции соединительных проводов, значение которого должно быть не меньше верхнего предела измерения мегаомметра;

установить предел измерения; если зна-

чение сопротивления изоляции неизвестно, то во избежание «зашкаливания» указателя измерителя необходимо начинать с наибольшего предела измерения; при выборе предела измерения следует руководствоваться тем, что точность будет наибольшей при отсчете показаний в рабочей части шкалы;

убедиться в отсутствии напряжения на проверяемом объекте;

отключить или закоротить все детали с пониженной изоляцией или пониженным испытательным напряжением, конденсаторы и полупроводниковые приборы;

на время подключения прибора заземлить испытуемую цепь;

нажав кнопку «высокое напряжение» в приборах, питающихся от сети, или вращая ручку генератора индукторного мегаомметра со скоростью примерно 120 об/мин, через 60 с после начала измерения зафиксировать значение сопротивления по шкале прибора; при измерении сопротивления изоляции объектов с большой емкостью отсчет показаний производить после полного успокоения стрелки;

после окончания измерения, особенно для оборудования с большой емкостью (например, кабели большой протяженности), прежде чем отсоединять концы прибора, необходимо снять накопленный заряд путем наложения заземления.

Когда результат измерения сопротивления изоляции может быть искажен поверхностными токами утечки, например за счет увлажненности поверхности изолирующих частей установки, на изоляцию объекта накладывают токоотводящий электрод, присоединяемый к зажиму мегаомметра *Э*.

Присоединение токоотводящего электрода *Э* определяется из условия создания наибольшей разности потенциалов между землей и местом присоединения экрана. В случае измерения изоляции кабеля, изолированного от земли, зажим *Э* присоединяется к броне кабеля; при измерении сопротивления изоляции между обмотками электрических машин зажим *Э* присоединяется к корпусу; при измерении сопротивления обмоток трансформатора зажим *Э* присоединяется под юбкой выходного изолятора.

Измерение сопротивления изоляции силовых и осветительных проводок производится при включенных выключателях, снятых плавких вставках, отключенных электроприемниках, приборах, аппаратах, вывернутых лампах.

Категорически запрещается измерять изоляцию на линии, если она хотя бы на небольшом участке проходит вблизи другой линии, находящейся под напряжением, и во время грозы на воздушных линиях передачи.

3-14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в электроизоляционном материале под воздействием на него электрического поля.

Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол δ, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 3-28). Этот угол называется углом диэлектрических потерь.

Для измерения емкости и угла диэлектрических потерь (или $\operatorname{tg}\delta$) эквивалентную схему конденсатора представляют как идеальный конденсатор с последовательно включенным активным сопротивлением (последовательная схема) или как идеальный конденсатор с параллельно включенным активным сопротивлением (параллельная схема).

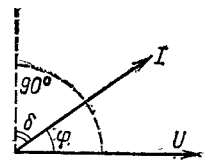


Рис. 3-28. Векторная диаграмма тока и напряжения в диэлектрике с потерями.

Для последовательной схемы активная мощность

$$P=\frac{U^2\omega C\operatorname{tg}\delta}{1+\operatorname{tg}^2\delta};\quad \operatorname{tg}\delta=\omega CR.$$

Для параллельной схемы

$$P=U^2\omega C\operatorname{tg}\delta;\quad \operatorname{tg}\delta=\frac{1}{\omega CR},$$

где C — емкость идеального конденсатора; R — активное сопротивление. Значение $\operatorname{tg}\delta$ обычно не превышает сотых или десятых долей единицы (поэтому $\operatorname{tg}\delta$ принято выражать в процентах), тогда $1+\operatorname{tg}^2\delta\approx 1$, а потери для *последовательной и параллельной* схем замещения $P=U^2\omega C\operatorname{tg}\delta$.

Значение потерь пропорционально квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте, что необходимо учитывать при выборе электроизоляционных материалов для аппаратуры высокого напряжения и высокочастотной.

С увеличением приложенного к диэлектрику напряжения до некоторого значения U_0 начинается ионизация имеющихся в диэлектрике газовых и жидкостных включений, при этом $\operatorname{tg}\delta$ начинает резко возрастать за счет дополнительных потерь, вызванных ионизацией. При U_1 газ ионизирован и $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается (рис. 3-29).

Значение $\operatorname{tg}\delta$ измеряют при напряжениях, меньших U_0 (обычно 3—10 кВ). Напряжение выбирается так, чтобы облегчить испытательное устройство при сохранении достаточной чувствительности прибора. Значение $\operatorname{tg}\delta$ нормируется для температуры 20 °С, поэтому измерение следует производить при температурах, близких к нормированной (10—20 °С). В этом диапазоне температур изменение диэлектрических потерь невелико, и для некоторых типов изоляции измеренное значение может без пересчета сравниваться с нормированным для 20 °С.

Для устранения влияния токов утечки и внешних электростатических полей на результаты измерения на испытуемом объекте и во-

круг измерительной схемы монтируют защитные приспособления в виде охранных колец и экранов. Наличие заземленных экранов вызывает появление паразитных емкостей; для компенсации их влияния обычно применяют метод защитного напряжения, регулируемого по значению и фазе.

Наибольшее распространение получили мостовые схемы измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. В настоящее время промышленность выпускает мосты пере-

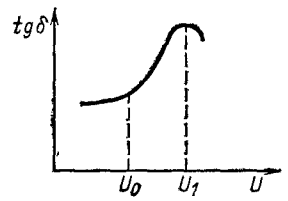


Рис. 3-29. Ионизационная кривая $\operatorname{tg}\delta = f(U)$.

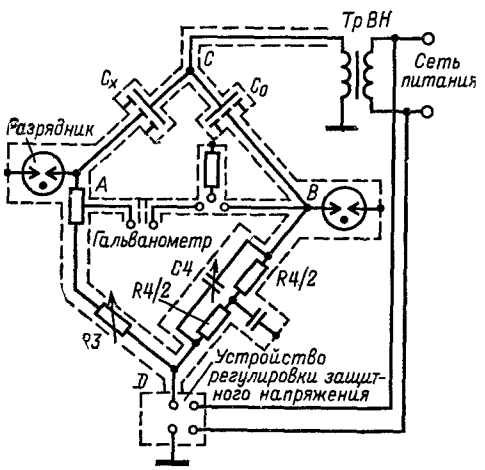


Рис. 3-30. Принципиальная схема моста Р525.

менного тока типов Р5026 и Р525; принципиальная схема моста Р525 приведена на рис. 3-30.

Уравновешивание моста производится путем многократного регулирования элементов схемы моста и защитного напряжения, для чего индикатор равновесия включается то в диагональ, то между экраном и диагональю. Мост считается уравновешенным, если при обоих включениях индикатора равновесия ток через него отсутствует.

В момент равновесия моста

$$\operatorname{tg}\delta = 2\pi f C_4 R_x;$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1+\operatorname{tg}^2\delta},$$

где f — частота переменного тока, питающего схему; так как обычно $\operatorname{tg}\delta \leqslant 0{,}1$, то $1+\operatorname{tg}^2\delta \approx \approx 1$ и, следовательно, $C_x = \frac{R_4}{R_x} C_0$. Постоянное сопротивление R_4 выбирается равным $10^4/\pi$ Ом. В этом случае $\operatorname{tg}\delta = C_4$, где емкость C_4 выражена в микрофарадах.

Если измерение производилось при частоте f', отличной от 50 Гц, то $\operatorname{tg}\delta = \frac{f'}{50} C_4$.

Когда измерение $\operatorname{tg}\delta$ производится на небольших отрезках кабеля или образцах изоляционных материалов, из-за их малой емкости необходимы электронные усилители (например, типа Ф-50-1 с коэффициентом усиления около 60). Следует иметь в виду, что мост учитывает потери в проводе, соединяющем мост с испытуемым объектом, и измеренное значение $\operatorname{tg}\delta$ будет больше действительного на $\Delta \operatorname{tg}\delta = 2\pi f R_z C_x$, где R_z — сопротивление провода.

Если один из электродов объекта соединен с землей (кабель с заземленной металлической оболочкой), то вторичную обмотку трансформатора высокого напряжения (*ТрВН*) не заземляют, а соединяют с точкой D (рис. 3-30) или измерение производят по схеме перевернутого моста (мосты типа Р5026), когда высокое напряжение подается к точке D, а к точке C подсоединяется заземленный электрод испытуемого объекта.

При измерениях по схеме перевернутого моста регулируемые элементы измерительной схемы находятся под высоким напряжением, поэтому регулирование элементов моста либо производят на расстоянии с помощью изолирующих штанг, либо оператора помещают в общем экране с измерительными элементами.

Тангенс угла диэлектрических потерь трансформаторов и электрических машин измеряют между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных обмотках.

3-15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЛАЖНЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Перед началом измерений необходимо принять меры к устранению причин, вносящих погрешности в измерения, т. е. поверхность изоляции, выводы и т. п. должны быть чистыми, сухими и при необходимости экранированными. При использовании для измерения установки высокого напряжения необходимо предварительно оценить сопротивление изоляции мегаомметром.

Метод емкость — частота основан на измерении емкости при двух частотах 2 и 50 Гц. Температура при измерении 10—20 °С. Степень увлажненности изоляции оценивается по соотношению

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1.$$

Для сухой изоляции значение соотношения не превышает 1,2—1,3.

Метод применяется в основном для испытания залитых маслом трансформаторов.

Измерения выполняют приборами ПКВ-7, ПКВ-8, ПКВ-13 между каждой обмоткой и корпусом при заземленных свободных обмотках.

Метод емкость—время основан на измерении прироста емкости ΔC по времени. По от-

ношению

$$\frac{\Delta C}{C_{t1}} = \frac{C_{t2} - C_{t1}}{C_{t1}}$$

можно судить о степени увлажненности изоляции.

Для измерения применяют приборы ЕВ-3, ПКВ-7, ПКВ-8. Прибор ЕВ-3 производит измерения на частоте 0,25 Гц в диапазоне емкостей 200—20 000 пФ.

Метод емкость—температура основан на изменении емкости увлажненной изоляции в интервале температур 20—80 °С. Для неувлажненной изоляции увеличение емкости не превышает 15—20 %

$$\frac{C_{80} - C_{20}}{C_{20}} \leqslant 0{,}2,$$

где C_{80} и C_{20} — емкости соответственно при 80 и 20 °С.

Емкость может быть измерена с помощью моста, например Р525, или методом амперметра-вольтметра, мкФ.

$$C = \frac{I}{U} \frac{10^{-6}}{314}.$$

Недостатком метода является трудность нагрева больших масс оборудования и получение равномерного распределения температуры по изоляции.

У трансформаторов температура изоляции может быть измерена термометром, установленным в верхних слоях масла, или по сопротивлению обмоток по формуле

$$t_2 = \frac{R_2}{R_1}(t_1 + N) - N,$$

где R_1 — сопротивление холодной обмотки при температуре t_1; R_2 — сопротивление горячей обмотки при температуре t_2; $N = 235$, если обмотка выполнена медным проводом, и $N = 245$ для алюминиевого провода.

Метод абсорбции основан на оценке увлажненности изоляции по ее электрическому сопротивлению и току абсорбции. Применяется в основном для определения увлажненности гигроскопичной изоляции электрических машин, трансформаторов и силовых кабелей.

Измерение проводят при температуре 10—30 °С мегаомметром на напряжение 1000 или 2500 В, сравнивая его показания через 15 и 60 с после приложения напряжения. Коэффициент абсорбции

$$k_a = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

где R_{60} и R_{15} — сопротивления изоляции соответственно через 60 и 15 с после приложения напряжения.

Для неувлажненной изоляции этот коэффициент равен 1,3—2, при увлажненной изоляции он близок к единице.

Измерения желательно производить мегаомметрами со встроенными реле времени, дающими сигналы через 15 и 60 с после подачи на испытуемый объект напряжения, например типов Ф2 и Ф3 разработки Союзтехэнерго.

Для определения коэффициента абсорбции могут быть использованы испытательные установки высокого напряжения, применение которых ограничено: только для сильно увлажненной изоляции с электрической прочностью менее 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения испытуемой изоляции.

Оценить увлажненность изоляции можно также по изменению тока абсорбции, измеренного при напряжении $0{,}5\,U_н$ и $2\,U_н$, путем расчета коэффициента нелинейности

$$k_{нл} = \frac{R_{0{,}5}}{R_2},$$

где $R_{0,5}$ и R_2 — сопротивления изоляции, измеренные при напряжении, равном $0{,}5\,U_н$ и $2\,U_н$, по одноминутному значению тока утечки после приложения напряжения.

Для неувлажненной изоляции $k_{нл} \leqslant 2 \div 3$.

3-16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Испытание изоляции вторичных цепей производится в объеме, предусмотренном ПУЭ-76, § 1-8-34. При этом должно быть измерено сопротивление изоляции и проведено

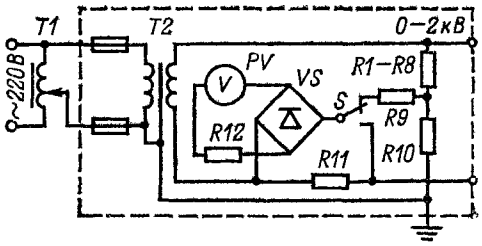


Рис. 3-31. Схема аппарата для испытания изоляции повышенным напряжением.

испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Наименьшие допустимые сопротивления изоляции приведены в табл. 3-4.

Испытательное напряжение принято равным 1000 В; продолжительность его приложения 1 мин.

Перед началом испытаний необходимо:

убедиться в отсутствии напряжения на испытуемом оборудовании и оградить его от возможного прикосновения;

снять все заземления в схеме вторичных цепей трансформаторов тока, отключить вторичные обмотки трансформаторов напряжения;

отсоединить всю аппаратуру, которая по условиям эксплуатации не допускает испытания повышенным напряжением;

закоротить полупроводниковые выпрямители, конденсаторы и промежуточные трансформаторы, соединив между собой различные обмотки;

проверить схему и принять меры для исключения попадания испытательного напряжения на другие схемы;

проверить изоляцию собранной для испытания схемы мегаомметром на 500 или 1000 В. Сопротивление изоляции не должно быть меньше значений, указанных в табл. 3-4.

Таблица 3-4

Наименьшие допустимые сопротивления изоляции вторичных цепей

Испытуемая изоляция	Напряжение мегаомметра, В	Сопротивление изоляции, МОм	Примечание
Вторичные цепи управления, защиты, измерения, сигнализации и т. п. в электроустановках напряжением выше 1000 В:			
шинки оперативного тока и шинки цепей напряжения на щите управления	500—1000	10	Испытания производятся при отсоединенных цепях
каждое присоединение вторичных цепей и цепей питания приводов выключателей и разъединителей	500—1000	1	Испытания производятся со всеми присоединенными аппаратами (катушки приводов, контакторы, реле, приборы, вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения и т. п.)
Вторичные цепи управления, защиты, сигнализации в релейно-контакторных схемах установок напряжением до 1000 В	500—1000	0,5	Испытания производятся со всеми присоединенными аппаратами (магнитные пускатели, контакторы, катушки автоматов, реле, приборы и т. п.)
Цепи бесконтактных схем системы регулирования и управления, а также присоединенные к ним элементы	—	По данным завода-изготовителя	—

После проверки сопротивления изоляции схема присоединяется к испытательной установке, схема которой приведена на рис. 3-31. Корпус регулировочного устройства и первичная обмотка испытательного трансформатора заземляются на случай пробоя изоляции между обмотками испытательного трансформатора.

Напряжение плавно поднимается до 500 В, и схема осматривается на отсутствие разрядов, искр, тления и т. д., после чего испытательное напряжение доводится до 1000 В и выдерживается. По окончании испытания напряжение плавно доводится до нуля, испытательная установка отключается. Схема испытания разряжается и повторно проверяется мегаомметром.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если в процессе его не обнаружены пробои изоляции, скользящие разряды, резкие толчки тока и напряжения, а при повторной проверке изоляции мегаомметром ее сопротивление не уменьшилось.

Протяженные цепи вторичной коммутации испытывают по участкам.

При отсутствии испытательной установки схема испытания может быть собрана с трансформатором напряжения мощностью не менее 200—300 В·А и коэффициентом трансформации 1000—3000/100—200 В, например НОМ-3 (рис. 3-32). В качестве регулятора можно использовать ЛАТР или потенциометр. Включение миллиамперметра производится периодически при подъеме напряжения и постоянно в течение всего времени испытания.

Ограничительное сопротивление $R_2 = 1000/k^2$, где k — коэффициент трансформации испытательного трансформатора.

Испытание изоляции силовых кабелей повышенным напряжением постоянного тока производится для того, чтобы выявить нарушения электрической прочности изоляции путем доведения ослабленного места до пробоя.

Перед началом испытания небходимо выполнить мероприятия по организации работ и точно установить начало и конец испытуемого кабеля. С целью выявления грубых дефектов

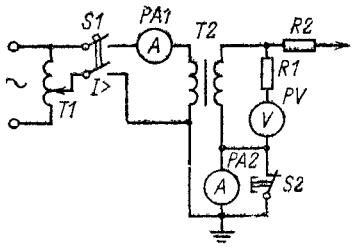


Рис. 3-32. Схема испытания с применением трансформатора напряжения.

кабеля, а также упущений при монтаже (оставленная закоротка и т. д.) предварительно мегаомметром на 1000—2500 В замеряют сопротивление изоляции каждой жилы относительно земли и между собой. После окончания замера сопротивления изоляции кабель разряжают разрядной штангой. Дальнейшее испытание проводится с помощью установки, содержащей регулируемый источник напряжения постоянного тока и измерительные приборы. Испытательное напряжение должно быть замерено с погрешностью не более 1,5 % для изделий на номинальное напряжение до 35 кВ включительно и не более 3 % для изделий на номинальное напряжение выше 35 кВ.

Для большинства дефектов кабельной изоляции пробивное напряжение на отрицательной полярности на 5—15 % ниже, чем на положительной, поэтому к центральной жиле кабеля прикладывают испытательное напряжение отрицательной полярности.

Испытательные напряжения и продолжительность испытания регламентированы ПУЭ-76.

Первоначальный подъем напряжения до уровня 25—30 % испытательного может производиться с любой скоростью. Дальнейший подъем напряжения до испытательного производится равномерно со скоростью 1—2 кВ/с и по достижении испытательного выдерживается неизменным. После выдержки положенного времени напряжение плавно снижается с любой скоростью до 30—40 % испытательного, после чего установка может быть отключена толчком. Разряжают испытываемую жилу кабеля через разрядную штангу или сопротивление примерно 20 000 Ом, затем через 5—10 с без сопротивления непосредственно на землю и накладывают заземление; при этом разрядная штанга висит на выводе высокого напряжения установки.

По окончании испытания всех жил кабеля повторно измеряют сопротивление изоляции мегаомметром (у исправного кабеля сопротивление изоляции не должно измениться), после чего кабель снова необходимо разрядить.

Кабель считается выдержавшим испытание, если не произошло пробоя, не наблюдалось скользящих разрядов и толчков тока утечки или его нарастания после того, как он достиг установившегося значения. Коэффициент асимметрии токов утечки по фазам у кабеля, имеющего удовлетворительную изоляцию, не превосходит 2. Для испытания изоляции силовых кабелей на номинальное напряжение до 10 кВ включительно широко используют выпускаемую заводом «Мосрентген» испытательную установку АИИ-70. Установка позволяет получать выпрямленное напряжение до 70 кВ при токе 5 мА и переменное напряжение до 50 кВ. В качестве выпрямителя в аппарате применены электронные лампы. Для испытания кабелей на номинальное напряжение более 10 кВ обычно используют передвижные испытательные автолаборатории, например УВЛ-03, позволяющую производить испытание силовых кабелей на номинальное напряжение до 35 кВ включительно.

Одним из основных недостатков установок с кенотронными выпрямителями является рентгеновское излучение. Для замены кенотронных ламп широкое распространение в наладочной практике получили выпрямители высокого напряжения типов ВВ-0,5/180, ВВКМ-0,05/180 и ВВКМ-0,05/140, разработанные Ленинградским проектно-экспериментальным отделением ВНИИпроектэлектромонтажа и изготовляемые Московским опытным заводом электромонтажной техники. Максимальное выпрямленное напряжение выпрямителей 140 и 180 кВ при максимальном среднем значении выпрямленного тока 0,5·А для ВВ-0,5/180 и 0,05 А для ВВКМ-0,05/180 и ВВКМ-0,05/140.

Испытание изоляции электрооборудования переменным током промышленной частоты. Проведению испытаний должны предшествовать тщательный осмотр и оценка изоляции другими методами (измерением диэлектрических потерь, сопротивления изоляции, распределения напряжения и т. д.). При наличии видимых дефектов изоляции, ее загрязнении или увлажнении, получении неудовлетворительных данных при проверке другими методами испытания не проводят.

Форма кривой испытательного напряжения должна быть практически синусоидальной, а частота испытательного напряжения — в пределах 45—55 Гц. Для того чтобы не происходило искажения формы кривой, в

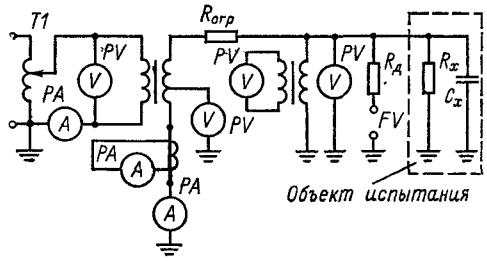


Рис. 3-33. Схема испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением промышленной частоты.

качестве регулятора напряжения применяют устройство с малым индуктивным сопротивлением — автотрансформатор. Испытания проводят с помощью установки, содержащей регулятор напряжения, испытательный трансформатор и контрольно-измерительную и защитную аппаратуру (рис. 3-33).

Регулятор напряжения должен плавно изменять напряжение испытательного трансформатора от 25—30 % до испытательного. При ступенчатом регулировании ступень регулирования не должна превышать 1—1,5 % испытательного напряжения. Наибольшее распространение в качестве регулировочных устройств получили однофазные регуляторы напряжения (автотрансформаторы со щеточным токосъемным устройством типов РНО, ЛАТР) и однофазные регулировочные автотрансформаторы с подвижной катушкой типов РОТ, АОМКТ.

При работе с регуляторами напряжения требуется выполнять следующие условия: длительность подъема напряжения и время испытания не должны превышать 0,5 и 1 мин, при естественном охлаждении пауза между первым и вторым испытаниями должна быть не менее 10 мин, между вторым и третьим — не менее 20 мин, следующий цикл измерений — не ранее чем через 2 ч.

Работая с автотрансформаторами, следует помнить, что верхнее положение катушки соответствует минимальному напряжению, нижнее — максимальному. Для цикла работы — 1 мин работы, 3 мин — перерыв перегрузка может достигать двукратного значения.

Мощность испытательного трансформатора P, кВ·А, зависит от емкости испытуемого объекта C, пФ, угловой частоты ω и испытательного напряжения U, кВ

$$P = \omega C U^2 \cdot 10^{-9}.$$

Таблица 3-5

Ориентировочные значения емкостей некоторых видов электрооборудования для выбора испытательного трансформатора

Объект	Емкость, пФ
Вводы трансформаторов и масляных выключателей	50—800
Трансформаторы напряжения и тока	100—1000
Силовые трансформаторы, некоторые трансформаторы напряжения, электродвигатели мощностью до 100 кВ·А	1000—10 000
Электродвигатели мощностью более 100 кВ·А	10 000—100 000

Если емкость объекта неизвестна, то перед проведением испытания ее необходимо измерить на низком напряжении методом амперметра — вольтметра с точностью, достаточной для выбора испытательного трансформатора,

$$C = \frac{I}{2\pi f U}.$$

Ориентировочные значения емкости наиболее распространенных видов оборудования приведены в табл. 3-5.

Для испытания повышенным напряжением применяют как специальные трансформаторы типа ИОМ, так и различные другие (от электрофильтров, маслопробойных и кенотронных аппаратов, трансформаторы напряжения, различные силовые одно- и трехфазные трансформаторы и т. п.). В табл. 3-6 приведены технические данные рекомендуемых трансформаторов типов ИОМ и ОМ.

При использовании трансформаторов напряжения типа НОМ (табл. 3-7) для получения достаточной мощности возможно параллельное включение однотипных трансформаторов, а для получения достаточного напряжения — последовательное соединение обмоток высокого напряжения.

Способы включения контрольно-измерительной и защитной аппаратуры приведены на рис. 3-33.

Контроль за током нагрузки обычно осуществляется на стороне низкого напряжения. При больших токах нагрузки амперметр включается через измерительный трансформатор тока, при малых — непосредственно в цепь высокого напряжения.

Испытательное напряжение может быть замерено на стороне как низкого, так и высокого напряжения. Для объектов с большой емкостью рекомендуется производить измерение на стороне высокого напряжения, так как за счет емкостного тока напряжение на обмотке высокого напряжения испытательного трансформатора может возрасти.

При использовании специальных испытательных трансформаторов, имеющих отпайку со стороны заземленного конца высокого напряжения, измерение высокого напряжения производится измерением напряжения на отпайке. При включении ограничивающего сопротивления этот метод может дать значительную ошибку. Включение вольтметров на стороне высокого напряжения через измерительный трансформатор напряжения практикуется лишь для измерения испытательного напряжения до 30—40 кВ, непосредственное измерение производится электростатическими киловольтметрами типов С96, С100, С110, С101.

Для защиты объекта испытания от чрезмерного испытательного напряжения на высокой стороне устанавливается шаровой разрядник, настраиваемый на 110 % испытательного напряжения; диаметр шаров разрядника зависит от пробивного напряжения.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если не было отмечено ее частичных нарушений, выявленных по показаниям приборов или визуально (появление дыма, выделение газа, скользящие разряды по поверхности).

Таблица 3-6

Основные технические данные трансформаторов типа ИОМ и однофазных силовых трансформаторов типа ОМ для испытаний высоким напряжением

Тип	Номинальное значение			Напряжение короткого замыкания, %	Масса общая, кг
	мощность, кВ·А	напряжение обмотки, кВ			
		высокое	низкое		
ИОМ-15/10	5 — длительно; 10 кратковременно	15	0,2	3	92
ИОМ-35-70/30	15 — длительно; 30 — кратковременно	35 и 70	0,2	7	420
ИОМ-35-70/100	50 — длительно; 100 — кратковременно	35 и 70	0,2	7	710
ИОМ-100/25	25	100	0,2 или 0,35	10	525
ИОМ-100/100	100	100	0,2 или 0,35	10	990
ОМ-5/15	5	15±10%	0,38 или 0,22	7,5	235
ОМ-33/35	20	35	0,4	5	815
ОМ-66/35	50	35±2×2,5%	0,38 или 0,22	4,5	1190

Таблица 3-7

Допустимые нагрузки трансформаторов напряжения типа НОМ при использовании их в качестве испытательных

Тип	Номинальный коэффициент трансформации	Максимальная мощность, кВ·А		Максимальный ток обмотки низкого напряжения, А		Масса, кг
		длительная	одноминутная	длительный	одноминутный	
НОМ-6	6000/100	0,6	1,5	6,0	15	23
НОМ-10	10 000/100	0,72	3,5	7,2	35	36,2
НОМ-15	15 000/100	0,84	4,0	8,4	40	81
НОМ-35	35 000/100	2,0	6,0	12,0	60	248

Примечание. Значение одноминутной мощности указано для режима испытания при трехкратной одноминутной нагрузке с двухминутными перерывами между приложениями напряжения с последующим перерывом около 1 ч.

В. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

3-17. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ ПРОВОДНИКОВ

Измерение сопротивления заземляющих проводников производится для проверки их состояния — надежности контактов и сварочных соединений. Сопротивление заземляющих проводников не нормируется ПУЭ и обычно составляет десятые доли ома на ветвь.

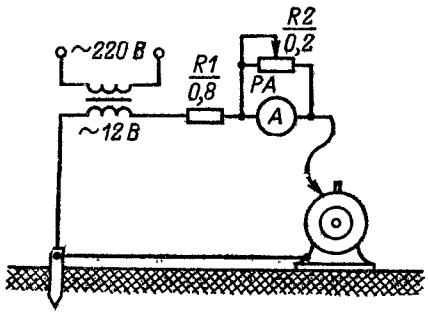


Рис. 3-34. Схема измерения сопротивления заземляющих проводников по методу проградуированного в омах амперметра.

Перед началом измерения необходимо визуально проверить целостность заземляющей линии и, если измерение проводится без отключения испытуемого оборудования, с помощью вольтметра или пробника убедиться в отсутствии напряжения на корпусе испытуемого оборудования.

Измерения могут быть проведены по методам амперметра — вольтметра, проградуированного в омах амперметра, а также с использованием специальных приборов: омметров, например М372, М246, мостов, измерителей заземления МС-08 и МС-07 и т. п.

Измерения по первым двум методам являются предпочтительными для обычных помещений, так как позволяют использовать большие токи (до 10—30 А) при малом напряжении (около 12 В). Протекание больших токов вызывает нагрев или искрение в плохих контактных соединениях, выгорание случайных перемычек.

На рис. 3-34 приведена схема измерения по методу проградуированного в омах амперметра. При градуировке ползунок реостата ставится в среднее положение. Шкала градуируется в омах, полное отклонение стрелки соответствует току 10 А, сопротивлению 0 Ом. При градуировании провод от трансформатора присоединяется струбциной к магистрали заземления. Прижимая щуп, соединенный проводом с амперметром, к струбцине, подают питание на трансформатор и реостатом устанавливают стрелку прибора на нуль. Во время измерений, чтобы уменьшить влияние колебания напряжения, периодически проверяют установку стрелки на нуль. Сечение проводов для сборки схемы измерения должно быть не менее 4 мм^2.

При измерении сопротивления заземляющих проводников с помощью специальных приборов создается цепь тока корпус электрооборудования — прибор — магистраль заземления — заземляющий проводник — корпус. Перед измерением калибруют прибор для компенсации сопротивления соединительных проводов или измеряют их сопротивления. Для второго случая сопротивление заземляющих проводников вычисляется как разность измеренного сопротивления и сопротивления соединительных проводов.

3-18. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Для правильной оценки качества заземляющих устройств измерение их сопротивления рекомендуется проводить в период наименьшей проводимости грунта: зимой при наибольшем его промерзании, летом — при наибольшем просыхании. Для учета состояния земли во время измерения применяют один из коэффициентов, приведенных в табл. 3-8: k_1 — если земля влажная, времени измерения предшествовало выпадение большого количества осадков; k_2 — если земля нормальной влажности; k_3 — если земля сухая, количество осадков ниже нормы. Расчетное сопротивле-

Таблица 3-8

Поправочный коэффициент к значению измеренного сопротивления заземлителя для средней полосы СССР

Тип заземлителя	Размеры заземлителя	t=0,7÷0,8 м			t=0,5 м			t=0 м		
		k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
Горизонтальная полоса	l=5 м	4,3	3,6	2,9	8,0	6,2	4,4	—	—	—
	l=20 м	3,6	3,0	2,5	6,5	5,2	3,8	—	—	—
Заземляющая сетка или контур	S'=400 м²	2,6	2,3	2,0	4,6	3,8	3,2	—	—	—
	S'=900 м²	2,2	2,0	1,8	3,6	3,0	2,7	—	—	—
	S'=3600 м²	1,8	1,7	1,6	3,0	2,6	2,3	—	—	—
Заземляющая сетка или контур с вертикальными электродами	S'=900 м², n=10 шт.	1,6	1,5	1,4	2,1	1,9	1,8	—	—	—
	S'=3600 м², n=15 шт.	1,5	1,4	1,3	2,0	1,9	1,7	—	—	—
Одиночный вертикальный заземлитель	l=2,5 м	2,0	1,75	1,5	—	—	—	3,8	3,0	2,3
	l=3,5 м	1,6	1,4	1,3	—	—	—	2,1	1,9	1,6
	l=5,0 м	1,3	1,23	1,15	—	—	—	1,6	1,45	1,3

Примечание: t — расстояние от поверхности земли до верхней точки заземлителя.

ние заземлителя определяется из выражения $R = R_{изм} k$.

При разветвленной заземляющей сети измерение производят раздельно: сопротивления заземлителей и сопротивления заземляющих проводников, т. е. металлической связи корпусов электрооборудования с контуром заземления.

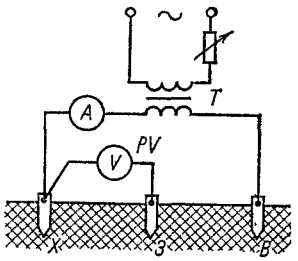


Рис. 3-35. Схема измерения сопротивления заземлителя по методу амперметра—вольтметра.

Метод амперметра — вольтметра применяется в основном для точных измерений при малых сопротивлениях заземлителей (до сотых долей ома). Измерение производят переменным током от понижающего трансформатора (рис. 3-35). Из условий безопасности вторичное напряжение принимают не более 60—70 В. Из-за большого тока в измерительной цепи регулируется обычно первичное напряжение. Измерение производят за пределами расположения заземлителя в месте, где нет протяженных металлических коммуникаций. Помимо испытуемого заземлителя необходимо иметь два электрода — вспомогательный B и зонд $З$. В качестве электродов B и $З$ могут служить стальные стержни, забиваемые в землю. Количество стержней в одном электроде зависит от требуемого сопротивления электрода и удельного сопротивления поверхностного слоя земли. Зонд $З$ располагается в точке нулевого потенциала. Для уменьшения погрешности измерения из-за растекания тока вспомогательного электрода электроды желательно располагать по возможности дальше от испытуемого заземлителя. На рис. 3-36 показаны схемы расположения электродов B и $З$ относительно заземлителя и минимальные расстояния между ними, при которых погрешность по указанной причине не превышает 5 %.

Для особо точных измерений используют схемы рис. 3-36, *а, г*. Остальные схемы обеспечивают достаточную точность измерений при меньших расстояниях.

В качестве размеров D следует принимать: для сложных заземлителей из сетки или контура и вертикальных электродов — длину большей диагонали; для заземлителей из горизонтальной полосы или полосы, объединяющей вертикальные электроды, — длину полосы; для одиночных вертикальных заземлителей — их длину.

Размеры a и b выбирают из следующих соотношений [6, с. 33]:

$$D > 40 \text{ м}, \ a \geqslant D; \quad 40 \text{ м} \geqslant D > 10 \text{ м}, \ a \geqslant 40 \text{ м};$$

$$D < 10 \text{ м}, \ a \approx 20 \text{ м}; \quad D > 6 \text{ м}; \ b \geqslant 3D.$$

Чтобы уменьшить влияние посторонних токов на результат измерения, ток в измерительной цепи должен быть не менее 10 А. В большинстве случаев достаточен ток 20—25 А.

Амперметр и вольтметр присоединяют к испытуемому заземлителю раздельно, причем

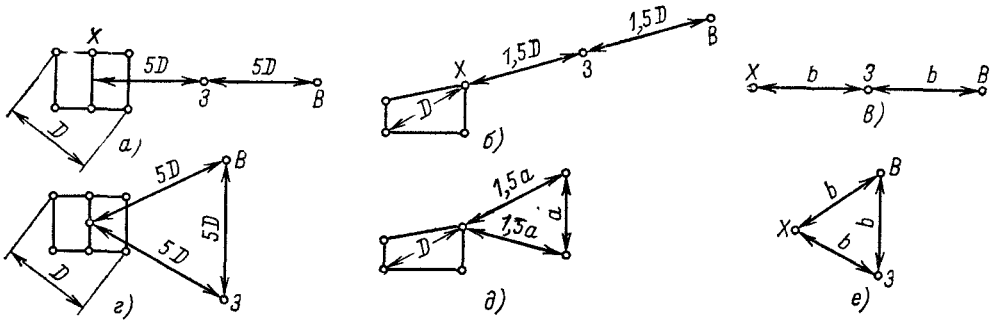


Рис. 3-36. Взаимное расположение испытуемого заземлителя и вспомогательных электродов. *а, б, в* — однолучевые; *г, д, е* — двухлучевые схемы измерения.

с целью уменьшения падения напряжения в проводах вольтметр присоединяют непосредственно у места ввода тока в заземлитель. Для снижения погрешности, вносимой вольтметром, его сопротивление должно не менее чем в 50 раз превышать сопротивление зонда. Если указанное требование выполнить нельзя, то падение напряжения на испытуемом заземлителе U_x может быть вычислено по формуле

$$U_x = U_в\left(1 + \frac{R_з}{R_в}\right),$$

где $U_в$ — показание вольтметра; $R_з$ и $R_в$ — сопротивление зонда и вольтметра.

Для измерения сопротивления зонда измерительный ток пропускают через зонд, а роль зонда для измерения напряжения выполняет испытуемый заземлитель.

Рекомендуемый класс точности вольтметра и амперметра не ниже 1,5, а для трансформатора тока в случае его применения — не ниже 1.

Значение сопротивления испытуемого заземлителя принимается как среднее арифметическое из трех измерений.

На территориях с развитыми подземными коммуникациями измерения проводят как по двухлучевой, так и по однолучевой схемам, принимая минимальные расстояния *а* или *b*. При расхождении результатов более чем на 20 % необходимо изменить направления лучей или увеличить все расстояния в 1,5—2 раза.

Измерение прибором МС-08. Принцип действия прибора основан на измерении сопротивления по методу амперметра—вольтметра. Прибор имеет три предела измерения с рабочими шкалами 10—1000, 1—100 и 0,1—10 Ом. Наибольшая приведенная погрешность прибора не превышает ±1,5 %; при измерении малых сопротивлений погрешность прибора недопустимо велика.

К достоинствам прибора следует отнести портативность, наличие встроенного генератора, возможность измерений при наличии посторонних токов в земле. Ток и напряжение измеряют одним прибором — магнитоэлектрическим логометром.

Схемы включения прибора показаны на рис. 3.37. При измерении больших сопротивлений в измеряемое значение входит сопротивление проводника, соединяющего прибор с испытуемым заземлителем, поэтому его сечение должно быть не менее 4—6 мм², а длина — не более 2 м. При измерении малых сопротивлений или расположении прибора на значительном расстоянии от заземлителя используют схему рис. 3-37, *б*, по которой соединительные провода не вносят погрешности.

Последовательность работы с прибором:

1) собрать схему измерений;

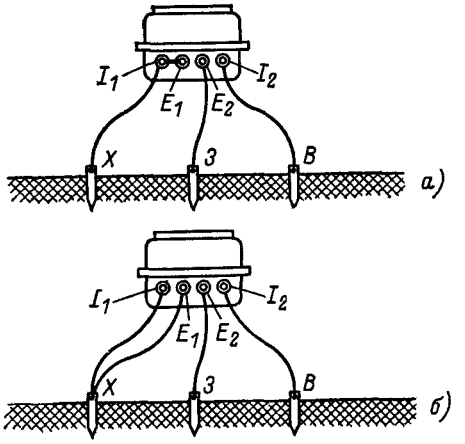


Рис. 3-37. Схема измерения прибором МС-08.
а — измерение больших сопротивлений; *б* — измерение малых сопротивлений.

2) скомпенсировать сопротивление зонда и соединительных проводов, для чего переключатель режимов установить в положение «регулировка» и, вращая ручку генератора с частотой 120—130 об/мин, с помощью подстроечного сопротивления установить стрелку прибора на красную черту шкалы. Если сделать последнее не удается, необходимо принять меры к уменьшению сопротивления зонда;

3) после компенсации сопротивления зонда установить предел измерения «×1», что соответствует пределу 1000 Ом. Вращая ручку генератора с частотой 120—130 об/мин, произвести отсчет по шкале прибора. При незначительном отклонении стрелки последова-

тельно перейти на более чувствительные пределы измерения.

Колебания стрелки свидетельствуют о блуждающих токах в земле, влияние которых можно устранить изменением частоты вращения генератора, при этом частота вращения генератора не должна выходить за пределы 90—150 об/мин. При чрезвычайно большом сопротивлении вспомогательного электрода и недостаточной чувствительности логометра стрелка прибора при измерении устанавливается неуверенно. Для измерения сопротивления вспомогательного электрода необходимо поменять местами провода, присоединенные к зажимам I_1 и I_2 прибора, и повторить измерение. В этом случае прибор покажет сопротивление вспомогательного электрода. Сопротивления должны быть не более:

Пределы измерения, Ом	1000	100	10
Предельно допустимое сопротивление вспомогательного электрода, Ом	1000	500	250

Измерение прибором М-416 основано на компенсационном методе с применением вспомогательного электрода и зонда. Предел измерения прибором от 0,1 до 1000 Ом разбит на четыре диапазона 0,1—10, 0,5—50, 2—200 и 10—1000 Ом. Основная погрешность прибора сохраняется в пределах паспортных данных при сопротивлениях вспомогательного электрода и зонда не более: 500 Ом в диапазоне 0,1—10 Ом, 1000 Ом в диапазоне 0,5—50 Ом, 2500 Ом в диапазоне 2—200 Ом, 5000 Ом в диапазоне 10—1000 Ом.

В качестве вспомогательного электрода и зонда могут быть использованы металлические стержни или трубы диаметром не менее 5 мм, забиваемые в землю на глубину не менее 500 мм.

Питание прибора — от трех сухих элементов типа «Марс».

Измерение прибором может производиться как по трехзажимной (измерение сопротивлений более 5 Ом), так и по четырехзажимной схеме аналогично измерению прибором МС-08 (см. рис. 3-37). При измерениях по трехзажимной схеме между зажимами *1—2* ставят перемычку. При измерении по однолучевой схеме расстояние от заземлителя до зонда должно быть не менее $5D+20$ м (D — диаметр наибольшей диагонали сложного заземлителя; для простого заземлителя $D=0$) и от зонда до вспомогательного электрода не менее 10 м— для простого заземлителя, а для сложного — не менее 20 м.

Порядок измерений следующий:

проверить источник питания, для чего переключатель поставить в положение «контроль питания» и нажать кнопку. Стрелка должна отклониться за красную черту в правой части шкалы;

установить переключатель в положение «контроль 5 Ом», нажать кнопку и вращением ручки «реохорд» добиться установления стрелки индикатора на нулевую отметку, на шкале реохорда должно быть показание $5\pm0{,}3$ Ом;

собрать схему измерения;

переключатель диапазонов установить в положение «×1»;

нажать кнопку и, вращая ручку реохорда, установить стрелку индикатора на нуль. Если измеряемое сопротивление больше 10 Ом, переключатель установить в положение «×5», «×20» или «×100», повторить измерение и результат, считанный со шкалы реохорда, умножить на множитель.

3-19. ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

Метод пробного (контрольного) электрода применяется в основном при проектировании одиночных или охватывающих небольшую площадь заземлителей. В месте испытания в землю забивают пробный электрод таких же размеров и на такую же глубину, как у предполагаемого заземлителя. Растительный или насыпной грунт в месте забивки удаляется. Вспомогательный электрод и зонд располагают на таком же расстоянии, как и при измерении одиночного заземлителя. Затем по одному из описанных в § 3-18 методов измеряют сопротивление растеканию тока от пробного электрода. Удельное сопротивление грунта

$$\rho=\frac{Rl}{0{,}366\left(\lg\frac{2l}{d}+\frac{1}{2}\lg\frac{t+0{,}75l}{t+0{,}25l}\right)},$$

где R — измеренное сопротивление пробного электрода; l — длина электрода; d — внешний диаметр электрода; t — глубина заложения пробного электрода, равная расстоянию от поверхности земли до верхнего конца электрода.

Для горизонтального пробного электрода удельное сопротивление грунта

$$\rho=\frac{Rl}{0{,}366\lg\frac{l^2}{dt}}.$$

Если пробный электрод из угловой стали, то для формул применяют эквивалентный диаметр $d_{экв}=0{,}95\,b$, где b — ширина полки; для полосовой стали $d_{экв}=0{,}56b$.

Метод ступенчато погружаемого пробного электрода применяется при проектировании экономичных сложных заземлителей для получения данных о распределении ρ по глубине с последующим построением эпюры распределения удельного сопротивления земли. Этот метод является разновидностью метода пробного электрода и отличается от него тем, что пробный электрод погружают в землю не сразу на всю глубину, а отдельными участками, производя для каждого его положения замер сопротивления растеканию. Удельное сопротивление, соответствующее глубине погружения пробного электрода,

$$\rho=\frac{Rl_t}{0{,}366\lg\frac{4l_t}{d}},$$

где l_t — длина погруженной части пробного электрода. Удельное сопротивление ρ_n в n-м слое земли

$$\rho_n = \frac{l_t - l_{t-1}}{\frac{l_t}{\rho_t} - \frac{l_{t-1}}{\rho_{t-1}}},$$

где $l_t - l_{t-1}$ — толщина n-го слоя земли.

Метод вертикального электрического зондирования является наиболее универсальным, позволяющим определить распределение удельного сопротивления земли, используя зависимость между распределением ρ по глубине и распределением на поверхности земли потенциалов, создаваемых электрическим током в земле от точечного источника.

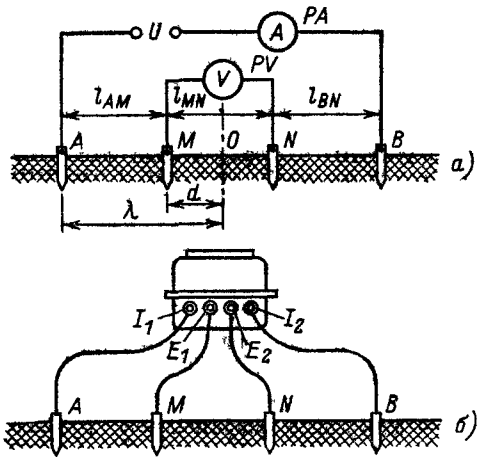


Рис. 3-38. Схема измерения удельного сопротивления грунта по методу вертикального электрического зондирования.

а — с помощью амперметра и вольтметра; *б* — с помощью прибора МС-08.

Для измерений симметрично относительно точки измерения забивают четыре электрода *A*, *B*, *M* и *N* и собирают схему измерения, изображенную на рис. 3-38, *а*. Электроды обычно выполняют в виде стержней, забиваемых на глубину, не превышающую $l_{MN}/3$, или 0,7 м.

Удельное сопротивление грунта

$$\rho_r = k\frac{U}{I},$$

где U — разность потенциалов, измеренная между электродами *M* и *N*; I — ток в питающей сети; k — коэффициент, зависящий от расстояния между электродами,

$$k = \frac{l_{AM}\, l_{AN}}{l_{MN}},$$

где l — расстояние между соответствующими электродами.

Измерения можно вести, разнося электроды *A* и *B* и сохраняя расстояние $l_{MN} \leqslant l_{AB}/3$ неизменным, при этом показание вольтметра уменьшается. Через некоторое число измерений увеличивают расстояние l_{MN} до $^1/_3 l_{AB}$ последнего измерения и т. д. Измеренное удельное сопротивление вычисляют по формуле

$$\rho_r = \pi\frac{\lambda^2 - d^2}{2d}\frac{U}{I},$$

где $\lambda = \frac{l_{AB}}{2}$; $d = \frac{l_{MN}}{2}$.

Измерение можно также вести, сохраняя после разноса электродов одинаковыми расстояния l_{AM}, l_{MN} и l_{NB}.

Значение ρ_r вычисляют по формуле

$$\rho_r = 2\pi a\frac{U}{I},$$

где $a = l_{AM} = l_{MN} = l_{NB}$.

Для измерения удельного сопротивления грунта по методу вертикального зондирования может быть использован измеритель заземления МС-08 (рис. 3-38, *б*). Показания измерителя представляют собой отношение U/I.

Измерения ведут начиная с расстояний $l_{AB} = 1{,}5$ м, $l_{MN} = 0{,}5$ м до тех пор, пока не будет достигнута нужная глубина зондирования *H*. Приближенно считают, что

$$H = \frac{1}{3} l_{AB}.$$

Определение ρ земли производится в два этапа:

1) по данным измерений на бумаге с сеткой в логарифмическом масштабе строят кривую зависимости

$$\rho_r = f(\lambda);$$

2) полученную кривую сравнивают с набором теоретических кривых, рассчитанных для заранее известных электрических структур земли (двухслойных, трехслойных и т. д.).

3-20. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕТЛИ ФАЗА — НУЛЬ

Метод амперметра — вольтметра. Испытуемое электрооборудование отключают от сети. Измерение производят на переменном токе от

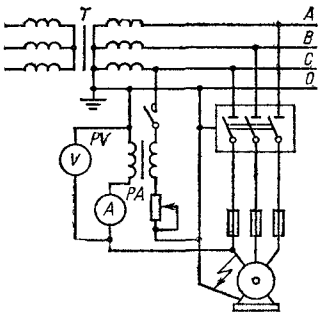


Рис. 3-39. Схема измерения сопротивления петли фаза — нуль по методу амперметра — вольтметра.

понижающего трансформатора. Для измерения делается искусственное замыкание одного фазного провода на корпус электроприемника. Схема испытания приведена на рис 3-39.

После подачи напряжения измеряются ток *I* и напряжение *U*, измерительный ток дол-

жен быть не менее 10—20 А. Сопротивление измеренной петли $z'_п = U/I$.

Полученное значение $z'_п$ должно быть арифметически сложено с расчетным значением полного сопротивления одной фазы питающего трансформатора $z_т/3$. Полное сопротивление петли фазный провод — нулевой провод — фаза трансформатора определяется из выражения

$$z_п = z'_п + 1/3z_т,$$

и возможный ток однофазного замыкания

$$I_к = \frac{U_ф}{z_п} = \frac{U_ф}{z'_п + 1/3z_т},$$

Таблица 3-9

Расчетные сопротивления масляных трансформаторов по ГОСТ 12022-76 при вторичном напряжении 400/230 В

Мощность трансформатора, кВ·А	Первичные напряжения, кВ	Схема соединения	Полное сопротивление трансформатора, $\times 10^{-3}$, Ом
25	6—10	У/У$_н$	3110
40	6—10	У/У$_н$	1949
63	6—10	У/У$_н$	1237
100	6—10	У/У$_н$	779
	35	У/У$_н$	764
160	6—10	У/У$_н$	487
	35	У/У$_н$	478
250	6—10	У/У$_н$	312
	35	У/У$_н$	305
400	6—10	У/У$_н$	195
	35	У/У$_н$	191
	6—10	Д/У$_н$	66
630	6—10	У/У$_н$	129
	35	У/У$_н$	121
	6—10	Д/У$_н$	42

Примечание: При вторичном напряжении 230/127 В значения сопротивлений следует уменьшить в 3 раза.

Таблица 3-10

Полное расчетное сопротивление $z_т$ (Ом·10^{-3}) сухих трансформаторов с вторичным напряжением 400/230 В

Тип трансформатора	Схема соединения обмоток	$z_т$, Ом·10^{-3}
ТСЗ-160/10	Д/У$_н$	165
ТСЗ-250/10	Д/У$_н$	106
ТСЗ-400/10	Д/У$_н$	66
ТСЗ-630/10	Д/У$_н$	42

Примечания: 1. Первичное напряжение для всех типов трансформаторов 6—10 кВ. 2. При вторичном напряжении 230/127 В значения сопротивлений следует уменьшить в 3 раза.

где $U_ф$ — фазное напряжение; $z_т$ — расчетное значение сопротивления питающего трансформатора, определяемое из табл. 3-9, 3-10.

Для электроприемников, питающихся от силовых трансформаторов мощностью свыше 630 кВ·А (1000, 1600, 2500 кВ·А), при определении сопротивления петли сопротивление фазы трансформатора $z_т$ как величину, относительно малую по сравнению с $z_п$, допускается не учитывать.

Измерение прибором ИПЗ-Т. Измеритель петли заземления ИПЗ-Т предназначен для непосредственного определения тока однофазного короткого замыкания в промышленных сетях 380/220 В с глухозаземленной нейтралью.

В основу работы прибора положено измерение падения напряжения на шунте сопротивлением 0,00375 Ом при прохождении через него тока короткого замыкания. Это практически соответствует реальным условиям. Длительность протекания тока короткого замыкания не превышает 0,01 с, что обеспечивает безопасность обслуживающего персонала и не нарушает нормальной работы электроустановок. Коммутирование тока производится тиристором с фазовым управлением. Чтобы исключить влияние апериодической составляющей тока короткого замыкания, возникающей при переходном процессе, измерение производится в два этапа. На первом этапе определяется угол сдвига φ между током и напряжением в цепи фаза—нуль при коротком замыкании. Значение угла φ, устанавливаемого с помощью потенциометра, определяет угол открытия тиристора при коммутации тиристором цепи фаза—нуль на втором этапе измерения. Падение напряжения на шунте в момент замыкания усиливается и запоминается на конденсаторе. Считывание этого напряжения, пропорционального эффективному значению тока короткого замыкания, как и угла φ на первом этапе измерения, производится по стрелочному прибору ИПЗ-Т, который имеет два предела измерения: 0—250 А и 0—2500 А.

Для безопасности обслуживающего персонала в момент измерения в ИПЗ-Т имеется реле контроля земли, которое разрешает работу *прибора только при исправном заземлении.* Подключение ИПЗ-Т благодаря специальной конструкции зажимов соединяющих проводов осуществляется без снятия напряжения.

Измерение прибором ИПЗ-Ц. В ЛенПЭО ВНИИПЭМ разработан цифровой измеритель тока однофазного короткого замыкания в промышленных сетях 380/220 В (ИПЗ-Ц). Способ измерения прибором аналогичен используемому в ИПЗ-Т. Процесс измерения ИПЗ-Ц полностью автоматизирован: выбор предела измерения, измерение угла сдвига фаз между током и напряжением и установление требуемого угла открытия тиристора производятся автоматически. Диапазон измерения ИПЗ-Ц до 15 кА. Питание прибора — от проверяемой сети и аварийное от двух элементов 3336Л — позволяет сохранить информацию о токе короткого замыкания, если в процессе измерения произошло срабатывание автоматического выключателя защиты. По сравнению с ИПЗ-Т в новом приборе улучшена конструкция реле контроля земли.

Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

3-21. ПРОЖИГАНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ МЕСТ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ

Электрическая прочность неповрежденной изоляции кабеля больше испытательного напряжения, поэтому при испытании кабеля повреждаются в большинстве случаев явно дефектные места. При повторяющихся пробоях изоляции в дефектном месте образуется более или менее устойчивый разрядный канал — начальный этап прожигания. Дальнейшее по-

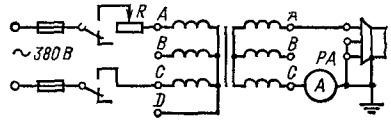


Рис. 3-40. Схема включения трехфазного силового трансформатора для прожигания дефектной изоляции.

R — реостат на ток 200—300 А.

вторение пробоев приводит к обугливанию стенок канала и снижению переходного сопротивления в месте повреждения — промежуточный этап прожигания. Заключительный этап — в момент окончания разрядов и образования более или менее устойчивого проводящего мостика, получаемого от обугливания разрядного канала или заполнения его металлическими частицами, выплавляемыми при токах в десятки ампер с поверхности жилы и оболочки кабеля.

Для существующих методов отыскания дефектных мест кабеля требуются переходные сопротивления в месте дефекта от долей и единиц ома (импульсный, индукционный методы) до сотен и тысяч килоом (петлевой метод). Получение требуемых переходных сопротивлений обеспечивается различными режимами прожигания.

Прожигание на постоянном токе смотри [3-8, с. 95].

Прожигание на переменном токе. Наиболее простой способ — прожигание на переменном токе с использованием повышающих трансформаторов. Одна из схем для такого способа приведена на рис. 3-40.

Подобный способ прожигания применяют обычно совместно с прожиганием на постоянном токе после снижения пробивного напряжения до 5—6 кВ и при небольших длинах кабельных линий, так как требуемая реактивная мощность Q, определяющая габариты и массу трансформатора, пропорциональна квадрату напряжения прожигания U и емкости кабеля C,

$$Q = U^2 \omega C.$$

Для прожигания используют силовые одно- и трехфазные трансформаторы типа ТМ, а также пиковые трансформаторы, в качестве которых обычно используют трансформаторы тока. С целью снижения мощности источника высокого напряжения в прожигающих установках переменного тока используют явление электрического резонанса на частоте 50 Гц, при котором емкостное сопротивление кабеля компенсируется внешним индуктивным сопротивлением. Роль индуктивного сопротивления может выполнять обмотка трансформатора — нерегулируемые установки (рис. 3-41, *а*) или регулируемый дроссель, включение которого может быть как параллельным, так и после-

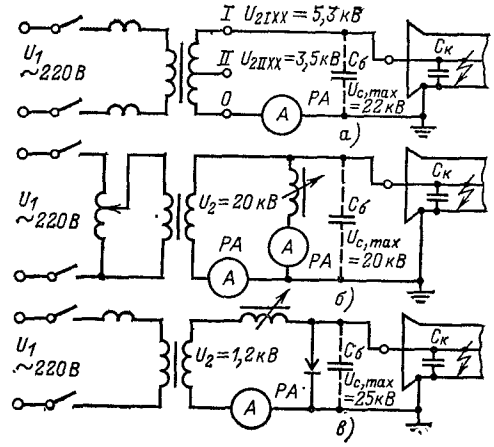


Рис. 3-41. Схемы резонансного прожигания дефектных мест изоляции силовых кабелей.

а — резонансного аппарата РА-2; *б* — при параллельном включении регулируемого дросселя; *в* — при последовательном включении регулируемого дросселя ($C_б$ — балластный конденсатор).

довательным с кабельной емкостью, — регулируемые установки.

При параллельном включении дросселя и кабеля (рис. 3-41, *б*) в схеме возникает резонанс токов. Для установки при таком включении необходим повышающий трансформатор со вторичным напряжением, равным максимально возможному напряжению пробоя. При последовательном включении дросселя и кабеля (рис. 3-41, *в*) в схеме возникает резонанс напряжений, что позволяет использовать источник питания с пониженным напряжением. Максимальное резонансное напряжение нужно выбирать не выше переменного испытательного.

Одним из основных преимуществ резонансного прожигания по сравнению с прожиганием на постоянном токе является (при меньшей массе установки) бо́льшая эффективность прожигания в кабелях значительной длины (до 5 км), а также в соединительных муфтах. Это объясняется более быстрым восстановлением напряжения на кабеле после пробоя и поэтому более частым следованием разрядов, не позволяющим заплывать изоляции в месте пробоя. Другим достоинством резонансного прожигания является то, что возникающий при пробоях проводящий мостик вызывает расстройку резонансного контура по мере уменьшения его сопротивления, в результате

Таблица 3-11

Емкость одной жилы трехжильного кабеля с секторными жилами и пропитанной бумажной изоляцией по отношению к двум другим жилам и металлической оболочке, мкФ/км

Сечение, мм²	Номинальное напряжение, кВ		
	до 1	6	10
16	0,33	0,19	0,15
25	0,36	0,20	0,18
35	0,45	0,24	0,20
50	0,53	0,28	0,21
70	0,58	0,33	0,22
95	0,63	0,37	0,23
120	0,67	0,40	0,27
150	0,70	0,41	0,29
185	0,78	0,47	0,32
240	0,85	0,52	0,36

чего ток, проходящий через поврежденное место, уменьшается и мостик не сгорает.

Основным недостатком резонансных трансформаторов является трудность настройки в резонанс и неуправляемость процессом прожигания. При работе с резонансным трансформатором необходимо учитывать, что напряжение, возбуждаемое на кабеле, зависит от напряжения пробоя, емкости кабеля и переходного сопротивления в месте повреждения.

С достаточной степенью точности емкость кабеля можно определить, если известны удельная емкость кабеля, его длина l (табл. 3-11), а также схемы соединения жил и оболочки кабеля $k_{сх}$ (табл. 3-12),

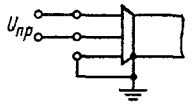
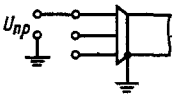
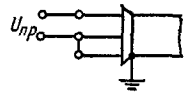
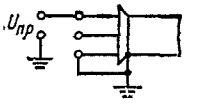
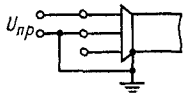
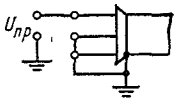
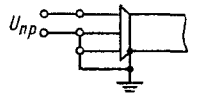
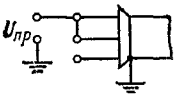
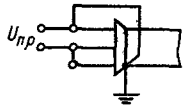
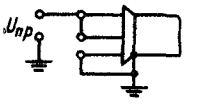
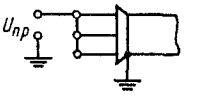
$$C_к = k_{сх} C_{уд} l.$$

Выбирая соответствующую схему соединения жил кабеля, получают значение емкости, при котором возбуждаемое на кабеле напряжение будет больше напряжения пробоя.

На рис. 3-42 приведены зависимости возбуждаемого напряжения на кабеле и тока в

Таблица 3-12

Значение коэффициента $k_{сх}$ в зависимости от схемы соединения жил и оболочки кабеля

Замыкание			
между жилами		на оболочку	
Схема соединения	$k_{сх}$	Схема соединения	$k_{сх}$
	0,590		0,920
	0,785		0,965
	0,965		1,000
	1,000		1,520
	1,640		1,640
			1,930

первичной цепи от емкости кабеля для резонансного аппарата РА-2М. Указанные зависимости даны для переходного сопротивления в месте повреждения более 30 кОм. При меньших сопротивлениях емкость шунтируется и получить необходимое напряжение не удается. В этом случае используют прямое дожигание на основном выводе (U_{21}=5,3 кВ).

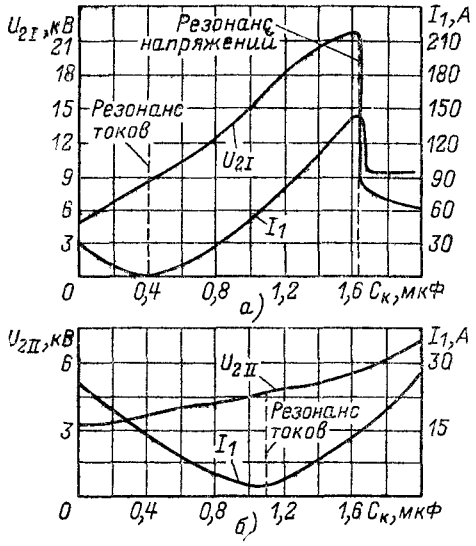


Рис. 3-42. Зависимости тока в первичной цепи и возбуждаемого на кабеле напряжения от емкости кабеля для аппарата РА-2М при использовании основного вывода (*а*) и отпайки (*б*).

Если напряжение пробоя близко к испытательному и составляет 25—30 кВ постоянного тока или 18—22 кВ действующего значения переменного тока, то непосредственное включение аппарата РА-2М нецелесообразно из-за трудностей точной настройки в резонанс, а при удачной настройке — редких пробоев (два-три в секунду). В то же время режимы, близкие к резонансному, наиболее опасны для аппарата по условиям нагрева (продолжительность работы не более 1—1,5 мин). Поэтому в таких случаях рекомендуется снизить напряжение пробоя до 15—20 кВ (11—14 кВ действующего значения) путем прожигания на постоянном токе. При этих напряжениях пробоя и диапазоне изменения емкости от 0,8 до 1,6 мкФ напряжение на емкости достигает напряжения пробоя за три-пять периодов и прожигание происходит обычно в виде периодических разрядов.

При напряжении пробоя 8-10 кВ прожигание можно вести в режимах, близких к резонансу токов на основном выводе ($C_к$ = 0,4÷0,8 мкФ) и на отпайке ($C_к$ = 1÷2 мкФ). После снижения напряжения пробоя до 5 кВ и менее рекомендуется перейти на прямое (нерезонансное) дожигание.

Для получения малых переходных сопротивлений дожигание можно вести непосредственно от сети 220 В, используя первичную обмотку при закороченной вторичной в качестве реактора. Для контроля работы резонансного аппарата в его вторичную цепь со стороны заземленного вывода включают амперметр с номинальным током 10 А. По его показаниям определяют допустимую длительность работы аппарата:

I_2,А	12	8	6	5	4	3	2	1
t, мин	1	2,5	5	7	11	15	30	120

Напряжение, возбуждаемое на кабеле,

$$U = \frac{I_2}{\omega C_к} = \frac{3{,}18 I_2}{C_к}.$$

За ток при периодических разрядах следует брать среднее значение колебания стрелки амперметра.

3-22. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Для выбора метода определения зоны повреждения в кабельных линиях необходимо определить характер повреждений, которые делятся на виды:

замыкание одной жилы на землю;

замыкание двух или трех жил на землю или между собой;

обрыв одной, двух или трех жил без заземления или с заземлением как оборванных, так и не оборванных жил;

заплывающий пробой изоляции;

повреждения линии различного характера одновременно в двух или более местах.

В большинстве случаев для определения вида повреждений бывает достаточно испытать кабель с помощью мегаомметра. Для проведения испытания кабель должен быть отсоединен от сети с обеих сторон. Далее проверяют отсутствие замыкания всех жил кабеля с землей и между собой. При наличии короткого замыкания определяют переходное сопротивление. Чтобы обнаружить обрыв жил, необходимо произвести с обоих концов кабеля прозвонку каждой жилы относительно земли мегаомметром при наложении закоротки и заземления всех жил кабеля на противоположном конце.

Если переходное сопротивление в месте повреждения велико (более 5 мОм), а кабель не выдержал испытания, для более точного определения места повреждения необходимо произвести прожигание поврежденного участка. В редких случаях, при заплывающем пробое в муфте, испытания и прожигание не позволяют локализовать место повреждения.

Зона повреждения определяется одним из методов: импульсным, методом колебательного разряда, емкостным, методом петли. Для нахождения точного места повреждения непосредственно на линии используют методы накладной рамки, акустический и индукционный. Рекомендуемые методы отыскания повреждений в зависимости от вида повреждения, пробивного напряжения в месте повреждения и переходного сопротивления указаны в табл. 3-13.

Импульсный метод применяют для определения зоны повреждения, представляющей собой обрыв, одно-, двух- или трехфазное ко-

Таблица 3-13

Применение методов определения места повреждения кабельных линий

Вид повреждения	Напряжение пробоя, кВ	Переходное сопротивление в месте повреждения, Ом	Метод определения	
			зоны повреждения	точного места повреждения на трассе кабельной линии
Замыкание жилы на землю	От нуля испытательного	0—40	Импульсный, петлевой	Индукционный, накладной рамки
		40—200	Импульсный, колебательного разряда, петлевой	Акустический
		200—5000	Колебательного разряда, петлевой	Акустический
Замыкание между жилами или между жилами и на землю в одном месте		0—40	Импульсный, петлевой (при наличии целой жилы)	Индукционный
		40—200	Импульсный, колебательного разряда	Индукционный, акустический
		200—5000	Колебательного разряда	Индукционный, акустический
Двойное замыкание на землю в разных местах		0—200	Импульсный	Акустический (с предварительным разрушением мостика)
		200—5000	Петлевой, колебательного разряда	
Обрыв жил без замыкания на землю	При напряжении до испытательного нет пробоя	Выше 10^6	Импульсный, емкостный, колебательного разряда	Акустический
Обрывы жил с замыканием на землю	Меньше испытательного	0—200	Импульсный	Индукционный
		Выше 200	Колебательного разряда	Акустический
Заплывающий пробой изоляции		Выше 10^6	Колебательного разряда	Акустический

роткое замыкание жил кабеля между собой или на землю. Метод основан на измерении времени «пробега» t_x импульса в линии от места посылки до места повреждения и обратно $t_x = 2l_x/V$, где l_x — расстояние до места повреждения; V — скорость распространения импульса в линии, которая для большинства кабелей может быть принята 160±1 м/мкс, тогда $l_x = 80\,t_x$

На основе импульсного метода работает ряд приборов, разработанных ВНИИЭ и широко применяемых при обнаружении мест повреждений в кабельных линиях: Р5-1А, Р5-5, Р5-8 и Р5-9. Приборы Р5-1А, Р5-5 позволяют достаточно точно определять зону повреждения, находящегося на расстоянии от конца линии не менее 50 м, а прибор Р5-9 — начиная с 1 м. Прибором Р5-8 можно определять места повреждений на малом расстоянии от конца линии или друг от друга, а также находить места однофазных замыканий на землю с большим переходным сопротивлением. Время «пробега» импульса в линии определяется с помощью электронно-лучевой трубки (Р5-1А, Р5-5, Р5-9), на которой нанесены с интервалом 2 мкс масштабные метки времени (Р5-1А) (рис. 3-43), или отсчетом по шкале калиброванной временной задержки при совмещении отраженного импульса с имеющейся на экране меткой (Р5-5, Р5-9) (рис. 3-44). В приборе Р5-8 индикация процессов в линии осуществляется стрелочным индикатором.

Для получения на экране неподвижного изображения процесс подачи зондирующих импульсов и развертка периодически повторяются с частотой 500—1000 Гц, причем развертка

ка жестко синхронизирована со временем подачи зондирующего импульса. От места обрыва или от конца линии зондирующий импульс отражается без изменения знака, а от места короткого замыкания — с обратным знаком (рис. 3-43, *б*). Амплитуда отраженного импульса зависит от сопротивления в месте повреждения и будет тем меньше, чем ближе это значение к волновому сопротивлению линии. Практически удается отличить повреждения при $U_{отр}=(0{,}15\div0{,}2)U_{зонд}$, где $U_{отр}$ и $U_{зонд}$ — амплитуды напряжений отраженного

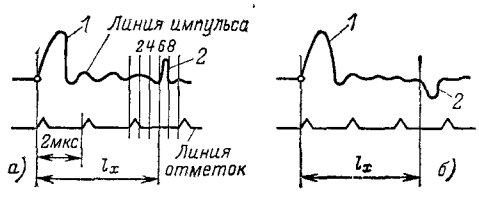


Рис. 3-43. Изображение на экране прибора Р5-1А.

а — при обрыве жил кабеля; *б* — при коротком замыкании жил кабеля; *1* — зондирующий импульс; *2* — отраженный импульс.

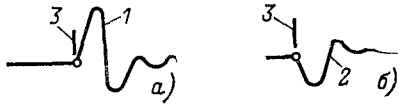


Рис. 3-44. Изображение на экране прибора Р5-5.

а — проверка совпадения зондирующего импульса *1* с нулевой масштабной меткой *3*; *б* — совмещение отраженного импульса *2* с нулевой масштабной меткой.

и зондирующего импульсов. Определение отраженного импульса меньшей амплитуды затруднено, так как линия обладает неоднородностью волнового сопротивления (вставки, муфты и т. д.), которая вызывает ложные импульсы на экране.

Для обнаружения сложных повреждений при больших переходных сопротивлениях, во много раз больших волнового сопротивления линии (отраженный импульс очень мал), во ВНИИЭ разработана приставка к прибору Р5-5. Работа приставки основана на идентичности импульсных характеристик жил кабеля. Приставка позволяет сравнивать импульсные характеристики поврежденной и неповрежденной жил, что значительно облегчает отыскание мест повреждений.

Повысить точность измерения импульсным методом можно, если известна длина кабельной линии, тогда по неповрежденной линии точно определяется скорость распространения импульса в кабеле.

При использовании приборов Р5-1А и Р5-5 для обнаружения повреждения, расположенного на небольшом расстоянии от конца кабеля, а также при наличии сильных электрических полей в месте повреждения применяют **искусственные линии задержки, подобранные** по характеристикам кабельной линии (например, из провода РК-19). Погрешность при измерениях на кабельных линиях обычно не превышает 1,5 % для Р5-1А и 1 % для Р5-5, Р5-8 и Р5-9.

Метод колебательного разряда является одним из немногих, которые позволяют определить зону повреждения при заплывающих пробоях.

Сущность метода заключается в измерении периода (полупериода) свободных колебаний, возникающих в заряженной линии при пробое изоляции в месте повреждения. Возникшие вследствие малого переходного сопротивления в месте пробоя электромагнитные

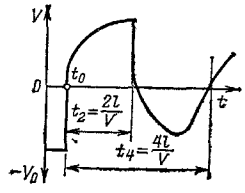


Рис. 3-45. Напряжение на зажимах кабеля при пробое изоляции.

колебания существуют в обеих частях кабеля независимо от места пробоя, поэтому определение зоны пробоя можно производить с любой стороны кабеля.

Период возникших при пробое колебаний соответствует времени четырехкратного пробега волны от места повреждения до конца линии $T=4l_x/V$, где l_x — расстояние до места пробоя; V — скорость распространения волны, для большинства кабелей практически постоянна (160±1 м/мкс),

$$l_x=\frac{TV}{4}=40T.$$

При измерении на жилу кабеля плавно подают высокое напряжение отрицательной полярности до напряжения пробоя, но не выше допустимого значения, предусмотренного для испытания данного кабеля. (Измерение может быть совмещено с испытанием изоляции кабеля высоким напряжением.)

При возникновении пробоя напряжение в месте повреждения падает до нуля (рис. 3-45), затем потенциал жилы резко возрастает, возникает волна напряжения положительной полярности.

Через $t_1=l_x/V$ волна доходит до конца линии, отражаясь от него с тем же знаком, и через $t=2l_x/V$ волна достигает места пробоя, потенциал жилы резко падает до нуля, отражается от места повреждения с переменной знака и вновь уходит к концу линии. В момент $t_3=3l_x/V$ волна отрицательной полярности приходит к концу линии, а в момент $t_4=4l_x/V$ возвращается к месту пробоя, завершая первый период колебаний. Колебательный процесс, возникший в линии, носит затухающий характер, при котором форма и значение напряжения сильно искажаются. Поэтому для повышения точности измерения обычно измеряют только время первого полупериода колебания, подверженного наименьшему затуханию и искажению.

Измерительные приборы подключают к испытываемому кабелю с помощью емкостного делителя. Период (полупериод) измеряют

по изменению напряжения на конце кабеля. Применение для этой цели осциллографа с длительным временем послесвечения и работающего в ждущем режиме позволяет измерить длительность первого полупериода визуально с погрешностью до 20 %; фотографирование процесса уменьшает погрешность измерения до 10 %. Завод «Энергоприбор» в комплекте с делителем напряжения выпускает прибор ЭМКС-58М, предназначенный для определения расстояния (от 40 м до 10 км) до места заплывающего пробоя в кабелях до 10 кВ включительно. Электросекундомер прибора

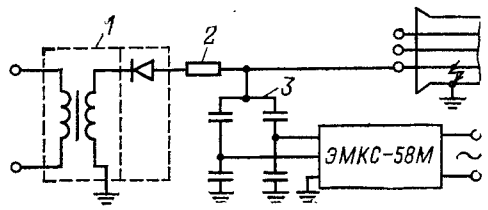


Рис. 3-46. Схема включения прибора ЭМКС-58М.

1 — выпрямитель высокого напряжения; *2* — зарядное сопротивление; *3* — делитель высокого напряжения.

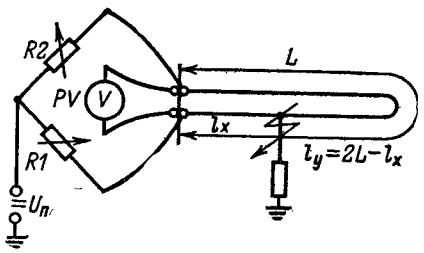


Рис. 3-47. Схема определения места повреждения кабеля петлевым методом.

запускают в момент t_0 и выключают в момент t_2. Расстояние отсчитывают по шкале, проградуированной в километрах с точностью ±5 % максимального значения шкалы (рис. 3-46).

Выпрямитель высокого напряжения подсоединяют к жиле кабеля через зарядный резистор 1—10 кОм, выдерживающий 50—100 мА, 50 кВ (например, ПЭ-50). Делитель напряжения присоединяют к жиле кабеля на расстоянии не более 3 м. Корпус прибора, экран делителя и корпус выпрямителя высокого напряжения заземляют отдельными проводами. Градуировку прибора производят через 10—15 мин после включения. Для повышения чувствительности прибора внутренний электрод делителя заменяют электродом большего диаметра.

При заплывающем пробое между жилами на одну жилу подают высокое напряжение, две другие заземляют через сопротивление 1000 Ом. Если в зоне повреждения имеется муфта, то место повреждения можно определить с большей точностью (заплывающий пробой чаще всего происходит в муфтах).

Петлевой метод применяют для определения зоны повреждения при замыкании жил на оболочку и при наличии хотя бы одной неповрежденной жилы или если параллельно проходит кабель с неповрежденными жилами.

В настоящее время этот метод применяют, если невозможно пользоваться импульсным из-за отсутствия приборов или из-за большого переходного сопротивления в месте повреждения.

Метод основан на принципе измерительного моста постоянного тока, позволяющего определить отношение сопротивлений поврежденной жилы кабеля от места измерения до точки замыкания и обратной петли. Для этого поврежденную и неповрежденную жилы кабеля соединяют на одном конце линии перемычкой сечением не менее, чем у жилы кабеля, и сопротивлением не более 0,1 Ом (рис. 3-47). Плечи моста образуются регулируемыми сопротивлениями R_1, R_2 и сопротивлениями жил R_x и R_y, пропорциональными соответственно длинам l_x и $l_y=2L-l_x$, где l_x — расстояние от места измерения до места повреждения; L — длина линии.

После уравновешивания моста с помощью сопротивлений R_1 и R_2 соблюдается соотношение

$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_x}{R_y}=\frac{l_x}{2L-l_x},$$

из которого при известной длине линии можно определить расстояние до места повреждения

$$l_x=2L\frac{R_1}{R_1+R_2}.$$

Измерения необходимо провести дважды, поменяв местами концы проводов, идущие к кабелю. Если сумма результатов двух измерений заметно отличается от удвоенной длины линии, то измерения необходимо повторить, проверив надежность всех контактных соединений. Мост и гальванометр соединяют с жилами кабеля разными проводами, не касающимися в месте присоединения к жиле. Рекомендуется соединять мост с жилами кабеля медным проводом сечением не менее 4 мм² с латунными наконечниками. Точность определения зоны повреждения повышается, если измерения производить с обоих концов кабельной линии. При этом выдерживается условие

$$0{,}997<2\left(\frac{R_1'}{R_1'+R_2'}+\frac{R_1''}{R_1''+R_2''}\right)<1{,}003,$$

где индексы один и два штриха соответствуют измерениям с обоих концов линии.

Чувствительность моста определяется чувствительностью гальванометра и отношением напряжения питания к переходному сопротивлению в месте повреждения. Поэтому напряжение питания моста выбирается в зависимости от переходного сопротивления. При переходном сопротивлении до 5000 Ом обычно используют мост низкого напряжения (рис. 3-47). Питание моста 100—120 В при переходном сопротивлении 5 кОм, 20—30 В при переходном сопротивлении 1 кОм, 4—6 В — при 100 Ом. Если переходное сопротив-

ление более 5 кОм (до 1500 кОм), то его понижают дожиганием кабеля или используют мост высокого напряжения с напряжением питания 2, 10 и 20 кВ.

Принципиальные схемы мостов высокого и низкого напряжений одинаковы. При использовании моста высокого напряжения требуется изоляция его корпуса относительно земли, выполненная на полное напряжение питания, а также соблюдение правил техники безопасности, предъявляемых к установкам высокого напряжения. Управление резисторами R_1 и R_2, которые могут быть выполнены как плечи реохорда, должно осуществляться изолирующей штангой .

Для линий с различным сечением жил или марок кабеля приводят длины участков к длине $L_{прив}$, имеющей обычно сечение $S_{прив}$ или материал с $\rho_{прив}$ наибольшего однородного участка линии,

$$l_n = \frac{S_{прив}\rho_n}{S_n \rho_{прив}},$$

где ρ_n, l_n, S_n — соответственно удельное сопротивление, длина и сечение n-го участка.

Сложив приведенные длины участков, получают длину эквивалентного однородного кабеля, по которому после проведения измерений путем обратного пересчета уточняют расстояние до места повреждения.

При использовании серийной аппаратуры (мосты Р333, Р336 и т. д.) для однородной линии с известной длиной точность измерения может быть доведена до 0,1—0,3%.

Емкостный метод применяют для определения зоны повреждения при обрывах жил кабеля, если хотя бы с одной стороны от повреждения изоляция не пробита. Основа метода — зависимость емкости кабеля от его длины. Этот метод применяют, если невозможно использовать импульсный.

Рассмотрим основные виды повреждений:

а) при обрыве жилы кабеля без заземления измеряется емкость оборванной жилы с обоих концов. Считая, что длина кабеля делится пропорционально измеренным емкостям C_1 и C_2, имеем

$$\frac{C_1}{l_x} = \frac{C_2}{L - l_x},$$

где l_x — расстояние до места обрыва; L — полная длина линии; в результате получаем

$$l_x = \frac{LC_1}{C_1 + C_2};$$

б) оборванная жила кабеля имеет с одного конца глухое заземление, и имеется хотя бы одна неповрежденная жила. В этом случае измеряется емкость незаземленного конца оборванной жилы C_1 и емкость C целой жилы линии, длина которой L известна. Расстояние до зоны повреждения определяется по формуле

$$l_x = \frac{LC_1}{C};$$

в) оборванная жила кабеля (с одной стороны) и две другие имеют глухое заземление. Измеряется емкость незаземленного конца оборванной линии C_1. Расстояние до зоны повреждения ориентировочно находится через удельную емкость жилы кабеля $C_{уд}$, мкФ/м, по отношению к другим заземленным жилам (см. табл. 3-11)

$$l_x = \frac{C_1}{C_{уд}}.$$

При этом виде повреждения измерение через удельную емкость целесообразно производить при длине кабеля не более 200 м.

Если переходное сопротивление в месте повреждения велико, не менее 20 мОм (чистый обрыв), то емкость может быть измерена

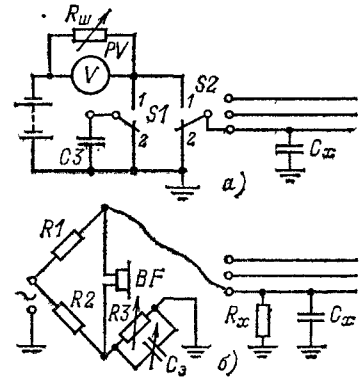


Рис. 3-48. Схемы определения емкости поврежденного участка кабеля.

а — на постоянном; *б* — на переменном токе.

мостом постоянного тока (рис. 3-48, *а*). Заряжая через баллистический гальванометр от одного напряжения сначала эталонный конденсатор и замечая отброс стрелки гальванометра α_1, а затем емкость поврежденной жилы кабеля и отмечая показание гальванометра α_2, можно определить емкость поврежденной жилы кабеля

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} C_э.$$

Шунт $R_ш$ служит для изменения чувствительности гальванометра. Измерение проводят 3—4 раза и берут среднее значение показаний гальванометра. Перед каждым измерением емкости разряжают установкой переключателей *S1* и *S2* в положении *2*.

Если переходное сопротивление в месте повреждения меньше 20 мОм и более 5 кОм, то емкость измеряется непосредственно мостом переменного тока. Наибольшее применение получили мосты переменного тока с питанием от генератора звуковой частоты (около 1000 Гц, 10—20 В·А) и измерителем в виде телефона *BF* (рис. 3-48, *б*) или стрелочного индикатора, включенного через усилитель переменного тока. Уравновешивая мост с помощью R_1, R_2, R_3, $C_э$ по значению и фазе напряжения, добиваются минимальной слышимости или минимального отклонения стрелки индикатора, что соответствует равновесию плеч моста $R_1/R_2 = C_x/C_э$ или $C_x = C_э R_1/R_2$.

Точность метода резко снижается при переходном сопротивлении в месте повреждения менее 5 кОм.

Акустический метод применяют для обнаружения мест повреждений в кабельных линиях непосредственно на трассе при всех видах повреждений с условием, что в месте повреждения может быть создан электрический разряд. Сущность метода заключается в прослушивании или фиксации с помощью приборов с поверхности земли звуковых колебаний, возникающих над местом повреждения при электрическом разряде. Этот метод обычно применяется для обнаружения повреждений на коротких (до 100 м) кабелях, проложенных в земле или воде и для уточнения места повреждения, определенного другим методом. В зависимости от вида повреждения кабельной линии собирают одну из схем, приведенных на рис. 3-49. Во всех схемах используют выпрямительную установку высокого напряжения, позволяющую получить напряжение не меньше испытательного для проверяемого типа кабеля.

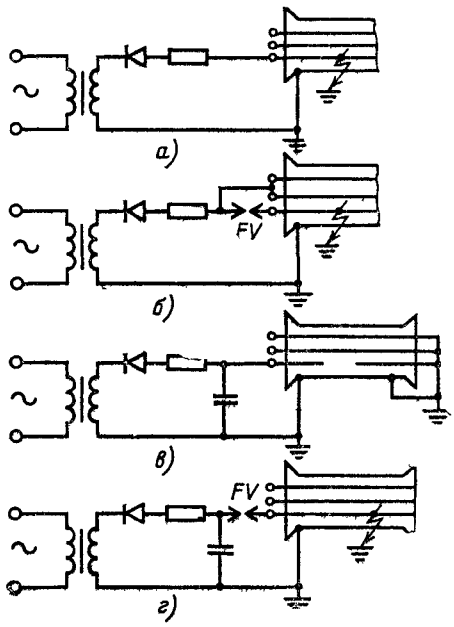


Рис. 3-49. Схемы определения мест повреждений акустическим методом.

а — при заплывающем пробое; *б* — с использованием емкости неповрежденных жил кабеля; *в* — при обрыве жилы кабеля; *г* — при устойчивом замыкании жилы на оболочку кабеля.

При заплывающих пробоях применяют схему рис. 3-49, *а*. Напряжение от выпрямительной установки подают непосредственно на поврежденную жилу; оно может быть доведено до испытательного.

Для других видов повреждений применяют схемы с накопителями энергии, в качестве которых используют емкость неповрежденных жил кабеля (рис. 3-49, *б*) (обычно кабелей напряжением 35 кВ) или конденсаторы высокого напряжения емкостью 1—2 мкФ, редко больше, например типов ИМ, ИМН, ИК и другие, применяемые раздельно или в виде батарей.

Запасенная в емкости энергия

$$W = \frac{CU^2}{2},$$

где C—емкость конденсатора высокого напряжения, мкФ; U — напряжение пробоя, кВ, расходуется для создания мощных кратковременных разрядов в месте повреждения с периодичностью примерно 1 имп/с.

При обрыве жилы (рис. 3-49, *в*) напряжение пробоя определяет переходное сопротивление в месте повреждения. Для получения устойчивых разрядов поврежденная и неповрежденная жилы на противоположном конце кабеля должны быть заземлены.

В случае устойчивого замыкания между жилой и оболочкой кабеля используют схему рис. 3-49, *г*, в которой напряжение пробоя определяет разрядник *FV* высокого напряжения любой конструкции. Устанавливается разрядник возможно ближе к концевой разделке кабеля. Напряжение пробоя рекомендуется устанавливать не более 70 % испытательного напряжения. Увеличение напряжения импульса может вызвать повреждения в слабых местах изоляции кабеля при удвоении амплитуды посылаемого импульса у разомкнутого конца, если пробоя в месте повреждения не произошло.

Рекомендуемые напряжения пробоя разрядников не более 8, 25, 30 и 40 кВ для кабелей с рабочим напряжением до 1, 6, 10 и 35 кВ соответственно. Практически возникновение устойчивого разряда в месте повреждения не менее 40 Ом. При меньших значениях переходного сопротивления проводящий мостик разрушают пропусканием больших разрядных токов, а металлические спаи выжигают с помощью сварочных трансформаторов.

Слышимость звука разряда с поверхности земли зависит от глубины залегания кабеля, состояния грунта, вида повреждения кабеля и мощности разрядного импульса (глубина прослушивания колеблется в пределах от 1 до 5 м).

Если грунт твердый, при повреждении внешней оболочки кабеля зона слышимости больше. С большим успехом метод применяется для обнаружения повреждений подводных кабелей. В этом случае зона слышимости может достигать 0,5—1 км. Применение метода на открыто проложенных кабелях или в кабельных каналах и коллекторах не рекомендуется, так как из-за хорошего распространения звука по металлической оболочке кабеля можно допустить большую ошибку в определении места повреждения, а протекающие в момент разряда большие импульсные токи могут вызвать искрение в местах соприкосновения оболочки кабеля с заземленными металлическими конструкциями и другими кабелями, что может привести к загоранию краски, покрытия кабеля и т. д.

Для поиска места пробоя акустическим методом обычно предварительно относительными методами уточняется зона повреждения и в ней места расположения соединительных муфт — наиболее вероятных мест повреждения. Устанавливая акустический датчик на грунт через каждые 1—2 м по ходу трассы в зоне повреждения производят прослушивание.

Датчик пьезо- или электромагнитной системы преобразует механические колебания грунта в электрические сигналы, поступающие на вход усилителя звуковой частоты. Над местом повреждения сигнал наибольший.

Для акустического прослушивания обычно используют кабелеискатели, позволяющие одновременно производить уточнение трассы кабеля индукционным методом.

Индукционный метод применяют: для непосредственного отыскания на трассе кабеля мест повреждения при пробое изоляции жил между собой или на землю, обрыве с одновременным пробоем изоляции между жилами или на землю; для определения трассы и глубины залегания кабеля; для определения местоположения муфт.

Сущность метода заключается в фиксации с поверхности земли с помощью приемной рамки (антенны) характера изменения магнитного поля над кабелем при пропускании по нему тока звуковой частоты (800—1200 Гц) от долей ампера до 20 А в зависимости от наличия помех и глубины залегания кабеля. Электродвижущая сила, наводимая в приемной рамке, зависит от токораспределения в кабеле и взаимного пространственного расположения рамки и кабеля. Зная характер изменения поля для данного токораспределения можно при соответствующей ориентации приемной рамки выявить трассу и место повреждения кабельной линии. Наиболее характерными являются случаи отыскания мест повреждения кабельных линий по цепям жила — земля при пробое изоляции жил на землю и жила — жила при пробое изоляции между жилами. Эти цепи можно использовать для отыскания трассы исправной кабельной линии, если заземлить противоположный конец используемой жилы или наложить перемычку между жилами. Отыскание места повреждения по цепи жила — земля требует большого навыка. Это вызвано тем, что в месте повреждения ток растекается по оболочке кабеля в обе стороны и может распространяться на десятки метров за местом повреждения.

Практически для отыскания индукционным методом однофазные повреждения переводят в двух- или трехфазные пути выжигания междуфазной изоляции в месте повреждения и определяют повреждение по цепи жила — жила или искусственно создают цепь жила — оболочка кабеля, разземляя последнюю с двух сторон и подключая генератор к жиле и оболочке.

Над местами повреждения магнитное поле вследствие перехода тока с одной жилы на другую или с жилы на оболочку усиливается и, следовательно, усиливается э. д. с., наводимая в рамке. На расстоянии примерно 0,5 м от места повреждения сигнал затухает. В сомнительных случаях генератор включают поочередно с обоих концов кабеля. При наличии дефекта сигнал будет прекращаться в одном и том же месте.

Силовые линии поля тока жила — земля представляют собой концентрические окружности, центром которых является ось кабеля (поле одиночного тока) (рис. 3-50).

При использовании цепи жила — жила ток, протекающий по прямому и обратному проводам, создает два концентрических маг-

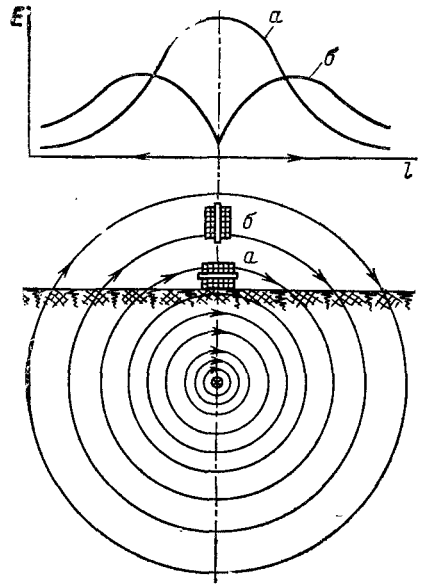


Рис. 3-50. Распределение магнитного поля одиночного тока и кривая изменения э. д. с. при горизонтальном (кривая *а*) и вертикальном (кривая *б*) положениях оси рамки.

нитных поля, действующих в противоположных направлениях (поле пары токов). При расположении жил в горизонтальной плоскости результирующее поле на поверхности земли наибольшее, а при расположении жил в вертикальной плоскости — наименьшее. Поскольку кабели имеют скрутку жил, то в приемной рамке, расположенной вертикально и перемещаемой вдоль трассы кабеля, будет индуктироваться э. д. с., изменяющаяся от минимума при вертикальном расположении жил (рис. 3-51, *а*) до максимума при горизонтальном расположении жил (рис. 3-51, *б*).

Отыскание трассы кабеля можно производить по максимуму или минимуму сигнала, наводимого в рамке, находящейся точно над осью кабеля. При расположении магнитной оси рамки горизонтально к поверхности земли величина индуктированной в рамке э. д. с. наибольшая, а при расположении оси рамки вертикально к поверхности земли — наименьшая. Незначительное отклонение от оси кабеля вызывает уменьшение э. д. с. (рис. 3-50 и 3-51, кривая *а*) для первого случая и увеличение э. д. с. (кривая *б*) для второго случая.

При перемещении приемной рамки вдоль оси кабеля э. д. с. будет меняться в зависимости от изменения глубины залегания кабеля, наличия муфт или из-за прокладки кабеля в трубах.

Увеличение глубины залегания кабеля и прохождения через трубы вызывают уменьшение э. д. с., а наличие муфты — увеличение за счет разводки жил в муфте. На практике чаще применяется способ определения трассы по минимуму сигнала, как менее зависящий от глубины залегания кабеля. Направление трассы кабеля определяют, располагая магнитную ось рамки по минимальной наводимой э. д. с.,

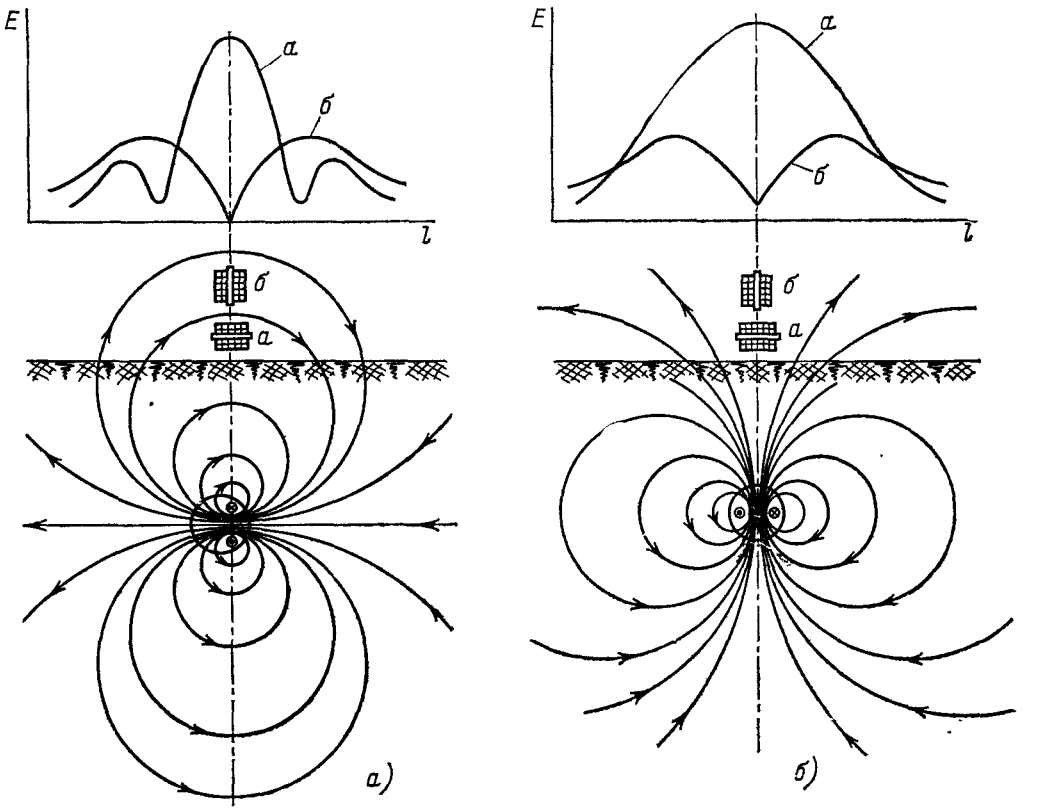


Рис. 3-51. Распределение магнитного поля пары токов при вертикальном (*а*) и горизонтальном (*б*) расположении жил и э.д. с., наводимая в рамке для горизонтального (кривая *а*) и вертикального (кривая *б*) положений оси рамки.

которая возникает при расположении оси рамки параллельно трассе кабеля. Для определения глубины залегания кабеля находят трассу кабеля, место трассы определяют чертой. Располагая ось рамки под углом 45° к вертикальной плоскости, проходящей через ось кабеля, отводят рамку в сторону от черты до момента отсутствия индуктированной в рамке э. д. с. Расстояние от этого места до трассы кабеля, отмеченной чертой равно глубине залегания кабеля.

Метод накладной рамки применяют для непосредственного обнаружения на кабеле места замыкания жилы на оболочку или жил между собой. Метод наиболее удобен при открытой прокладке кабеля; при закрытой прокладке необходимо отрыть несколько шурфов в зоне повреждения. Метод основан на том же принципе, что и индукционный. Возможности его обусловлены тем, что измерения производят непосредственно у оболочки кабеля, где интенсивность поля от пары токов жила — оболочка соизмерима с интенсивностью поля одиночного тока, протекающего по оболочке кабеля за место повреждения, что позволяет обнаруживать однофазные повреждения при протекании тока по цепи жила — земля. Генератор подключают к жиле и оболочке или между двумя жилами поврежденного кабеля и устанавливают через место замыкания ток 1—10 А. На кабель накладывают рамку с присоединенными к ней головными телефонами и поворачивают ее вокруг оси. Если рамка находится до места повреждения, то за один поворот рамки будут прослушиваться два максимума и два минимума сигнала от поля пары токов: жила — жила или жила — оболочка. При прослушивании за местом повреждения кабеля в течение всего поворота прослушивания будет слышен монотонный звук, обусловленный наличием поля одиночного тока. Таким образом, по изменению характера звучания находят место повреждения.

Применение описанного и индукционного методов затруднено, если переходное сопротивление в месте повреждения превышает несколько ом, а протяженность кабеля за местом повреждения более 1 км. В этом случае за местом повреждения возникает емкостный ток, создающий поле пары токов, затрудняющее прослушивание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3-1. **Сооружение** и эксплуатация кабельных линий/Баранов Б. М. и др. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1974. — 632 с.

3-2. **Городецкий С. С., Лакерник Р. М.** Испытание кабелей и проводов. — М.: Энергия, 1971.—272 с.

3-3. **Платонов В. В.** Аппаратура для выявления повреждений в силовых кабельных линиях. — М.: Энергия, 1972. — 160 с.

3-4. **Платонов В. В., Шалыт Г. М.** Испытание и прожигание силовых кабельных линий. — М.: Энергия, 1975. — 136 с.

3-5. **Электрические** измерения. — 4-е изд./ Под ред. А. В. Фремке. — Л.: Энергия, 1973.— 424 с.

3-6. **Крикун И. В.** Испытания заземляющих и зануляющих устройств электроустановок. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1973.— 80 с.

3-7. **Справочник** по электроизмерительным приборам/Под ред. К. К. Илюнина, — 2-е изд.— Л.: Энергия, 1977. — 832 с.

3-8. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка, А. П. Хечумяна. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1976. — 560 с.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

4-1. ИСПЫТАНИЯ И НАЛАДКА МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ПРИВОДОВ К НИМ

1. Измерение сопротивления изоляции подвижных и направляющих частей выключателей, выполненных из органических материалов, производится мегаомметром на напряжение 2500 В или методом измерения тока утечки. Сопротивление изоляции должно быть не ниже 1000 МОм для выключателей на номинальное напряжение 6—10 кВ и 3000 МОм для выключателей на номинальное напряжение 20—110 кВ.

2. Испытание вводов производится согласно § 4-12. При измерении тангенса угла диэлектрических потерь вводов после установки их на выключатель должна учитываться возможность повышения измеренной величины по сравнению с данными при отдельном испытании вводов за счет влияния внутрибаковой изоляции выключателя. Оценка состояния внутрибаковой изоляции и дугогасительных устройств производится для баковых масляных выключателей напряжением выше 35 кВ. Внутрибаковая изоляция подлежит сушке, если измеренное значение тангенса угла диэлектрических потерь в 2 раза превышает тангенс угла диэлектрических потерь вводов, измеренный при полном исключении влияния внутрибаковой изоляции и изоляции дугогасительных устройств, т. е. до установки вводов на выключатель.

3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты (50 Гц) изоляции высокого напряжения выключателя. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин, значение испытательного напряжения принимается по табл. 4-1.

4. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактов выключателей — производится микроомметром, двойным мостом или методом амперметра — вольтметра для главной цепи полюса выключателя. Сопротивление должно соответствовать данным табл. 4-2. Если измеренные значения выше указанных в табл. 4-2, необходимо произвести ревизию контактов, после чего повторить измерение;

б) обмоток включающей и отключающей катушек привода — производится одинарным мостом. Измеренные сопротивления постоянному току обмоток катушек должны соответствовать заводским данным. В случае отсутствия заводских данных допускается незначительное отличие измеренных величин от аналогичных проверяемых катушек;

Таблица 4-1

Испытательное напряжение промышленной частоты для изоляции высокого напряжения аппаратов

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, для аппаратов с изоляцией			
	нормальной керамической	нормальной из органических материалов	облегченной керамической	облегченной из органических материалов
6	32	28,8	21	18,9
10	42	37,8	32	28,8
20	65	58,5	—	—
35	95	85,5	—	—

Таблица 4-2

Сопротивления постоянному току контактов масляных выключателей

Тип выключателя	Номинальный ток, А	Сопротивление, мкОм
МКП-110М	630	1200
	1000	750
У-110-2000	2000	800
ВМП-10	600	55
	1000	40
ВМГ-10	630	75
ВМПП-10	630	55
	1000	45
	1600	32
ВМПЭ-10	630	50
	1000	40
	1600	30

Примечание. Для остальных типов выключателей сопротивления контактов постоянному току должны соответствовать данным завода-изготовителя.

в) шунтирующих сопротивлений дугогасительных устройств. Измеренные сопротивления не должны отличаться от заводских данных более чем на 3 %.

5. Измерение собственного времени включения и отключения выключателя. Собственное время включения — интервал времени с момента подачи команды на включение выключателя до замыкания контактов выключателя — определятся по схеме рис. 4-1, *а*.

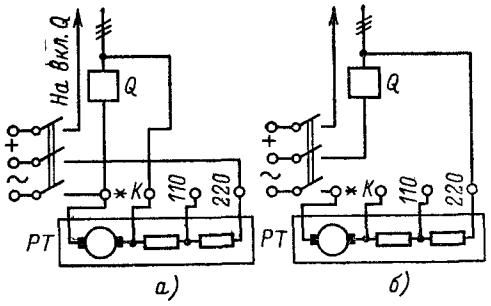


Рис. 4-1. Схема проверки работы выключателя.

а — времени включения; *б* — времени отключения; *РТ* — электрический секундомер; *Q* — масляный выключатель.

Собственное время отключения — интервал времени с момента подачи команды на отключение выключателя до размыкания контактов выключателя — определяется по схеме рис. 4-1, *б*.

Измерения производятся при номинальном напряжении оперативного тока.

Для выключателей, не имеющих дистанционного включения, определяется только собственное время отключения выключателя. Измеренные величины не должны отличаться от приведенных в табл. 4-3 более чем на ±10 %, в противном случае необходимо произвести ревизию выключателя с приводом, после чего измерения повторить.

Таблица 4-3

Временные характеристики масляных выключателей

Тип выключателя	Тип привода	Собственное время, с	
		отключения	включения
МКП-110М	ШПЭ-33	0,05	0,60
У-110-2000	ШПЭ-46-П	0,05	0,85
ВМП-10	Пружинный	0,10	0,20
ВМГ-10	ПЭ-11	0,12	0,30
ВМПП-10	Пружинный	0,10	0,20
ВМПЭ-10	Встроенный	0,09	0,30

Для остальных типов выключателей времена срабатывания должны соответствовать данным заводов-изготовителей.

Измерение временных характеристик производится для выключателей всех классов напряжения.

6. Измерение скорости движения подвижных контактов при включении и отключении выключателей производится при помощи вибрационного отметчика времени — вибрографа (рис. 4-2).

Виброграмма может быть получена двумя способами:

а) лента закрепляется непосредственно на штанге выключателя, несущей траверсу с контактами;

б) лента закрепляется на промежуточной подвижной детали выключателя (на тяге, валу и т. п.); в этом случае предварительно проводится градуировка ленты: размечается штан-

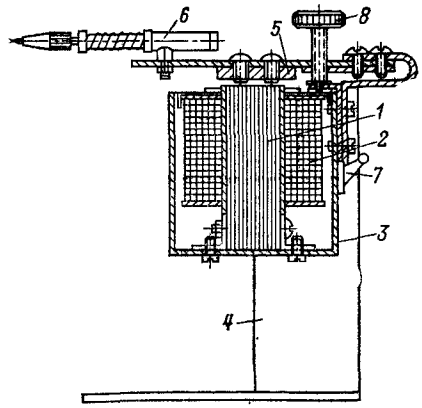


Рис. 4-2. Виброграф.

1 — сердечник; *2* — катушка; *3* — корпус; *4* — держатель; *5* — якорь; *6* — пишущее устройство; *7*—выключатель; *8* — винт регулировки резонанса.

га траверсы и при медленном включении выключателя вручную делаются отметки на ленте, соответствующие отключенному и включенному положению и моментам замыкания главных и дугогасительных контактов.

При снятии виброграммы включается питание катушки вибрографа и одновременно подается команда на включение (отключение) выключателя.

При обработке виброграмма разбивается на ряд участков. Длина каждого участка измеряется, а время движения траверсы на данном участке подсчитывается по числу полных периодов, расположенных на участке. Средняя скорость траверсы, м/с, на каждом участке

$$V_{ср} = s/t,$$

где s — длина участка, м; t — время движения на участке, с.

По полученным средним скоростям на каждом участке виброграммы строится кривая зависимости скорости траверсы выключателя от пути.

Пример обработки виброграммы, снятой по первому способу, приведен на рис. 4-3, *а*, по второму способу — на рис. 4-3, *б*.

На рис. 4-4 указаны примерные кривые для некоторых типов выключателей.

Скоростные характеристики выключателей (табл. 4-4) снимают при заполненных маслом баках, температуре окружающей среды не

Таблица 4-4

Скоростные характеристики масляных выключателей

Тип выключателя	Тип привода	Операции	Скорость движения подвижных контактов, м/с		
			максимальная	при замыкании (размыкании) контактов	
				главных	дугогасительных
МКП-110М	ШПЭ-33	Отключение	3,7±0,4	1,5±0,2	2,7±0,3
		Включение	3,4±0,4	2,3±0,3	3,7±0,4
У-110-2000	ШПЭ-44	Отключение	4,4±0,4	1,6±0,3	4,0±0,4
		Включение	3,5±0,4	1,8±0,2	3,5±0,4
ВМП-10	ПЭ-11	Отключение	5,0	3—3,8	—
		Включение	5,0	4,5±0,5	—
ВМГ-10	ПЭ-11	Отключение	3,3—3,9	2,1—2,7	—
		Включение	2,0—2,6	2,0—2,6	—
ВМПЭ-10	—	Отключение	4,0±0,5	3,4±0,4	—
		Включение	4,8±0,4	4,8±0,4	—

ниже +10 °С и номинальном значении напряжения оперативного тока или давления воздуха.

Снятие скоростных характеристик производится для выключателей на напряжение 35

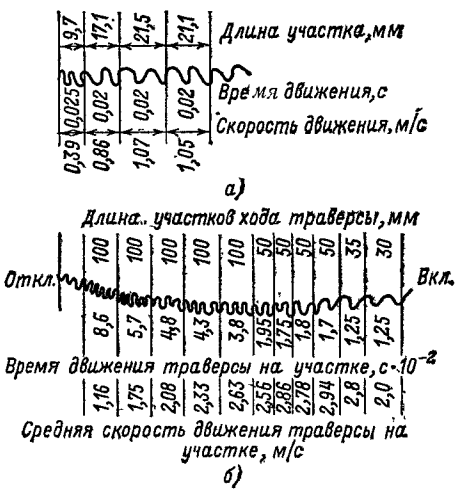


Рис. 4-3. Обработка виброграммы.

а — виброграмма снята по первому способу; *б* — виброграмма снята по второму способу.

кВ и выше, а также независимо от класса напряжения в тех случаях, когда это требуется инструкцией завода-изготовителя для данного типа выключателя.

Измеренные значения не должны отличаться от приведенных более чем на ±10 %, в противном случае необходимо произвести ревизию выключателя с приводом.

Для остальных типов выключателей скорости движения подвижных контактов устанавливаются согласно инструкциям заводов-изготовителей.

Полное время хода траверсы при включении определяется как сумма собственного времени включения и времени хода в контактах. Полное время хода траверсы при отключении определяется как сумма собственного времени

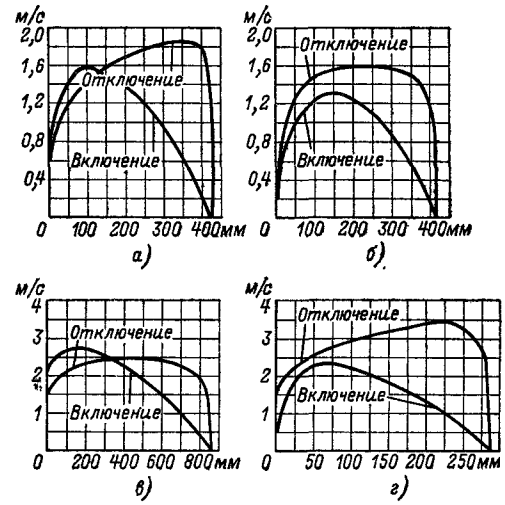


Рис. 4-4. Примерные кривые скорости движения траверсы выключателей в зависимости от пройденного пути.

а — МГГ-229; *б* — МГГ-223; *в* — МКП-160; *г*—МКП-35 (графики кривых отключения читаются слева направо; кривых включения — справа налево).

отключения и времени движения траверсы от момента размыкания контактов и до останова траверсы.

7. Проверка действия механизма свободного расцепления осуществляется на участке хода подвижных контактов при включении — от момента замыкания главной цепи выключателя до полного включенного положения.

При этом в соответствии с инструкциями заводов-изготовителей должны учитываться специфические требования конструкций приводов, определяющие необходимость проверки действия механизмов свободного расцепления при поднятом до упора плунжере электромагнита включения или при незаведенных пружинах (грузе).

8. Проверка напряжения (давления) срабатывания приводов выключателей производится (без тока в первичной цепи выключателя) с целью определения фактических значений напряжения на зажимах катушек приводов или давления сжатого воздуха пневмоприводов, при которых выключатели сохраняют работоспособность, т. е. выполняют операции включения и отключения от начала до конца.

Выключатели должны обеспечивать надежную работу при следующих значениях напряжения на зажимах электромагнитов приводов:

при отключении — 65—120 % номинального;

при включении выключателей — 80—110 % номинального (с током включения до 50 кА) и 85—110 % номинального (с током включения более 50 кА). Для выключателей с пневмоприводами диапазон изменения рабочего давления должен быть не менее 90—110 % номинального.

9. Испытание выключателя многократными включениями и отключениями производится при напряжении на зажимах электромагнитов:

включения — 110, 100, 80 (85) % номинального и минимальном напряжении срабатывания;

отключения — 120, 100, 65 % номинального и минимальном напряжении срабатывания.

Количество операций включения и отключения при пониженном и повышенном напряжениях должно быть 3—5, а при номинальном напряжении 10. Кроме того, выключатели следует подвергнуть 3—5-кратному опробованию в цикле включение — отключение В — О (без выдержки времени), а выключатели, предназначенные для работы в режиме АПВ, также 2—3-кратному опробованию в циклах О — В и О — В — О. Работа выключателя в этих циклах должна проверяться при номинальном и пониженном до 80 % (85 %) номинального напряжениях на зажимах электромагнитов приводов.

Если по условиям работы источника питания оперативного тока не представляется возможным увеличить его напряжение и произвести испытание выключателя при напряжении, равном 110—120 % номинального, то допускается проведение испытания при том напряжении выше номинального на зажимах катушек привода, которое может быть получено.

10. Испытание трансформаторного масла у баковых выключателей всех классов напряжений и маломасляных выключателей напряжением 110 кВ и выше производится до и после заливки масла в выключатели.

У маломасляных выключателей до 35 кВ включительно масло испытывается только до заливки в дугогасительные камеры. Испытание масла производится в соответствии с § 4-10.

11. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей производится мегаомметром с напряжением 1000—2500 В со всеми присоединенными аппаратами и включающей и отключающей катушками выключателя. Сопротивление изоляции должно быть не менее 1 МОм.

12. Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток включающей и отключающей катушек производится повышенным напряжением 1000 В промышленной частоты. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин. Это испытание может быть заменено измерением одноминутного сопротивления изоляции мегаомметром на напряжение 2500 В. Если сопротивление изоляции меньше 1 МОм, то испытание повышенным напряжением промышленной частоты 1000 В является обязательным.

4-2. ИСПЫТАНИЯ И НАЛАДКА ВОЗДУШНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

1. Измерение сопротивления изоляции опорных изоляторов, изоляторов дугогасительных камер, отделителей и изолирующих тяг производится мегаомметром на напряжение 2500 В или от источника напряжения выпрямленного тока. Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции приведены в табл. 4-5.

Таблица 4-5

Наименьшие допустимые сопротивления изоляции воздушных выключателей

Испытуемый элемент	Сопротивление изоляции, МОм, при номинальном напряжении выключателя, кВ		
	до 15	20—35	110 и выше
Опорный изолятор, воздухопровод и тяга (каждый элемент в отдельности), изготовленные из фарфора	1000	5000	5000
Тяга, изготовленная из органических материалов	—	3000	—

Для опорных изоляторов, изоляторов дугогасительных камер и отделителей измерение в случае необходимости производится с установкой экранов на внешней поверхности.

2. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей, включающей и отключающей катушек выключателя производится в соответствии с § 4-1, п. 11.

3. Испытание опорной изоляции выключателя, состоящей из многоэлементных изоляторов, повышенным напряжением промышленной частоты (50 Гц) производится приложением напряжения 50 кВ к каждому элементу изолятора. Опорная цельнофарфоровая изоляция выключателей испытывается повышенным напряжением промышленной частоты (50 Гц) согласно нормам § 4-12. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин. Испытание обязательно для выключателей напряжением до 35 кВ включительно.

4. Испытание повышенным напряжением изоляции вторичных цепей, включающей и отключающей катушек выключателя производится в соответствии с § 4-1, п. 12.

5. Измерение сопротивления постоянному току контактов выключателя производят для каждого контакта дугогасительной камеры, отделителя, ножа и т. п. в отдельности. Для измерения применяют микроомметр, двойной мост или метод амперметра — вольтметра.

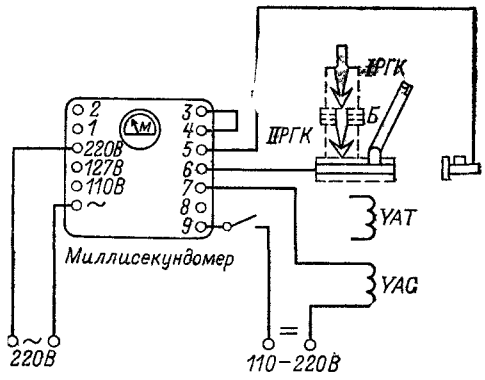


Рис. 4-5. Схема измерения собственного времени включения воздушного выключателя.

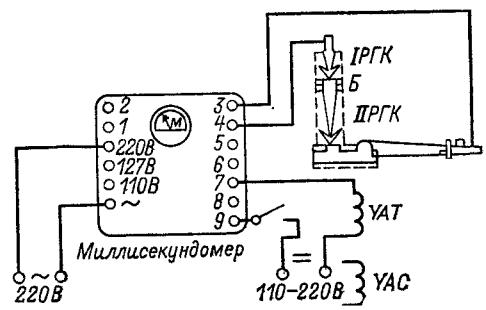


Рис. 4-6. Схема измерения собственного времени отключения воздушного выключателя.

Сопротивление постоянному току контактов должно быть не более значений, указанных заводом-изготовителем. Если измеренные величины выше указанных заводом, необходимо произвести ревизию контактов, после чего повторить измерение.

6. Измерение сопротивления постоянному току обмоток включающей и отключающей катушек производится при помощи одинарного моста. Измеренные величины должны соответствовать заводским данным.

7. Проверка временных характеристик выключателя. Измерение собственного времени включения и отключения выключателя производят при помощи электрического миллисекундомера (схемы приведены для миллисекундомера типа ЭМС-54) по схемам, приведенным на рис. 4-5 (включение) и 4-6 (отключение).

Измерение разновременности размыкания контактов дугогасительных камер производят при помощи электрического миллисекундомера по схемам, приведенным на рис. 4-7 и 4-8.

Если стрелка прибора при испытании по схеме рис. 4-7 остается на нуле, это означает, что либо контакты размыкаются одновременно, либо контакт первого разрыва (*IPГК*) размыкается позднее контакта второго разрыва (*IIPГК*). В этом случае необходимо испытания провести по схеме, приведенной на рис. 4-8.

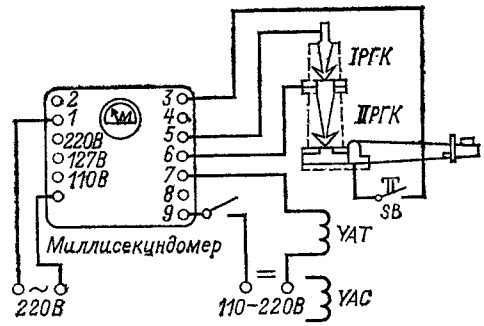


Рис. 4-7. Схема измерения разновременности размыкания контактов воздушного выключателя.

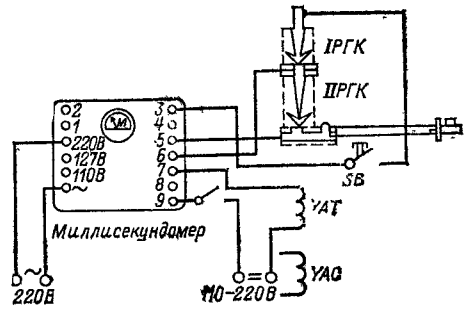


Рис. 4-8. Схема измерения разновременности размыкания контактов воздушного выключателя.

Блокирующая кнопка *SB* (рис. 4-7 и 4-8) устанавливается под ножом отделителя так, чтобы при включенном ноже отделителя она находилась в замкнутом состоянии, а при отключенном в разомкнутом.

У выключателей с числом дугогасящих разрывов больше двух неодновременность размыкания контактов дугогасительных камер сначала определяется для первого и второго разрывов аналогично описанному, затем для контактов второго и третьего разрывов и т. д. При этом контакты всех разрывов, кроме испытуемой пары, должны быть надежно закорочены.

Измерение бесконтактной паузы дугогасительной камеры (времени, в течение которого контакты дугогасительной камеры находятся в разомкнутом положении) производится по схеме рис. 4-9. Измерение производится отдельно для каждого разрыва. Измерение времени запаздывания ножа отделителя при отключении

(времени от момента размыкания контактов дугогасительной камеры до момента выхода ножа отделителя из неподвижного контакта) производится по схеме рис. 4-10.

На рис. 4-5—4-10 *YAT* — отключающая катушка, *YAC* — включающая катушка воздушного выключателя.

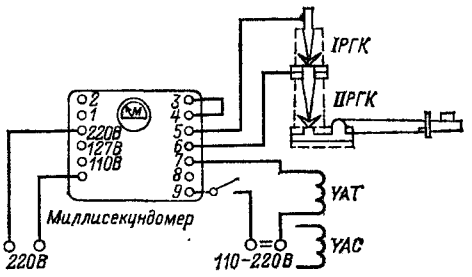


Рис. 4-9. Схема измерения времени бесконтактной паузы дугогасительной камеры воздушного выключателя.

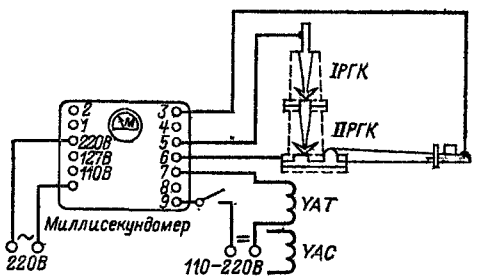


Рис. 4-10. Схема измерения времени запаздывания ножа отделителя при отключении воздушного выключателя.

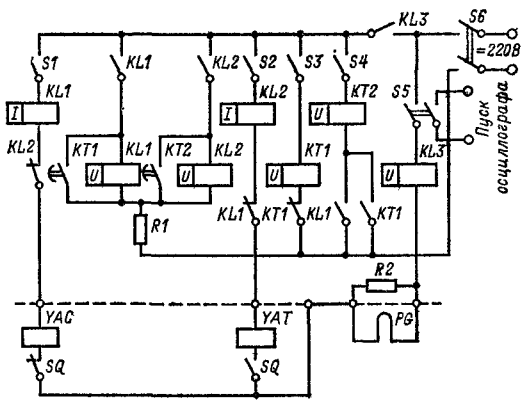


Рис. 4-11. Схема для осциллографирования работы воздушных выключателей.

KL1, *KL2*, *KL3* — реле промежуточное; *KT1*, *KT2* — реле времени, *R1* — резистор 800 Ом, 50 Вт; *R2* — резистор (шунт) 0,1 Ом, 20 А; *YAC* — включающая катушка воздушного выключателя; *YAT* — отключающая катушка воздушного выключателя; *SQ* — сигнально блокировочные контакты воздушного выключателя; *PG* — гальванометр осциллографа.

Шунтирующие сопротивления у дугогасительных камер на время проведения испытаний должны быть отключены.

Измерение скорости движения ножа отделителя производится при помощи вибрографа. Методика измерений изложена в § 4-1.

Проверка временны́х характеристик воздушных выключателей может производиться также при помощи светолучевого осциллографа. Для сокращения времени на обработку ос-

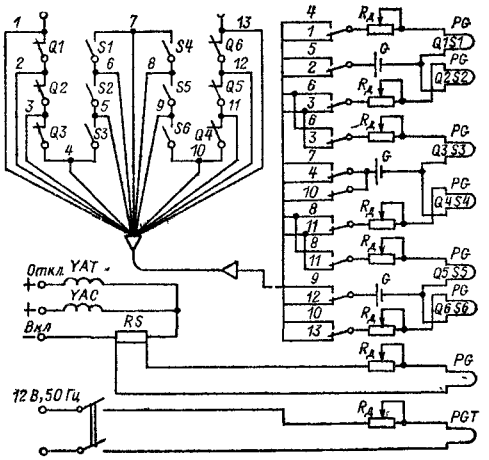


Рис. 4-12. Схема для осциллографирования работы контактов воздушного выключателя.

Q1—Q6 — контакты дугогасительных камер; *S1—S6* — контакты отделителей; *PG* — гальванометры осциллографа; *PGT* — отметчик времени; *YAT* — отключающая катушка; *YAC* — включающая катушка; *RS* — шунт; $R_д$ — резистор.

циллограмм желательно использовать осциллограф с ультрафиолетовой записью и также специальный щиток для управления работой выключателя и осциллографа (рис. 4-11). Схема соединений для осциллографирования работы выключателя приведена на рис. 4-12. Скорость движения фотоленты осциллографа примерно 2,5 м/с.

На рис. 4-13 приведена осциллограмма операции «отключение» выключателя. По этой осциллограмме можно определить:

собственное время отключения выключателя — от момента подачи команды на отключение (точка *а*) до момента размыкания последнего контакта дугогасительной камеры (точка *в*);

разновременность размыкания контактов — от точки *б* до точки *в*;

опережение размыкания контактов дугогасительных камер — (от точки *в*) до момента размыкания первого контакта отделителя (точка *г*);

разновременность размыкания контактов отделителей — от точки *г* до точки *д*;

бесконтактную паузу дугогасительных камер — от момента размыкания контактов данной камеры (участок между точками *б—в*) до первого вибрационного смыкания контактов этой же камеры (точка *е*);

длительность вибрации контактов камеры при их смыкании (от точки *е* до точки *ж*);

Таблица 4-6

Количество операций при испытаниях воздушных выключателей многократным включением и отключением

Операция или цикл	Давление воздуха при опробовании выключателя	Количество выполняемых операций и циклов
Включение (В), отключение (О)	Минимальное давление срабатывания	3
То же	Минимальное рабочее	3
» »	Номинальное[1]	3
» »	Максимальное рабочее	2
Цикл В—О	Минимальное срабатывания	2
То же	Минимальное рабочее[1]	2
» »	Максимальное рабочее[1]	2
Цикл О—В (АПВ успешное)	Минимальное для АПВ	2
	Номинальное[1]	2
Цикл О—В—О (АПВ неуспешное)	Минимальное для АПВ	2
	Максимальное рабочее	2

[1] Должны сниматься осциллограммы работы выключателей.

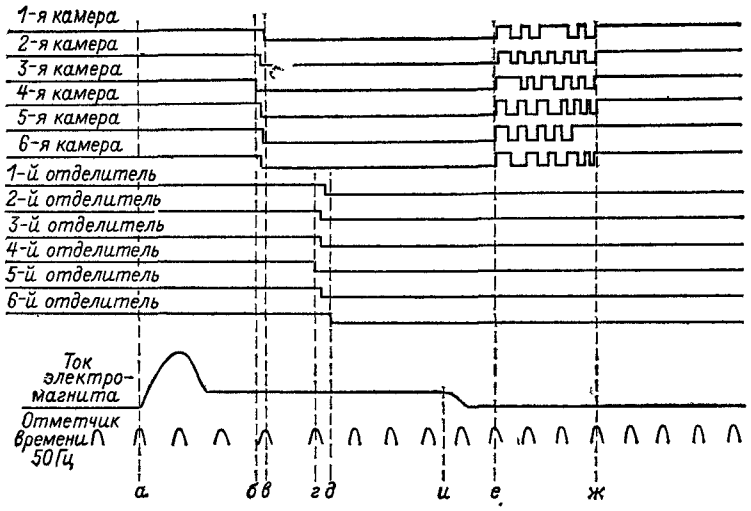


Рис. 4-13. Осциллограмма работы контактов воздушного выключателя при отключении.

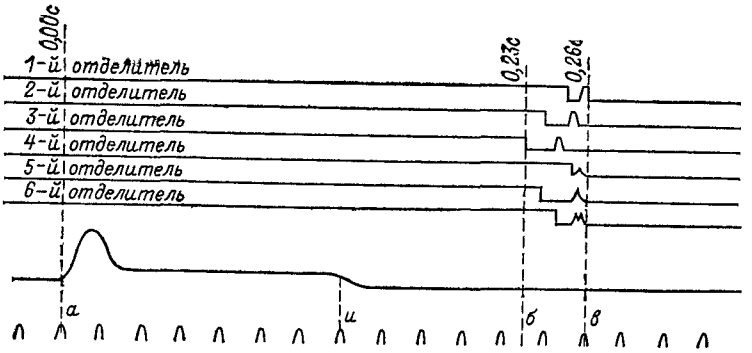


Рис. 4-14. Осциллограмма работы контактов воздушного выключателя при включении.

длительность отключающей команды (от точки *а* до точки *и*).

По осциллограмме процесса включения выключателя рис. 4-14 определяют:

собственное время включения — от момента подачи команды на включение выключателя (точка *а*) до момента первого вибрационного замыкания контакта ножа отделителя данного полюса (участок *б—в*);

разновременность замыкания контактов отделителя (участок *б—в*);

длительность включающей команды (от точки *а* до точки *и*).

Определенные указанными способами временные характеристики выключателя должны соответствовать данным завода-изготовителя.

8. Проверка срабатывания привода выключателя при пониженном напряжении оперативного тока производится при максимальном давлении воздуха в баках; напряжение срабатывания электромагнитов управления должно быть не более 65 % номинального.

9. Испытание выключателя многократным включением и отключением. Количество операций, выполняемых при разных значениях давления воздуха, приведено в табл. 4-6.

4-3. ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ДУГОГАСЯЩИХ КАТУШЕК И МАСЛЯНЫХ РЕАКТОРОВ

1. Измерение характеристик изоляции производится при температуре изоляции не ниже 10 °С не ранее, чем через 12 ч после окончания заливки трансформатора маслом. Перед измерением необходимо протереть поверхность вводов трансформаторов. При измерениях во влажную погоду рекомендуется применять экраны. Измерение всех характеристик изоляции производится по схемам, приведенным в табл. 4-7.

При измерении все выводы обмоток одного напряжения соединяют вместе. Остальные обмотки и бак трансформатора должны быть заземлены. Вначале измеряют сопротивление изоляции, затем — остальные характеристики изоляции трансформатора.

Таблица 4-7

Схемы измерения характеристик изоляции трансформаторов

Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора
Двухобмоточные трансформаторы	
НН	Бак, ВН
ВН	Бак, НН
ВН+НН	Бак
Трехобмоточные трансформаторы	
НН	Бак, СН, ВН
СН	Бак, ВН, НН
ВН	Бак, НН, СН
ВН+СН	Бак, НН
ВН+СН+НН	Бак

За температуру изоляции трансформатора, не подвергавшегося нагреву, принимается температура верхних слоев масла. Для трансформаторов без масла — температура, замеренная термометром, установленным в кармане термосигнализатора на крышке бака. При этом карман следует заполнить трансформаторным маслом.

Если температура масла ниже 10 °С, то для измерения характеристик изоляции трансформатор должен быть нагрет.

При нагреве трансформатора температура изоляции принимается равной средней температуре обмотки ВН, определяемой по сопротивлению обмотки постоянному току. Измерение указанного сопротивления производится не ранее, чем через 60 мин после прекращения нагрева током в обмотке или через 30 мин после прекращения внешнего нагрева.

Вопрос о допустимости включения трансформатора без сушки должен решаться по результатам испытаний по пп. 2—4 с учетом условий, в которых находился трансформатор до монтажа и во время монтажа.

При неудовлетворительных результатах испытаний по одному из пп. 2—4 возможность включения трансформатора без сушки определяется инструкцией завода-изготовителя или инструкцией «Транспортирование, хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию силовых трансформаторов на напряжение до 35 кВ без ревизии их активных частей» ОАХ 458.003—70 и «Инструкцией по транспортировке, выгрузке, хранению, монтажу и введению в эксплуатацию силовых трансформаторов общего назначения на напряжение 110—500 кВ» РТМ 16-687.000—73.

2. Сопротивление изоляции измеряется по схемам табл. 4-7 мегаомметром 2500 В. Перед началом измерения испытуемая обмотка должна быть заземлена на время не менее 5 мин.

Показания мегаомметра считываются через 15 и 60 с после приложения напряжения к изоляции обмотки. Допускается за начало отсчета принимать начало вращения рукоятки мегаомметра.

По результатам измерения сопротивления изоляции определяется коэффициент абсорбции R_{60}/R_{15}, где R_{60} — значение сопротивления изоляции, считанное через 60 с после приложения напряжения (одноминутное значение сопротивления изоляции); R_{15} — значение сопротивления изоляции, считанное через 15 с после приложения напряжения (15-секундное значение сопротивления изоляции).

Значения R_{60} для вновь вводимых трансформаторов классов напряжения обмотки ВН до 35 кВ включительно, залитых маслом с характеристиками по табл. 4-30, должны быть не менее значений, указанных в табл. 4-8.

Для трансформаторов класса напряжения 110—150 кВ R_{60} изоляции, определенное при температуре заводских испытаний или приведенное к одинаковой температуре (если температура при измерении отличается от заводской), должно быть не менее 70 % значения, указанного в паспорте трансформатора.

Таблица 4-8

Наименьшие допустимые значения сопротивлений изоляции R_{60} обмоток трансформатора

Мощность трансформатора	Значение R_{60}, МОм, при температуре обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
До 6300 кВ·А включительно	450	300	200	130	90	60	40
10 000 кВ·А и более	900	600	400	260	180	120	80

Примечание. Значения R_{60} относятся ко всем обмоткам данного трансформатора.

Для приведения значений R_{60}, измеренных на заводе-изготовителе, к температуре при измерении производится перерасчет с помощью коэффициента $k2$, приведенного в табл. 4-9. При приведении к более высокой температуре измеренное значение R_{60} надо умножить на соответствующее значение $k2$, а при приведении к более низкой температуре — разделить на $k2$.

Таблица 4-9

Значения коэффициента $k2$ для пересчета значений сопротивления изоляции R_{60}

Разность температур t_2-t_1, °С	$k2$	Разность температур t_2-t_1, °С	$k2$	Разность температур t_2-t_1, °С	$k2$
1	1,04	5	1,22	20	2,25
2	1,08	10	1,50	25	2,75
3	1,13	15	1,84	30	3,40
4	1,17				

Примечание. t_2 — наибольшая; t_1 — наименьшая температура.

Для сухих силовых трансформаторов R_{60} при температуре 20—30 °С должно быть не ниже значений, указанных в табл. 4-10; в противном случае трансформатор должен быть подвергнут сушке.

Таблица 4-10

Наименьшие допустимые значения сопротивлений изоляции R_{60} обмоток сухих трансформаторов

Номинальное напряжение трансформаторов, кВ	Сопротивление изоляции, МОм
До 1	100
6	300
10	500

Коэффициент абсорбции R_{60}/R_{15} обмоток для трансформаторов мощностью менее 10 000 кВ·А, напряжением до 35 кВ включительно при температуре от 10 до 30 °С должен быть не ниже 1,3.

3. Измерение емкости и tgδ изоляции обмоток производят по схемам табл. 4-7 мостом переменного тока по перевернутой схеме. Измерения на трансформаторах, залитых маслом, допускается производить при напряжении переменного тока (50±5 Гц), не превышающем 60 % значения испытательного напряжения испытуемой обмотки, при котором производились измерения на заводе-изготовителе, но не выше 10 кВ.

Значения tgδ, %, изоляции обмоток для вновь вводимых в эксплуатацию трансформаторов классов напряжения до 35 кВ включительно, залитых маслом, не должны превышать значений, указанных в табл. 4-11.

Для трансформаторов классов напряжения 110—150 кВ значение tgδ изоляции обмоток при температуре заводских испытаний или приведенное к одинаковой температуре (если температура при измерении отличалась от заводской) должно быть не более 130 % значений, указанных в паспорте трансформатора.

Для приведения значений tgδ, измеренных на заводе-изготовителе и при наладке, к одинаковой температуре производится пересчет с помощью коэффициента $k1$, значения которого приведены в табл. 4-12.

4. Измерения отношений C_2/C_{50} и $\Delta C/C$ производят при помощи специальных приборов (ЕВ-3 или ПКВ7) по схемам табл. 4-7.

Перед измерениями испытуемая обмотка должна быть заземлена на время не менее 5 мин.

Значения отношения C_2/C_{50} для вновь вводимых трансформаторов класса напряжения до 35 кВ включительно, залитых маслом с характеристиками по табл. 4-30, измеренные при наладке, не должны превышать значений, указанных в табл. 4-13.

Значения отношения $\Delta C/C$ для трансформаторов на напряжение 110 кВ, транспортируемых без масла, и измеренные по прибытии трансформатора на место монтажа не нормируются, но должны использоваться в качестве исходных данных в эксплуатации.

5. Измерение сопротивления обмоток постоянному току. Измеряются междуфазные сопротивления на всех ответвлениях обмоток всех фаз. При наличии нулевого вывода дополнительно измеряется одно из фазных сопротивлений.

Измерения производятся мостовым методом или методом амперметра — вольтметра

Таблица 4-11

Наибольшие допустимые значения tg δ изоляции обмоток трансформаторов на напряжение до 35 кВ включительно, залитых маслом

Мощность трансформатора, кВ·А	Температура обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	70
До 6300 включительно	1,2	1,5	2,0	2,5	3,4	4,5	6,0
10 000 и более	0,8	1,0	1,3	1,7	2,3	3,0	4,0

Примечание. Значения tg δ относятся ко всем обмоткам данного трансформатора.

Таблица 4-12

Значения коэффициента $k1$ для пересчета

Разность температур t_2-t_1, °С	$k1$	Разность температур t_2-t_1, °С	$k1$	Разность температур t_2-t_1, °С	k_1
1	1,03	5	1,15	20	1,75
2	1,06	10	1,31	25	2,0
3	1,09	15	1,51	30	2,3
4	1,12				

Примечания: 1. Значения $k1$ для разности температур, не указанной в табл. 4-12, определяются умножением соответствующих коэффициентов таблицы. Например, $k1$, соответствующий разности температур 8 °С, определяется следующим образом: $k_{8^\circ}=k_{5^\circ}\,k_{3^\circ}=1{,}15\cdot1{,}09=1{,}25$.

2. t_2 — максимальная; t_1 — минимальная температура.

Таблица 4-13

Наибольшие допустимые значения C_2/C_{50} обмоток трансформаторов на напряжение до 35 кВ включительно, залитых маслом

Мощность трансформатора, кВ·А	Температура обмотки, °С		
	10	20	30
До 6300 включительно	1,1	1,2	1,3
10 000 и более	1,05	1,15	1,25

(рис. 4-15). При измерении малых сопротивлений (единиц ома и ниже) провода цепи вольтметра подсоединяют к зажимам трансформатора непосредственно. Одновременно измеряется температура обмотки. За температуру обмотки длительно отключенного масляного трансформатора принимается температура верхних слоев масла в трансформаторе.

Ток при измерениях, как правило, не должен превышать 20 % номинального тока обмотки. При кратковременных (длительностью до 1 мин) измерениях допускается увеличивать ток более чем на 20 %.

Измеренное сопротивление не должно отличаться более чем на 2 % от сопротивления, полученного на том же ответвлении для других фаз, или заводских данных, если нет особых указаний в паспорте трансформатора.

Для сравнения измеренные сопротивления должны быть приведены к одной и той же температуре по следующим формулам:

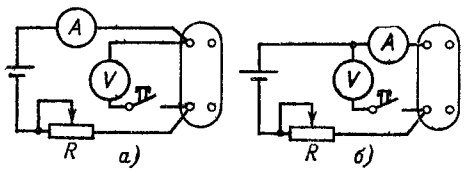


Рис. 4-15. Схема измерения сопротивления постоянному току обмотки трансформатора методом амперметра — вольтметра.

а — для малых сопротивлений; *б* — для больших сопротивлений.

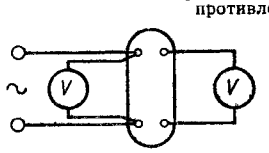


Рис. 4-16. Схема измерения коэффициента трансформации.

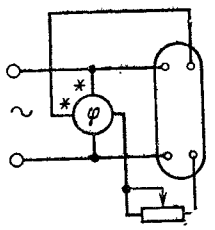


Рис. 4-17. Схема проверки группы соединения трансформатора фазометром.

для обмоток из алюминия

$$R_2 = R_1\frac{245+t_2}{245+t_1};$$

для обмоток из меди

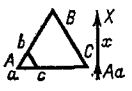
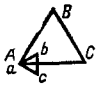
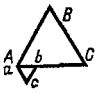
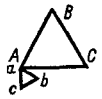
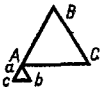
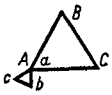
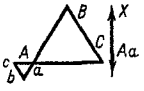
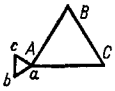
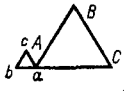
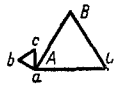
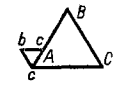
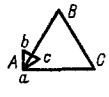
$$R_2 = R_1\frac{235+t_2}{235+t_1},$$

где R_2 — сопротивление, приводимое к температуре t_2; R_1 — сопротивление, измеренное при температуре t_1.

6. Измерение коэффициента трансформации производят методом двух вольтметров на всех ответвлениях обмоток и для всех фаз (рис. 4-16). При испытании трехобмоточных трансформаторов коэффициент трансформации достаточно проверять для двух пар обмоток.

Таблица 4-14

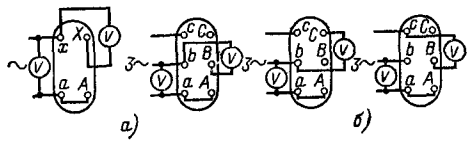
Векторные диаграммы и расчетные формулы для определения группы соединений трансформаторов

Группа соединений	Угловое смещение э. д. с.	Возможные соединения обмоток	Векторная диаграмма линейных э. д. с.	$U_{b-B}(U_{x-X})$*	U_{b-C}	U_{c-B}
0	0°	УУ; ДД		$U_{нн}(K-1)$	$U_{нн}\sqrt{1-K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-K+K^2}$
1	30	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$
2	60	УУ; ДД		$U_{нн}\sqrt{1-K+K^2}$	$U_{нн}(K-1)$	$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$
3	90	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$
4	120	УУ; ДД		$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-K+K^2}$	$U_{нн}(1+K)$
5	150	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$
6	180	УУ; ДД		$U_{нн}(1+K)$	$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$
7	210	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$
8	240	УУ; ДД		$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$	$U_{нн}(1+K)$	$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$
9	270	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$
10	300	УУ; ДД		$U_{нн}\sqrt{1-K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K+K^2}$	$U_{нн}(K-1)$
11	330	УД; ДУ		$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1+K^2}$	$U_{нн}\sqrt{1-\sqrt{3}K+K^2}$

* Для однофазных трансформаторов (группы соединений 0 и 6).

Подводимое напряжение не должно превышать номинального и не должно быть слишком малым (не ниже 1 % номинального).

Допускается проверку коэффициента трансформации производить по фазным напряжениям. В последнем случае измерения можно проводить как при трехфазном, так и при однофазном возбуждении трансформатора.



а) *б)*

Рис. 4-18. Схема проверки группы соединения трансформатора методом двух вольтметров.

а — однофазного; *б* — трехфазного.

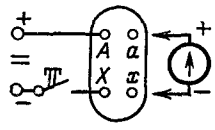


Рис. 4-19. Проверка группы соединения трансформатора методом импульсов постоянного тока.

В случае необходимости измерения по схеме рис. 4-16 производят через трансформаторы напряжения. Измеренный коэффициент трансформации не должен отличаться более чем на 2 % от коэффициента трансформации, полученного на том же ответвлении на других фазах, или от заводских данных, а для трансформаторов с РПН допуск не должен превышать значения ступени регулирования.

7. Проверка группы соединения трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов может производиться следующими методами.

Метод фазометра. Токовую обмотку однофазного фазометра подключают через реостат к зажимам одной из обмоток, а обмотку напряжения — к одноименным зажимам другой обмотки испытуемого трансформатора (рис. 4-17).

К одной из обмоток трансформатора подводится напряжение, достаточное для нормальной работы фазометра, который показывает угол сдвига между векторами напряжений обмоток.

При определении группы соединения трехфазных трансформаторов производят не менее двух измерений (для разных пар линейных зажимов).

Метод двух вольтметров. Соединяют зажимы *A* и *a* испытуемого трансформатора. К одной из обмоток подводят напряжение (обычно около 220 В) и измеряют последовательно напряжения между зажимами *в*—*B*; *в*—*C*; *с*—*B* при испытании трехфазных трансформаторов (рис. 4-18, *б*) и зажимами *x*—*X* при испытании однофазных трансформаторов (рис. 4-18, *а*).

Измеренные напряжения сравнивают с соответствующими расчетными напряжениями, вычисленными по формулам, приведенным в табл. 4-14, где $U_{нн}$ — линейное напряжение на зажимах обмотки низшего напряжения при данном испытании; K — коэффициент трансформации линейных напряжений.

Таблица 4-15

Показания гальванометра при определении группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Питание подведено к зажимам	Отклонение стрелки гальванометра, присоединенного к зажимам								
	ab	*bc*	*ca*	*ab*	*bc*	*ca*	*ab*	*bc*	*ca*
	для группы 0			для группы 4			для группы 8		
AB	+	−	−	−	−	+	−	+	−
BC	−	+	−	+	−	−	−	−	+
CA	−	−	+	−	+	−	+	−	−
	для группы 6			для группы 10			для группы 2		
AB	−	+	+	+	+	−	+	−	+
BC	+	−	+	−	+	+	+	+	−
CA	+	+	−	+	−	+	−	+	+
	для группы 11			для группы 3			для группы 7		
AB	+	0	−	0	−	+	−	+	0
BC	−	+	0	+	0	−	0	−	+
CA	0	−	+	−	+	0	+	0	−
	для группы 1			для группы 5			для группы 9		
AB	+	−	0	−	0	+	0	+	−
BC	0	+	−	+	−	0	−	0	+
CA	−	0	+	0	+	−	+	−	0

Если измеренные и расчетные значения указанных напряжений соответственно одинаковы, то группа соединений соответствует указанной в таблице.

Метод импульсов постоянного тока. Для однофазных трансформаторов: к обмотке высшего напряжения подводится напряжение постоянного тока 2—12 В, в обмотку низшего напряжения включается гальванометр (рис. 4-19).

Отклонение стрелки гальванометра вправо при включении цепи тока показывает, что группа соединения 0, отклонение влево—группа 6.

Для трехфазных трансформаторов к выводам *AB* обмотки высшего напряжения подводится напряжение постоянного тока 2—12 В. К выводам *ab*, *bc*, *ca* обмотки низшего напряжения поочередно подключается гальванометр. Отмечается отклонение стрелки гальванометра при включении источника питания и записывается в таблицу (отклонение вправо обозначается знаком плюс, влево — минус). Таким же образом подводится питание к выводам *BC* и *CA*, и записываются знаки отклонения гальванометра, подключаемого к выводам *ab*, *bc*, *ca*. Полученные результаты сравнивают с данными, приведенными в табл. 4-15.

При проверке группы соединения обмоток трансформатора необходимо строго следить за правильным подключением полярности источника тока и гальванометра. Таблица 4-15 составлена при условии, что плюсовой вывод источника тока и плюсовой зажим гальванометра подключаются к зажиму, обозначенно-

Таблица 4-16

Значения испытательных напряжений изоляции обмоток маслонаполненных трансформаторов с нормальной изоляцией

Класс напряжения обмотки, кВ	До 0,69	6	10	20	35	110
Испытательное напряжение, кВ	4,5	22,5	31,5	49,5	76,5	180

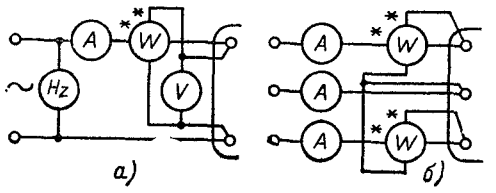


Рис. 4-20. Измерение потерь и тока холостого хода трансформатора.

а — однофазного; *б* — трехфазного.

му в таблице первым. Так, например, при определении отклонения стрелки гальванометра, подключенного к зажимам *са*, при подаче питания на зажимы *АВ* «плюс» гальванометра должен быть подключен к зажиму *с* трансформатора, а «плюс» источника питания к зажиму *А* трансформатора.

Проверка группы соединения трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов производится при наладке, если отсутствуют паспортные данные или есть сомнения в достоверности имеющихся данных.

Группа соединений должна соответствовать паспортным данным и обозначениям на щитке.

8. Испытание повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты изоляции обмоток производится вместе с выводами от постороннего источника повышенного напряжения. Испытательные напряжения приведены в табл. 4-16 для масляных трансформаторов, автотрансформаторов, масляных реакторов и дугогасящих катушек и в табл. 4-17 для сухих трансформаторов. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Таблица 4-17

Значения испытательных напряжений изоляции обмоток трансформаторов с облегченной изоляцией (сухие трансформаторы)

Класс напряжения обмотки, кВ	До 0,69	6	10
Испытательное напряжение, кВ	2,7	15,4	21,6

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты изоляции обмоток масляных трансформаторов не обязательно, а изоляции обмоток сухих трансформаторов — обязательно.

9. Измерения потерь и тока холостого хода производят по схемам рис. 4-20, *а*, (для однофазных трансформаторов) и 4-20, *б* (для трехфазных трансформаторов).

При холостом ходе к одной из обмоток трансформатора (обычно низшего напряжения) при разомкнутых остальных обмотках подводят номинальное напряжение номинальной частоты, а при испытании трехфазных трансформаторов, кроме того, практически симметричное.

Ток холостого хода трехфазного трансформатора I_x определяется как среднеарифметическое токов трех фаз и выражается в процентах номинального тока $I_{ном}$

$$I_x = \frac{I_{изм}}{I_{ном}} 100.$$

Ток холостого хода не нормируется.

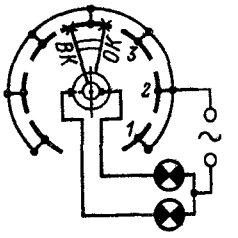


Рис. 4-21. Схема проверки работы переключателя ответвлений, не имеющего контакторов.

1, 2, 3 — неподвижные контакты; *ОК* — основной подвижный контакт; *ВК* — вспомогательный подвижный контакт.

Измерение потерь холостого хода может быть произведено также при напряжении, равном 5—10 % номинального.

Измеряют подводимое напряжение U^1 и суммарную мощность $P_{изм}$, потребляемую испытуемым трансформатором и измерительными приборами. Затем определяют мощность, потребляемую приборами, $P_{пр}$.

Потери в трансформаторе P_x^1 при напряжении U^1 определяют по формуле

$$P_x^1 = P_{изм} - P_{пр}.$$

Потери холостого хода приводятся к номинальному напряжению по формуле

$$P_x = P_x^1 \left(\frac{U_{ном}}{U^1}\right)^n,$$

где P_x — потери холостого хода при номинальном напряжении $U_{ном}$; n — показатель степени, имеющий следующие приближенные значения (при возбуждении трансформатора напряжением 5—10 % номинального): для горячекатаной трансформаторной стали 1,8; холоднокатаной трансформаторной стали 1,9.

Отличие полученных значений потерь от заводских данных должно быть не более 10 %.

10. Проверка работы переключающего устройства для переключателей, не имеющих контакторов, производится снятием диаграмм последовательности работы. Для отсчета углов при снятии диаграммы к свободному концу вала переключателя прикрепляют шкалу углов, разделенную на 360°, а на неподвижной части переключателя закрепляют указательную стрелку. Собирают схему, как указано на рис. 4-21 (показана для одной фазы).

Перед снятием круговой диаграммы переключателя, установленного на трансформаторе, провода, идущие от переключателя к его реактору, отсоединяют.

Переключатель ставят в первое положение и включают питание сигнальных ламп. При этом загораются лампы контактов *ОК*; лампы контактов *ВК* могут не гореть, но они должны загораться вскоре после начала вращения вала переключателя до погасания ламп контактов *ОК*.

По шкале углов отсчитывают начальное (в первом положении переключателя) значение угла и начинают медленно вращать вал пере-

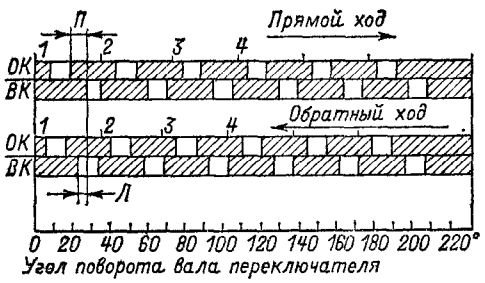


Рис. 4-22. Круговая диаграмма работы переключателя ответвлений, не имеющего контакторов.

1, 2, 3, 4 — нормальные положения переключателя; *ОК* — основной подвижный контакт переключателя; *ВК* — вспомогательный подвижный контакт переключателя; *П* — перекрытие контактов; *Л* — люфт; незаштрихованная область — контакт разомкнут, заштрихованная —контакт замкнут.

ключателя до момента размыкания контактов *ОК*, что сигнализируется погасанием соответствующих ламп. Лампы могут гаснуть при этом неодновременно. Углы, при которых гаснут лампы, должны быть зафиксированы.

Продолжают вращение вала переключателя до зажигания лампы *ОК*. При дальнейшем вращении вала переключателя гаснут лампы *ВК*.

Вал переключателя доводят до второго положения, при этом лампы *ВК*, так же как и в первом положении переключателя, могут не гореть.

Таким образом, продолжают снятие круговой диаграммы до крайнего положения переключателя, а затем — при вращении вала переключателя в обратную сторону от последнего положения к первому. При этом фиксируют углы поворота вала переключателя, при которых происходят погасание и загорание ламп, а также углы, соответствующие положениям переключателя на определенной ступени.

По этим данным строят круговую диаграмму подобно указанной на рис. 4-22 (показана для одной фазы).

Для переключателей, имеющих контакторы, шкалу углов, разделенную на 360° (через 1°), устанавливают так, чтобы вал между приводным механизмом переключателя и контактором проходил через центр шкалы углов. На этом валу закрепляют указательную стрелку. В дальнейшем положение шкалы не меняют.

Собирают схему, как указано на рис. 4-23 (показана для одной фазы). Между контактами контактора *К2* устанавливают изоляционную прокладку.

Переключатель устанавливают в одно из крайних положений, причем для исключения влияния люфта предварительно вращают рукоятку приводного механизма переключателя в направлении вращения при снятии круговой диаграммы.

Круговую диаграмму снимают при одном обороте вала (соединяющего приводной механизм с переключателем) независимо от того, происходит ли за время этого оборота одно или два переключения.

Включают питание схемы и начинают медленно вращать рукоятку приводного механизма переключателя. Размыкание контактов контактора *К2* определяют по освобождению за-

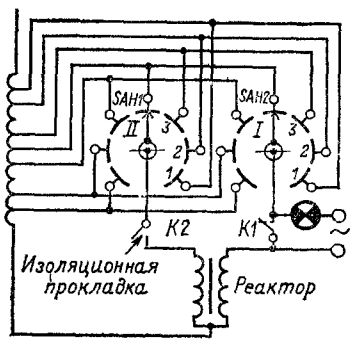


Рис. 4-23. Схема проверки работы переключателя ответвлений, имеющего контакторы.

SAH1 и *SAH2* — переключатели, *К1* и *К2* — контакты контакторов, *1, 2, 3* — неподвижные контакты; *I* и *II* — подвижные контакты.

жатого между контактами щупа толщиной 0,1—0,2 мм или по уменьшению накала лампы и фиксируют показания по шкале углов. Размыкание контактов переключателя отмечают по погасанию лампы. Если лампа не погаснет, то это указывает на неправильность монтажа переключающего устройства. При дальнейшем вращении рукоятки фиксируют замыкание контактов того же переключателя и контактора на следующем положении.

После поворота вала на 180° рукоятку поворачивают несколько далее (для снятия люфта), а затем снимают круговую диаграмму при вращении рукоятки в обратном направлении. Такие измерения производят на каждой фазе.

Указанные операции повторяют на другой половине переключающего устройства, для чего лампу присоединяют к контактору *К1*, а изоляционную прокладку из контактора *К1* переставляют в контактор *К2* (между его контактами).

По данным измерений строят круговую диаграмму подобно указанной на рис. 4-24 (показана для одной фазы). Снятая круговая диаграмма не должна отличаться от паспортной в пределах допусков завода-изготовителя. У переключающих устройств РПН производства завода им. В. Коларова (НРБ), установленных на трансформаторах Запорожского трансформаторного завода, снятие круговой диаграммы не обязательно.

11. Проверяются условия допустимости параллельной работы между трансформаторами.

Тождественность групп соединения обмоток. Параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения возможна в следующих случаях — между четными группами соединения 0, 4 и 8; между четными группами соединения 6, 10 и 2; между нечетными группами соединения 11, 3 и 7; между нечетными группами соединения 5, 9 и 1.

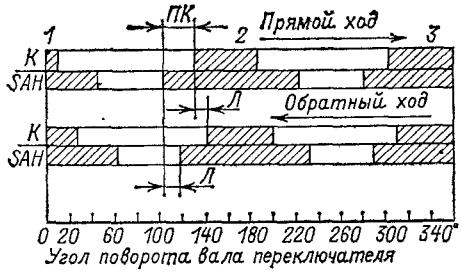


Рис. 4-24. Круговая диаграмма работы переключателя ответвлений, имеющего контакторы.

1, 2, 3 — нормальные положения переключателя; *К* — контакт контактора; *САН* — переключатель; *Л* — люфт; *ПК* — перекрытие контактов; незаштрихованная область — контакт разомкнут; заштрихованная — контакт замкнут.

В этих случаях путем круговой перестановки выводов группы приводятся друг к другу.

Параллельная работа между нечетными группами 11, 3 и 7 и 5, 9 и 1 также возможна при соответствующей перемаркировке выводов. Пример такой перемаркировки для параллельного включения трансформаторов с группой соединения 11 с трансформаторами с группой соединения 1 и 5 приведен в табл. 4-18.

Равенство в пределах допусков коэффициентов трансформации. Для силовых трансформаторов с коэффициентом трансформации, меньшим 3, — допуск ±1 %; для всех прочих трансформаторов ±0,5 %.

Таблица 4-18

Параллельное включение трансформаторов с группой соединения У/Д-11 с трансформаторами, имеющими группу соединения У/Д-1 и У/Д-5

Группа соединения	Высшее напряжение	Низшее напряжение
У/Д-11	*ABC*	*abc*
У/Д-1	*BAC* *ACB* *CBA*	*bac* *acb* *cba*
У/Д-5	*BAC* *ACB* *CBA*	*acb* *cba* *bac*

Равенство в пределах допусков напряжений короткого замыкания (допуск ±10 %). Параллельная работа трансформаторов с разными (сверх допусков) коэффициентами трансформации, с разными напряжениями короткого замыкания может быть допущена при обязательном условии, что ни один из трансформаторов при этом не будет перегружен.

При включении на параллельную работу трансформаторов с разными значениями напряжения короткого замыкания некоторое перераспределение нагрузок может быть достигнуто изменением коэффициента трансформации при помощи переключателя ответвлений (у перегруженных трансформаторов вторичное напряжение при холостом ходе должно быть меньше, чем у недогруженных трансформаторов).

Не рекомендуется параллельная работа трансформаторов при отношении их мощностей больше чем 3 : 1.

Перед включением трансформаторов на параллельную работу необходимо произвести их фазировку.

12. Фазировка трансформаторов перед их включением на параллельную работу. При фазировке трансформаторов должна быть электрическая связь между фазируемыми цепями. Такой связью может быть заземление нейтрали обоих фазируемых трансформаторов, общий нулевой провод либо специально устанавливаемая для фазировки перемычка. Производится измерение подведенных для фазировки напряжений и их симметричности. При несимметрии фазировка прекращается. Измеряются напряжения между каждым выводом одного трансформатора и всеми выводами другого. По результатам замеров строят векторные диаграммы фазируемых напряжений и определяют возможность параллельной работы трансформаторов в соответствии с табл. 4-19.

13. Испытание бака с радиаторами статическим давлением столба масла, высота которого над уровнем заполненного расширителя принимается равной для трубчатых и гладких баков 0,6 м, для баков волнистых и с пластинчатыми радиаторами — 0,3 м. Продолжительность испытания не менее 3 ч при температуре масла не ниже 10 °С. Проводится тщательный осмотр бака. Течи и подтекания масла не должно быть.

14. Испытание трансформаторного масла. Свежее масло перед заливкой должно испытываться по показателям (полный анализ) табл. 4-30.

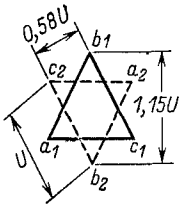
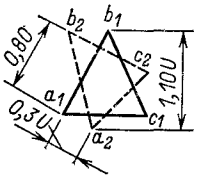
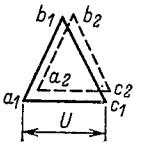
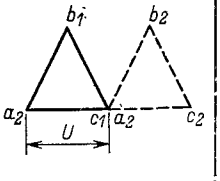
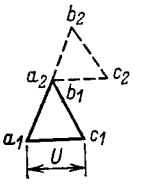
Испытание залитого в трансформатор масла перед включением в работу производится по показателям пп. 1—6 табл. 4-30 (сокращенный анализ).

У трансформаторов, заполненных до монтажа маслом, при наличии заводского протокола испытания масла перед включением в работу масло испытывается по показателям пп. 1—6 табл. 4-30. Если заводской протокол испытания масла отсутствует, у трансформаторов с количеством залитого масла более 10 т производится полный анализ масла.

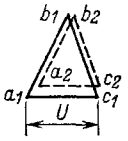
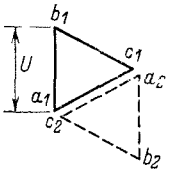
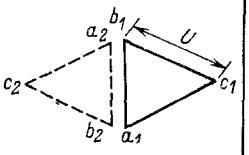
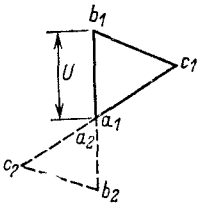
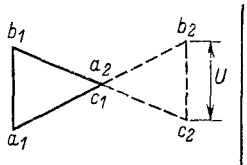
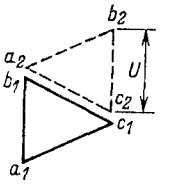
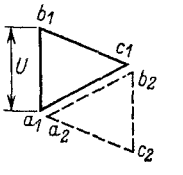
У трансформаторов, имеющих повышенное значение $tg\delta$ изоляции обмоток, следует проводить испытание масла также по п. 12 табл. 4-30.

Таблица 4-19

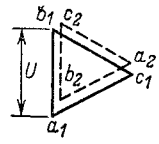
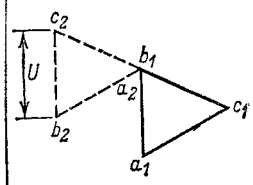
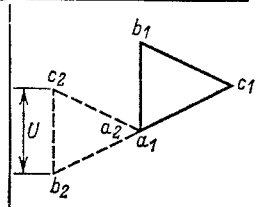
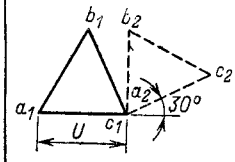
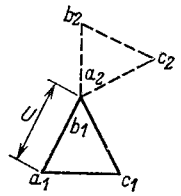
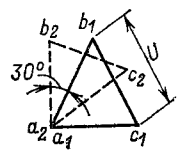
Векторные диаграммы напряжений и оценка возможности параллельной работы трансформаторов

Вторичные обмотки трансформаторов имеют	Перемычка установлена между выводами	Результаты измерений между выводами	Векторная диаграмма напряжений по измерениям	Оценка результатов измерений
Заземленные нейтрали обмоток, общий нулевой провод	Перемычка не ставится	$a_1a_2=1{,}15\ U$ $a_1b_2=0{,}58\ U$ $a_1c_2=0{,}58\ U$ $b_1b_2=1{,}15\ U$ $b_1a_2=0{,}58\ U$ $b_1c_2=0{,}58\ U$		Трансформаторы имеют разные группы соединений и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на угол 180°, например У/$У_0$-0 и У/$У_0$-6; Д/$У_0$-11 и Д/$У_0$-5 и др. Параллельная работа возможна при соответствующем пересоединении подводимых концов к трансформатору со стороны высокого и низкого напряжения (только для трансформаторов с нечетными группами соединений)
		$a_1a_2=0{,}3\ U$ $a_1b_2=0{,}8\ U$ $a_1c_2=1{,}1\ U$ $b_1a_2=1{,}1\ U$ $b_1b_2=0{,}3\ U$ $b_1c_2=0{,}8\ U$		Параллельная работа невозможна, так как трансформаторы имеют разные группы соединений и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на угол 30°, например У/$У_0$-0 и Д/$У_0$-11 или У/$У_0$-6
		$a_1a_2=0$ $a_1b_2=U$ $a_1c_2=U$ $b_1a_2=U$ $b_1b_2=0$ $b_1c_2=U$		Параллельная работа возможна при соединении выводов a_1 и a_2; b_1 и b_2; c_1 и c_2 Трансформаторы имеют одинаковые группы соединений
Изолированные нейтрали обмоток	c_1—a_2	$a_1b_2=1{,}73\ U$ $a_1c_2=2\ U$ $b_1b_2=U$ $b_1c_2=1{,}73\ U$		
	b_1—a_2	$a_1b_2=2\ U$ $a_1a_2=1{,}73\ U$ $c_1b_2=1{,}73\ U$ $c_1c_2=U$		

Продолжение табл. 4-19

Вторичные обмотки трансформаторов имеют	Перемычка установлена между выводами	Результаты измерений между выводами	Векторная диаграмма напряжений по измерениям	Оценка результатов измерений
Изолированные нейтрали обмоток	a_1—a_2	$b_1b_2=0$ $b_1c_2=U$ $c_1b_2=U$ $c_1c_2=0$		Параллельная работа возможна при соединении выводов a_1 и a_2; b_1 b_2; c_1 и c_2 Трансформаторы имеют одинаковые группы соединений
	c_1—a_2	$a_1b_2=U$ $a_1c_2=0$ $b_1b_2=1{,}73\,U$ $b_1c_2=U$		Трансформаторы имеют разные группы соединений и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на 180°, например У/У-0 и У/У-6 или У/Д-11 и У/Д-5 и др. Параллельная работа возможна между трансформаторами нечетных групп при соответствующем пересоединении подводимых концов к трансформатору со стороны высокого и низкого напряжений
	b_1—a_2	$a_1b_2=0$ $a_1c_2=U$ $c_1b_2=U$ $c_1c_2=1{,}73\,U$		
	a_1—a_2	$b_1b_2=2\,U$ $b_1c_2=1{,}73\,U$ $c_1b_2=1{,}73\,U$ $c_1c_2=2\,U$		
	c_1—a_2	$a_1b_2=2\,U$ $a_1c_2=1{,}73\,U$ $b_1b_2=1{,}73\,U$ $b_1c_2=2\,U$		Трансформаторы имеют разные группы соединений и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на угол 60°, например У/Д-11 и У/Д-1 Параллельная работа возможна между трансформаторами нечетных групп при соответствующем пересоединении подводимых концов к трансформатору со стороны высокого и низкого напряжений
	b_1—a_2	$a_1b_2=1{,}73\,U$ $a_1c_2=U$ $c_1b_2=U$ $c_1c_2=0$		
	a_1—a_2	$b_1b_2=U$ $b_1c_2=1{,}73\,U$ $c_1b_2=0$ $c_1c_2=U$		

Продолжение табл. 4-19

Вторичные обмотки трансформаторов имеют	Перемычка установлена между выводами	Результаты измерений между выводами	Векторная диаграмма напряжений по измерениям	Оценка результатов измерений
Изолированные нейтрали обмоток	c_1—a_2	$a_1b_2=0$ $a_1c_2=U$ $b_1b_2=U$ $b_1c_2=0$		Трансформаторы имеют разные группы соединений и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на угол 120°, например У/Д-11 и У/Д-7 Параллельная работа возможна при соответствующем пересоединении подводимых концов к трансформатору со стороны высокого или низкого напряжения
	b_1—a_2	$a_1b_2=U$ $a_1c_2=1{,}73\ U$ $c_1b_2=1{,}73\ U$ $c_1c_2=2\ U$		
	a_1—a_2	$b_1b_2=1{,}73\ U$ $b_1c_2=U$ $c_1b_2=2U$ $c_1c_2=1{,}73\ U$		
	c_1—a_2	$a_1b_2=1{,}4\ U$ $a_1c_2=1{,}9\ U$ $b_1b_2=0{,}5\ U$ $b_1c_2=1{,}4\ U$		Параллельная работа невозможна, так как трансформаторы имеют разные группы соединений (один имеет нечетную группу, а другой четную) и векторы напряжений вторичных обмоток сдвинуты на угол 30°, например У/У-0 и У/Д-11 или У/У-6 и У/Д-5
	b_1—a_2	$a_1b_2=1{,}9\ U$ $a_1c_2=1{,}9\ U$ $c_1b_2=1{,}9\ U$ $c_1c_2=1{,}4\ U$		
	a_1—a_2	$b_1b_2=0{,}5\ U$ $b_1c_2=0{,}5\ U$ $c_1b_2=1{,}4\ U$ $c_1c_2=0{,}5\ U$		

15. Перед пробным включением трансформатора необходимо произвести проверку действия всех предусмотренных защит; проверить показания всех установленных термометров, уровень масла в расширителе и его сообщаемость с баком; проверить, открыт ли кран в маслопроводе газового реле, убедиться в отсутствии воздуха в газовом реле. Проверить соответствие указателя положений переключателя необходимому, отсутствие посторонних предметов на трансформаторе, заземление бака, отсутствие течи масла.

Проверить присоединение разрядников к линейным вводам и нейтрали (если таковые предусмотрены схемой защиты трансформатора).

Включение трансформатора под напряжение следует, как правило, производить со стороны, где установлена защита, с тем чтобы при наличии неисправности трансформатор мог быть ею отключен. В газовой защите цепь сигнальных контактов подключить на отключение.

Произвести включение трансформатора на номинальное напряжение на время не менее 30 мин, для того чтобы осуществить прослушивание и наблюдение за состоянием трансформатора.

После снятия напряжения произвести несколько включений (три—пять) трансформатора на номинальное напряжение для проверки отстройки установленной защиты от бросков намагничивающего тока.

При удовлетворительных результатах пробного включения трансформатор может быть включен под нагрузку и сдан в эксплуатацию.

4-4. ИСПЫТАНИЯ РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ, ОТДЕЛИТЕЛЕЙ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛЕЙ

1. Измеряется сопротивление изоляции поводков и тяг, выполненных из органических материалов, мегаомметром на напряжение 2500 В. Сопротивление изоляции должно быть не ниже 1000 МОм для аппаратов на номинальное напряжение 3—10 кВ и 3000 МОм для аппаратов на номинальное напряжение 15—150 кВ.

Измерение изоляции многоэлементных изоляторов производится согласно § 4-12.

Проверяется изоляция от земли ножа короткозамыкателя, работающего совместно с отделителем; проверка целости изоляторов и изолирующего элемента производится мегаомметром при отсоединении заземляющей шины. Сопротивление изоляции не нормируется.

2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Изоляция, состоящая из одноэлементных опорных или опорно-стержневых изоляторов, испытывается согласно табл. 4-34.

Изоляция, состоящая из многоэлементных штыревых изоляторов, подвергается испытанию напряжением 50 кВ, прикладываемым к каждому склеенному элементу изолятора.

Время испытания для керамических (фарфоровых) изоляторов 1 мин, для твердой органической изоляции — 5 мин.

Изоляция выключателей нагрузки испытывается повышенным напряжением по табл. 4-1. Продолжительность испытания 1 мин.

3. Измерение сопротивления постоянному току контактов разъединителей и отделителей 110 кВ и выше производится микроомметром, двойным мостом или методом амперметра — вольтметра. Измерение производится для всей главной цепи полюса. Предельно допустимые сопротивления постоянному току контактов разъединителей и отделителей должны соответствовать заводским нормам или данным, приведенным в табл. 4-20.

Таблица 4-20

Предельно допустимые сопротивления постоянному току главной цепи разъединителей и отделителей

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Номинальный ток, А	Сопротивление, мкОм
РЛН	110	600	220
Остальные типы	110	600	175
		1000	120
		1500—2000	50

Если измеренные величины выше указанных в табл. 4-20, необходимо произвести ревизию контактов, после чего повторить измерение.

4. Измерение времени включения короткозамыкателей (времени от подачи команды на включение до замыкания контактов) производится по схеме рис. 4-1, *а*, а времени отключения отделителя (времени от подачи команды на отключение до размыкания контактов) по схеме рис. 4-1, *б*. Измеренные значения должны соответствовать данным завода-изготовителя, а при их отсутствии время включения короткозамыкателей 35 и 110 кВ должно быть не более 0,4 с; время отключения отделителей 35 кВ — не более 0,5 с, а отделителей 110 кВ — не более 0,7 с.

5. Проверку работы аппаратов с ручным управлением следует производить путем выполнения 10—15 операций включения и отключения. Проверка аппаратов с дистанционным управлением производится путем выполнения 25 операций включения и отключения при номинальном напряжении управления и 5—10 операций включения и отключения при пониженном до 80 % номинального напряжения на зажимах катушек включения и отключения.

4-5. ПРОВЕРКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1. Измерение сопротивления изоляции первичных обмоток производится мегаомметром на напряжение 2500 В, а вторичных обмоток — мегаомметром на напряжение 500—1000 В. Сопротивление изоляции первичных обмоток не нормируется. Сопротивление изоляции вторичных обмоток вместе с подсоединенными к ним цепями должно быть не ниже 1 МОм.

2. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции первичных обмоток производится для измерительных трансформаторов тока на напряжение 110 кВ и выше.

Значение tg δ изоляции обмоток трансформаторов тока не должно превышать значений, приведенных в табл. 4-21.

Таблица 4-21

Наибольшие допустимые значения tg δ изоляции обмоток трансформаторов тока (при температуре +20 °С)

Объект испытания	tg δ, %, для класса напряжения	
	110 кВ	150 кВ
Маслонаполненные трансформаторы тока	2,0	1,5

3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты изоляции первичных обмоток является обязательным для трансформаторов до 35 кВ. Значения испытательных напряжений приведены в табл. 4-22. Указанные значения не распространяются на измерительные трансформаторы с ослабленной изоляцией одного из выводов. Продолжительность приложения испытательного напряжения для трансформаторов тока принимается 1 мин, если основная изоляция керамическая, и 5 мин, если основная изоляция выполнена из органических твердых материалов или кабельных масс. Продолжительность испытания трансформаторов напряжения 1 мин.

Таблица 4-22

Испытательное напряжение промышленной частоты для измерительных трансформаторов

Исполнение изоляции измерительного трансформатора	Испытательное напряжение, кВ, при номинальном напряжении			
	6	10	20	35
Нормальная	28,8	37,8	58,5	85,5
Ослабленная	14	22	—	—

Изоляция вторичных обмоток испытывается совместно с присоединенными к ним цепями напряжением 1 кВ переменного тока, продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

4. Испытание вводов, рассчитанных на полное номинальное напряжение, производится согласно § 4-12.

Измерение tg δ вводов производится при наличии у них вывода от измерительной обкладки.

5. Проверка полярности выводов вторичных обмоток однофазных измерительных трансформаторов производится обычно методом гальванометра по схеме рис. 4-25. При этом источник постоянного тока присоединяется положительным полюсом (+) к началу первичной обмотки и отрицательным полюсом (—) к концу первичной обмотки.

Началом вторичной обмотки считается тот вывод, при присоединении к которому положительного зажима гальванометра стрелка отклоняется вправо в момент включения рубильника. У встроенных трансформаторов тока определяется полярность первого ответвления (вывод *А*) относительно всех остальных ответвлений (*Б, В, Г, Д*).

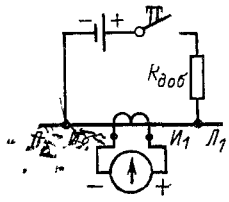


Рис. 4-25. Схема проверки полярности выводов обмоток трансформаторов тока.

В качестве источника постоянного тока могут использоваться сухие элементы или аккумуляторы с напряжением 2—6 В. При применении аккумулятора для проверки полярности обмоток трансформатора тока следует установить ограничительное сопротивление в первичную цепь.

6. Проверка группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов напряжения производится аналогично определению группы

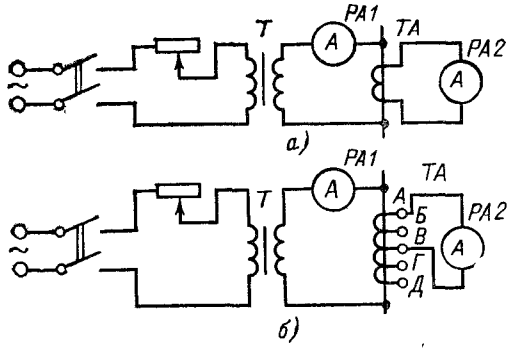


Рис. 4-26. Схема проверки коэффициента трансформации трансформаторов тока.

а — выносных; *б* — встроенных.

соединения обмоток силовых трехфазных трансформаторов согласно § 4-3

Проверку полярности выводов (у однофазных) или группы соединения (у трехфазных) измерительных трансформаторов следует производить, если отсутствуют паспортные данные или есть сомнение в достоверности этих данных.

7. Проверка коэффициентов трансформации трансформаторов тока производится по схемам рис. 4-26, *а* и *б*.

В первичную обмотку трансформатора тока с помощью нагрузочного трансформатора *Т* подается ток, близкий к номинальному, но не менее 20 % номинального. Коэффициент трансформации $K_т$ определяется как отношение первичного тока I_1 ко вторичному I_2

$$K_т = \frac{I_1}{I_2}.$$

Коэффициент трансформации проверяется для всех вторичных обмоток и всех ответвлений.

Коэффициент трансформации трансформаторов тока может быть также определен с достаточной точностью по отношению напряжений вторичной и первичной обмоток.

Напряжение питания U_2 подводится к зажимам u_1—u_2 вторичной обмотки, измеряется напряжение U_1 на зажимах первичной обмотки $Л_1$—$Л_2$ и определяется коэффициент трансформации

$$K_т = \frac{U_2}{U_1}.$$

Напряжение U_1 на зажимах $Л_1$—$Л_2$, которое обычно составляет 0,3—1 В, должно измеряться прибором с большим внутренним сопротивлением.

Проверка коэффициента трансформации напряжением совмещается со снятием вольтамперной характеристики трансформатора тока, при этом не требуется сборки специальной схемы и применения нагрузочных устройств.

Отклонение найденного коэффициента трансформации от паспортного значения должно быть в пределах точности измерения.

8. Определение ответвлений встроенных трансформаторов тока при отсутствии маркировки можно выполнить по схеме рис. 4-27,

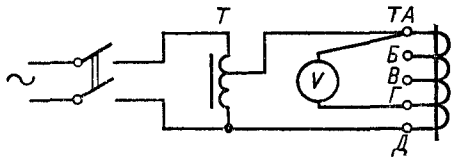


Рис 4-27 Схема определения отпаек встроенных трансформаторов тока.

подавая напряжение переменного тока от автотрансформатора или потенциометра на два любых ответвления и измеряя напряжение между всеми ответвлениями вольтметром. Максимальное измеренное напряжение будет соответствовать крайним выводам *А* и *Д*, после чего на них подается питание из расчета 1 В на виток. Номинальное число витков определяется по заводским данным. Затем проверяют распределение напряжения по ответвлениям. Оно должно быть пропорционально известному числу витков.

Можно также определить ответвления измерением коэффициента трансформации поочередно между всеми ответвлениями. По полученным результатам отыскивают крайние выводы, дающие наибольший коэффициент трансформации. Распределение остальных ответвлений находят, сопоставляя результаты измерений с заводской схемой распределения витков между ответвлениями.

9. Снятие характеристики намагничивания сердечников трансформаторов тока $U_2 = f(I_{нам})$ необходимо для проверки пригодности трансформаторов по их погрешностям для использования в схеме релейной защиты при данной нагрузке, а также для выявления витковых замыканий, определяемых по заметному уменьшению крутизны характеристики (рис. 4-28).

Схемы для определения характеристик намагничивания приведены на рис. 4-29. На рис. 4-30 показаны характеристики намагничивания трансформатора тока типа ТВ-35, 150/5 А, полученные в зависимости от схем измерения, приведенных на рис. 4-29, *а*, *б* и *в*.

Проверку характеристики намагничивания рекомендуется производить по схеме с автотрансформатором (рис. 4-29, *в*).

Кривые намагничивания для трансформаторов тока различных типов приведены на рис. 4-31.

При сборке испытательной схемы следует всегда включать вольтметр так, чтобы потребляемый им ток не входил в измеренный намагничивающий ток (рис. 4-29). Это особенно важно при снятии начальной части характеристики намагничивания (0,2—0,3 А).

При сравнении снятой характеристики с типовой следует снятую характеристику $U_2 = f(I_{нам})$ перестроить на характеристику $E_2 =$

Рис. 4-28 Характеристики намагничивания трансформаторов тока при витковых замыканиях во вторичных обмотках.

1 — ТПШ Р-10—5000 А; *2* — ТВ-35—300 А.

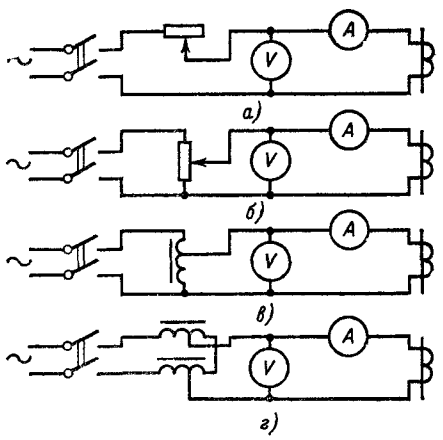


Рис. 4-29. Схемы снятия характеристик намагничивания трансформаторов тока.

а — схема с реостатом; *б* — схема с потенциометром; *в* — схема с автотрансформатором; *г* — схема с двумя автотрансформаторами.

$=f(I_{нам})$, отнимая от ее ординат U_2 падение напряжения во вторичной обмотке $\Delta u = I_{ном} z_2$. При этом вычитание Δu можно производить арифметически.

Если снятая характеристика идет выше типовой, то это указывает на то, что трансформатор тока исправен и его 10 %-ная кратность не ниже указанной заводом. Если снятая характеристика идет ниже типовой на 20 %, трансформатор тока включать в эксплуатацию не рекомендуется.

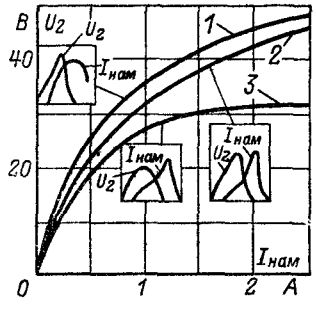


Рис. 4-30. Характеристики намагничивания трансформаторов тока ТВ-35, 150/5 А, снятые различными способами.

1 — схема с реостатом, *2* — схема с потенциометром; *3* — схема с автотрансформатором.

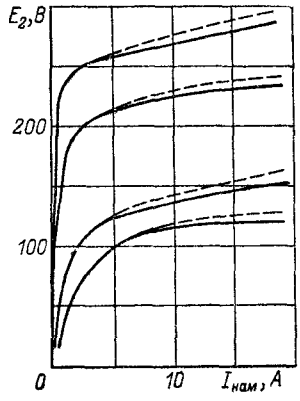


Рис. 4-31 Характеристики намагничивания трансформаторов тока разных типов.

Сплошной линией обозначена характеристика $E_2 = f(I_{нам})$, пунктирной $U_2 = f(I_{нам})$.

При отсутствии типовых характеристик снятую характеристику можно сопоставить с характеристиками однотипных исправных трансформаторов тока с таким же коэффициентом трансформации. При этом необходимо характеристики снимать одинаковыми приборами и по одной и той же схеме.

Характеристику намагничивания рекомендуется снимать до номинального тока или до начала насыщения. У маломощных трансформаторов тока насыщение наступает при токе менее 5 А.

У мощных трансформаторов тока с большим коэффициентом трансформации насыщение наступает при токах до 1 А, но при больших значениях напряжения.

Характеристику намагничивания трансформаторов тока, предназначенных для питания релейной защиты, рекомендуется снимать до тока намагничивания, равного 10 % максимального тока короткого замыкания

$$I_{нам} = \frac{0{,}1 I_{к,max}}{K_т},$$

где $I_{нам}$ — ток намагничивания; $I_{к,max}$ — максимальное значение тока короткого замыкания.

Характеристики намагничивания снимают обычно до напряжения 380 В. При наличии у обмоток ответвлений характеристику следует снимать на рабочем ответвлении. Если для снятия характеристики требуется напряжение выше 380 В, применяется специальный повышающий трансформатор или характеристика снимается при подаче тока в первичную обмотку измерением напряжения на выводах вторичной обмотки вольтметром (с большим внутренним сопротивлением).

Напряжение на вторичной обмотке при этом измерении не должно превышать максимально допустимого значения

$$E_{max} = 1{,}3 z_{нагр} n,$$

где E_{max} — максимально допустимое напряжение на вторичной обмотке трансформатора тока; $z_{нагр}$ — допустимая нагрузка на данную обмотку трансформатора тока; n — допустимая кратность первичного тока.

10. Проверка полярности дополнительной обмотки пятистержневого трехфазного трансформатора напряжения типа НТМИ, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, производится по схеме рис. 4-32. Плюсовый вывод батареи поочередно подключается на все три вывода обмотки высокого напряжения. Минусовый вывод батареи постоянно подключен к нулевому выводу трансформатора.

При правильной полярности во всех случаях отклонение гальванометра будет в одну и ту же сторону — вправо.

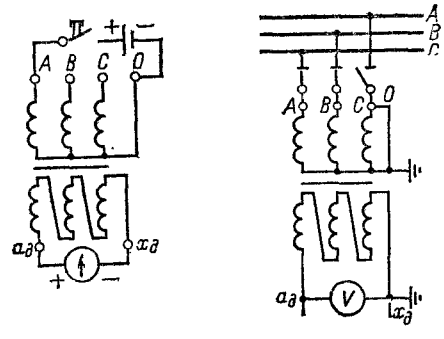


Рис. 4-32. Схема проверки полярности дополнительной обмотки пятистержневого трансформатора напряжения типа НТМИ.

Рис. 4-33. Имитация однофазного замыкания на землю.

11. Измерение тока холостого хода трансформаторов напряжения производят со стороны вторичной обмотки при номинальном напряжении. Это измерение является обязательным для каскадных трансформаторов напряжения 110 кВ и выше.

Значение тока холостого хода не нормируется. Для трехфазных трансформаторов напряжения определяется среднее значение тока холостого хода.

12. Испытание изоляции индуктированным напряжением производится для трансформаторов напряжения, у которых не все выводы на стороне высокого напряжения выполнены на номинальное напряжение.

Испытание производится при напряжении 130 % номинального по схемам, применяемым для измерения тока холостого хода.

13. Фазировка трансформаторов напряжения производится согласно § 4-3.

14. Измерение напряжения небаланса и правильности включения дополнительной обмотки у трансформаторов напряжения, соединенных по схеме разомкнутого треугольника, производят при помощи высокоомного вольтметра.

При симметрии первичных напряжений на трансформаторе напряжения, работающем на холостом ходу, это значение не должно превышать 8 В.

Для проверки наличия напряжения $3U_0$ у пятистержневого трансформатора напряжения имитируют однополюсное короткое замыкание путем отключения одной фазы первичной обмотки. Вывод первичной обмотки, отключенный от сети, должен заземляться (рис. 4-33).

15. Испытание трансформаторного масла производится у измерительных трансформаторов на напряжение 35 кВ и выше по пп. 1—6 табл. 4-30.

У измерительных трансформаторов, имеющих повышенный tg δ изоляции обмоток, проводят также испытание масла по п. 12 табл. 4-30.

У измерительных трансформаторов напряжением ниже 35 кВ проба масла не отбирается, а при браковочных результатах испытаний изоляции производится полная замена трансформаторного масла.

4-6. ИСПЫТАНИЯ И НАЛАДКА КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (КРУ) НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000 В

Испытания комплектующего КРУ оборудования — масляных выключателей, выключателей нагрузки, разъединителей, измерительных трансформаторов, разрядников и т. д. производятся методами и по нормам, изложенным в соответствующих параграфах настоящего раздела. Кроме того, должно быть выполнено следующее:

1. Проверка механизма доводки и блокировки тележки, которая производится в рабочем и испытательном положении. При попытке вывода тележки из закрепленного положения с включенным выключателем последний должен отключаться. Отключение выключателя должно происходить раньше перемещения тележки, вызывающего размыкание разъединяющих контактов в первичной цепи.

2. Проверка действия защитных шторок, обеспечивающих безопасность при производстве ремонтных работ. При выдвижении тележки в ремонтное положение шторки под действием собственного веса должны закрыть окна. При вкатывании тележки шторки должны автоматически подниматься, открывая окна для прохода подвижных контактов первичной цепи.

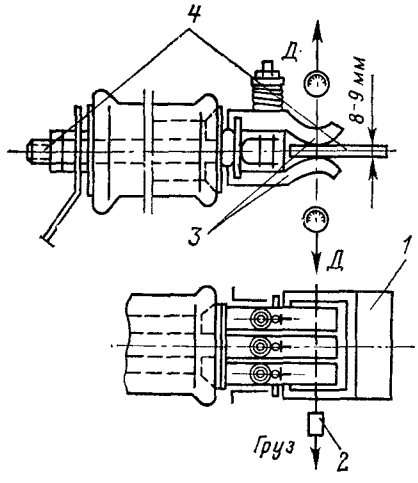


Рис. 4-34. Разъединяющие контакты первичной цепи. Измерение давления и переходных сопротивлений первичных контактов.

1 — пластина, соответствующая толщине неподвижного основания первичных контактов; *2* — грузик, подвешенный на вкладыше из тонкой бумаги; *3* — места крепления нитей динамометра; *4* — места присоединения щупов для измерения переходного сопротивления первичного разъединяющего контакта.

3. Проверка КРУ многократным вкатыванием тележки. После четырех-пяти операций вкатывания — выкатывания проверяется работа механических блокировок, отсутствие перекосов и заеданий.

4. Измерения сопротивления постоянному току разъединяющих контактов первичной цепи, контактов сборных шин и разъединяющих контактов вторичных цепей. Измерения производятся выборочно при помощи двойного измерительного моста, микроомметра или методом амперметра — вольтметра.

Если шкафы КРУ установлены прислонно к стенке и доступ к неподвижным контактам затруднен, измерение сопротивлений производится на тележке с помощью вспомогательной медной пластины толщиной 8—9 мм или запасного неподвижного контакта.

Точки, между которыми производится измерение сопротивлений контактов, показаны на рис. 4-34.

Сопротивление постоянному току разъемных контактов главной цепи не должно превышать:

для контактов на 400 А — 75 мкОм
» » » 600 А — 60 мкОм

для контактов на 1900 А — 50 мкОм
» » » 1200 А — 40 мкОм

Сопротивление постоянному току контактов сборных шин измеряется, если позволяет конструкция КРУ. Сопротивление участка шин в месте контактного соединения не должно превышать более чем в 1,2 раза сопротивление участка шин той же длины, но без контакта. Сопротивление постоянному току разъемных контактов вспомогательных цепей измеряется только для контактов скользящего типа. Сопротивление контактов должно быть не более 4 мОм.

5. *Измерение давления ламелей разъемных контактов* главной цепи производится выборочно при выкаченной тележке КРУ (рис. 4-34). Сила нажатия каждой ламели на неподвижный контакт или металлическую пластину равной толщины должно быть в пределах 100—150 Н.

6. Проверка правильности регулировки разъемных вспомогательных контактов производится в испытательном положении.

Правильно отрегулированные контакты должны удовлетворять следующим требованиям: оси неподвижных и подвижных частей контактов должны совпадать; соединение неподвижной и подвижной частей контактов должно происходить на расстоянии 7—17 мм от края пружинящих пластин; ход пружинящих пластин при включении контактов вспомогательной цепи должен быть не менее 5 мм.

Отгибание пружинящих пластин неподвижного блока при регулировке не допускается.

7. Измерение переходного сопротивления заземления тележки с корпусом производится между металлической конструкцией тележки и корпусом; сопротивление не должно превышать 1 мОм.

8. Измерение сопротивления изоляции элементов, выполненных из органических материалов, производится мегаомметром на напряжение 2500 В; оно должно быть не ниже 1000 МОм.

9. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей производится в соответствии с п. 11 § 4-1.

10. Испытание изоляции аппаратуры первичных цепей повышенным напряжением промышленной частоты. Для того чтобы испытанию повышенным напряжением подверглась вся изоляция первичных цепей (включая масляный выключатель, нижние проходные и опорные изоляторы), испытания необходимо производить до присоединения отходящих силовых кабелей.

Все тележки должны быть установлены в рабочее положение, выключатели — включены.

Тележки с трансформаторами напряжения должны быть выкачены. Испытания производят пофазно при заземленных двух других фазах.

Испытательное напряжение для оборудования ячеек КРУ приведено в табл. 4-23.

Продолжительность приложения испытательного напряжения для ячеек с керамической изоляцией 1 мин, для ячеек с изоляцией из твердых органических материалов — 5 мин.

Таблица 4-23

Испытательное напряжение промышленной частоты изоляции ячеек КРУ и КРУН

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, для ячеек с изоляцией	
	керамической	из твердых органических материалов
6	32	28,8
10	42	37,8
20	65	58,5
35	95	85,5

11. Испытание повышенным напряжением изоляции вторичных цепей производится в соответствии с п. 12 § 4-1.

4-7. ИСПЫТАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ РАЗРЯДНИКОВ

1. Измерение сопротивления элементов разрядника производится мегаомметром на 2500 В, а у разрядников на напряжение ниже 3 кВ — мегаомметром на 1000 В. Сопротивление не нормируется, но не должно отличаться от результатов измерения на заводе-изготовителе более чем на 30 %.

Измерение следует производить при температуре выше 0 °С в сухую погоду с применением экрана.

2. Измерение тока проводимости (тока утечки) производится на выпрямленном напряжении — от кенотронного аппарата — для каждого элемента в отдельности по схеме рис. 4-35.

Измерение токов проводимости производится при пульсации выпрямленного напряжения не более 10 %.

Для сглаживания пульсации в измерительную схему включается конденсатор, емкость которого выбирается по табл. 4-24.

Таблица 4-24

Емкости для сглаживания выпрямленного напряжения при измерении токов проводимости разрядников

Тип разрядника	Номинальное напряжение, кВ	Наименьшая емкость, мкФ	
		однополупериодная схема	двухполупериодная схема
РВС, РВВМ	3—10	0,2	0,1
	15—20	0,05	0,025
	30—35	0,03	0,015
Элементы серии РВМГ основной и искровой элементы разрядника РВМК	—	0,2	0,1

Допустимые пределы тока проводимости (тока утечки) отдельных элементов вентильных разрядников приведены в табл. 4-25.

Для остальных типов разрядников допустимые пределы тока проводимости (тока утечки) устанавливаются согласно заводским данным.

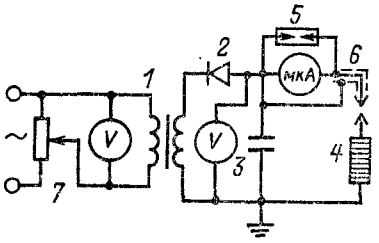


Рис. 4-35. Схема измерения тока утечки через вентильный разрядник (микроамперметр включен на стороне высокого напряжения).

1 — испытательный трансформатор; *2*—выпрямитель; *3* — сглаживающая емкость; *4* — испытуемый разрядник; *5* — разрядник защиты микроамперметра; *6* — экранированный провод; *7* — регулировочный реостат.

Таблица 4-25

Допустимые токи проводимости разрядников

Тип разрядника или элемента	Испытательное напряжение, кВ	Ток проводимости при 20° С, мкА	
		не менее	не более
РВС-20	20	400	620
РВС-35	32	180	360
РВМ-6	6	120	220
РВМ-10	10	200	280
РВМ-15	18	500	700
РВМ-20	24	500	700
РВМ-35	18	500	700
РВРД-6	6	50	120
РВРД-10	10	50	120
РВРД-110	86	550	650
РВМГ-110	30	900	1300

Измерение испытательного напряжения, при котором определяется ток проводимости, необходимо производить на стороне высшего напряжения киловольтметром типа С-96 или С-100.

Измерения следует производить при температуре выше 0 °С в сухую погоду.

3. Измерение пробивных напряжений производится на переменном токе промышленной частоты.

Измерение производится для разрядников без шунтирующих сопротивлений по схеме рис. 4-36.

Испытание разрядников, имеющих шунтирующие сопротивления, производится по методике завода-изготовителя только при наличии специальной испытательной аппаратуры, позволяющей довести испытательное напряжение на разряднике до пробивного в течение

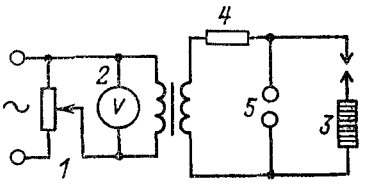


Рис. 4-36. Схема для определения пробивного напряжения вентильных разрядников.

1 — регулировочный реостат; *2* — вольтметр; *3* — испытуемый разрядник; *4* — токоограничивающий резистор; *5* — шаровой разрядник.

не более 0,5 с и ограничивающей ток через разрядник до 0,1 А во избежание перегрева и повреждения шунтирующих сопротивлений.

Пробивное напряжение измеряется при помощи электронного осциллографа, включенного через емкостный делитель.

Допустимые пределы пробивных напряжений при промышленной частоте элементов вентильных разрядников приведены в табл. 4-26.

Таблица 4-26

Допустимые пробивные напряжения разрядников при частоте 50 Гц

Тип разрядника или элемента	Пробивное напряжение, кВ	
	не менее	не более
РВС-20	42	64
РВС-35	71	103
РВМ-6	14	19
РВМ-10	24	32
РВМ-15	35	43
РВМ-20	47	56
РВМ-35	38	45
РВРД-6	15	19
РВРД-10	24	32
РВРД-110	145	175
РВМГ-110	59	73

4-8. ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ БУМАЖНО-МАСЛЯНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

1. Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром на напряжение 2500 В между выводами и относительно корпуса конденсаторов. Сопротивление изоляции и отношение R_{60}/R_{15} не нормируются.

2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты электрической прочности изоляции. Испытанию подвергается изоляция между выводами конденсаторов и между выводами и корпусом.

Испытательное напряжение принимается по табл. 4-27.

Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Мощность испытательного трансформатора при испытании изоляции между выводами конденсаторов должна быть сравнительно большой и может быть определена по формуле

$$P_{\text{исп}} = \omega C U^2 \cdot 10^{-9},$$

где $P_{\text{исп}}$ — потребляемая мощность, кВ·А; C — емкость конденсатора, пФ; U — испыта-

Таблица 4-27

Испытательные напряжения конденсаторов для компенсации реактивной мощности

Вид испытания	Испытательное напряжение, кВ, при рабочем напряжении, кВ					
	0,22	0,38	0,50	0,66	6,30	10,50
Между обкладками	0,42	0,72	0,95	1,25	11,8	20
Относительно корпуса	2,1	2,1	2,1	5,1	15,3	21,3

тельное напряжение, кВ; ω — угловая частота испытательного напряжения, равная 314 при 50 Гц.

Подъем напряжения следует производить плавно от нуля или от 20—25 % испытательного напряжения.

Снижение напряжения также должно производиться плавно.

При отсутствии испытательного трансформатора достаточной мощности испытания переменным током могут быть заменены испытанием выпрямленным напряжением, равным удвоенному по сравнению с указанным в табл. 4-27 напряжению.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты относительно корпуса изоляции конденсаторов, предназначенных для компенсации реактивной мощности, имеющих вывод, соединенный с корпусом, не производится.

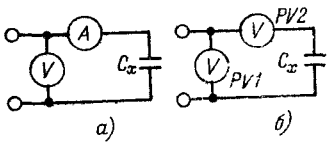
После испытания батарея конденсаторов должна быть надежно разряжена. Первоначально разряд производится через токоограничивающее сопротивление, а затем — накоротко.

3. Измерение емкости обязательно для конденсаторов, предназначенных для компенсации реактивной мощности на напряжение 1000 В и выше. Измерения следует производить при температуре 15—35 °С. Измерение емкости производится при помощи мостов переменного тока, микрофарадометром, методом амперметра и вольтметра (рис. 4-37, *а*) или при помощи двух вольтметров (рис. 4-37, *б*).

Емкость при измерениях амперметром и вольтметром подсчитывается по формуле

$$C_x = \frac{I \cdot 10^6}{\omega U},$$

где C_x — емкость конденсатора, мкФ; I — измеренный ток, А; U — напряжение на конденсаторе, В; ω — угловая частота сети, равная 314 при 50 Гц.



а *б*

Рис. 4-37. Схемы измерения емкости конденсатора.

а — методом амперметра и вольтметра; *б* — методом двух вольтметров.

При измерении емкости амперметром и вольтметром напряжение должно быть синусоидальным. При искаженной форме кривой тока за счет составляющих высших гармоник погрешность измерения значительно увеличивается. Поэтому рекомендуется измерения производить на линейном, а не на фазном напряжении сети и включать в цепь последовательно с конденсатором активное сопротивление, равное примерно 10 % реактивного сопротивления измеряемого конденсатора.

При измерениях при помощи двух вольтметров

$$C_x = \frac{10^6}{\omega R \operatorname{tg} \varphi},$$

где R — внутреннее сопротивление вольтметра, Ом; $\operatorname{tg} \varphi$ — определяют по косинусу угла φ сдвига фаз между напряжениями вольтметров U_1 и U_2; $\cos \varphi = U_2/U_1$.

В однофазных конденсаторах измеряется емкость между выводами, в трехфазных — между каждой парой закороченных выводов и третьим выводом согласно табл. 4-28.

Таблица 4-28

Схемы измерения емкости трехфазных конденсаторов

Замкнуть накоротко выводы	Измерить емкость между выводами	Обозначение измеренной емкости
2 и 3	1—(2 и 3)	C(1—2,3)
1 и 3	2—(1 и 3)	C(2—1,3)
1 и 2	3—(1 и 2)	C(3—1,2)

Измерение емкости между выводами и корпусом не производится.

Нумерация выводов произвольная.

Емкость каждой фазы конденсатора, соединенного по схеме треугольник, определяется по данным измерений из уравнений

$$C_{1,2} = \frac{C_{(1-2,3)} + C_{(2-1,3)} - C_{(3-1,2)}}{2};$$

$$C_{1,3} = \frac{C_{(1-2,3)} + C_{(3-1,2)} - C_{(2-1,3)}}{2};$$

$$C_{2,3} = \frac{C_{(2-1,3)} + C_{(3-1,2)} - C_{(1-2,3)}}{2}.$$

Полная емкость конденсатора

$$C = \frac{C_{(1-2,3)} + C_{(2-1,3)} + C_{(3-1,2)}}{2}.$$

Измеренные емкости не должны отличаться от паспортных данных на значение более приведенного в табл. 4-29.

Таблица 4-29

Допустимые отклонения емкости конденсаторов

Номинальное напряжение конденсатора	До 1050 В	Выше 1050 В
Допустимое отклонение, %	±10	+10

4. Испытание батареи конденсаторов трехкратным включением на рабочее напря-

жение сети и измерение тока в каждой фазе батареи. При включении батареи конденсаторов не должно наблюдаться ненормальных явлений (автоматическое отключение, перегорание предохранителей, шум и потрескивание в баках и т. п.). Токи в различных фазах батареи не должны отличаться друг от друга более чем на 5 %.

Запрещается включать конденсаторы на напряжение более 110 % номинального.

4-9. ПРОВЕРКА И ИСПЫТАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

1. Измерение сопротивления изоляции аккумуляторной батареи производится мегаомметром на напряжение 500—1000 В или методом вольтметра по схеме рис. 4-38.

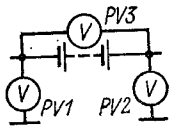


Рис. 4-38. Измерение сопротивления изоляции аккумуляторной батареи вольтметром.

Измеряются поочередно напряжение между полюсами батареи и напряжение каждого полюса по отношению к «земле».

Измерения должны производиться одним вольтметром класса точности не ниже 1 с известным внутренним сопротивлением — не ниже 50 000 Ом .

Сопротивление изоляции, Ом,

$$R_{из} = \left(\frac{U}{U_1 + U_2} - 1\right) R_{пр},$$

где U — напряжение между полюсами батареи, В; U_1 — напряжение между «плюсом» батареи и «землей», В; U_2 — напряжение между «минусом» батареи и «землей», В; $R_{пр}$ — внутреннее сопротивление вольтметра, Ом.

Сопротивление изоляции батареи должно быть не менее:

Номинальное напряжение, В	24	48	110	220
Сопротивление изоляции, кОм	14	25	50	100

2. Проверка емкости отформованной батареи. Аккумуляторная батарея заряжается до получения (в течение 1 ч) напряжения элемента, равного 2,6—2,75 В, и возникновения сильного выделения газов на всех пластинах.

Через 30 мин после окончания заряда производится контрольный разряд током 3- или 10-часового режима для кислотных и 8-часового режима для щелочных аккумуляторов.

Разряд ведется на нагрузочное сопротивление или на зарядный генератор, переводимый в двигательный режим снижением тока возбуждения.

Во время контрольного разряда ежечасно измеряют: напряжение на зажимах каждого элемента и всей батареи; разрядный ток, плотность электролита в элементах, температуру электролита в контрольных элементах.

Разряд ведется до снижения напряжения на зажимах элемента до 1,8 В.

Если хотя бы на одном элементе напряжение окажется ниже 1,8 В, разряд должен быть прекращен.

Полученную в результате разряда емкость в ампер-часах приводят к температуре +25 °С по формуле

$$C_{25} = \frac{C_t}{1 + 0{,}008\,(t - 25)},$$

где t — средняя температура электролита при разряде, °С; C_t — емкость, полученная при разряде, А·ч; C_{25} — емкость, приведенная к температуре +25 °С, А·ч; 0,008 — температурный коэффициент.

Полученная в результате контрольного разряда емкость батареи, приведенная к температуре +25 °С, должна соответствовать данным завода-изготовителя.

3. Проверка плотности и температуры электролита в каждой банке. Плотность электролита в конце заряда должна находиться в пределах 1,2—1,21 в элементах с пластинами поверхностной конструкции (С и СК) и 1,24 в элементах с панцирными пластинами (СП и СПК); температура — не выше +40 °С.

Плотность электролита в конце контрольного разряда батареи должна быть не менее 1,145 в элементах С и СК и не менее 1,185 в элементах СП и СПК.

4. Проверка напряжения каждого элемента батареи. Отстающих элементов должно быть не более 5 % их общего количества. Напряжение отстающих элементов в конце разряда не должно отличаться более чем на 1—1,5 % среднего напряжения остальных элементов.

Напряжение в конце разряда должно быть для аккумуляторов типа С (СК) при 3-, 10-часовом режиме разряда — не ниже 1,8 В и при 0,5-; 1-; 2-часовом режиме разряда — не ниже 1,75 В.

4-10. ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

1. Каждая партия поступившего с завода трансформаторного масла перед заливкой в оборудование должна подвергаться испытаниям по всем показателям, приведенным в табл. 4-30, кроме п. 3.

Масла, изготовленные по техническим условиям, не указанным в табл. 4-30, должны подвергаться испытаниям по тем же показателям, но нормы испытаний следует принимать в соответствии с техническими условиями на эти масла.

2. Масло, вновь залитое в оборудование перед его включением под напряжение после монтажа, должно быть подвергнуто сокращенному анализу в объеме, предусмотренном в пп. 1—6 табл. 4-30, а для оборудования 110 кВ и выше — кроме того по п. 12 табл. 4-30.

В сокращенный анализ масла входят: определение пробивного напряжения, качественное определение содержания взвешенного угля и механических примесей, определение кислотного числа, определение реакции водной вы-

Таблица 4-30

Показатели качества трансформаторного масла

№ п/п.	Показатели качества масла	Свежее масло перед заливкой				Чистое сухое масло непосредственно после заливки			
		ГОСТ 982-68	ГОСТ 10121-76	ТУ 38-1-182-68	ТУ 38-1-239-69	ГОСТ 982-68	ГОСТ 10121-76	ТУ 38-1-182-68	ТУ 38-1-239-69
1	Минимальное пробивное напряжение кВ (действующее значение), определенное в стандартном сосуде, для трансформаторов напряжением до:								
	15 кВ	30	30	30	—	25	25	25	—
	35 кВ	35	35	35	—	30	30	30	30
	220 кВ	45	45	45	45	40	40	40	40
2	Содержание механических примесей	Отсутствие (визуально)							
3	Содержание взвешенного угля	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Кислотное число не более мг КОН на 1 г масла	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01
5	Реакция водной вытяжки (водорастворимые низкомолекулярные кислоты)	Нейтральная							
6	Температура вспышки не ниже, °С	135	150	135	135	135	150	135	135
7	Вязкость кинематическая не более $1 \cdot 10^6$ м²/с при:								
	20 °С	—	28	30	—	—	—	—	—
	50 °С	9,0	9,0	9,0	9,0	—	—	—	—
8	Температура застывания не выше, °С	—45	—45	—45	—53	—	—	—	—
9	Натровая проба не более, баллы	1	1	1	1	—	—	—	—
10	Прозрачность при +5 °С	Прозрачно							
11	Общая стабильность против окисления:								
	количество осадка после окисления не более, %	0,01	Отсутствие	0,03	Отсутствие	—	—	—	—
	кислотное число окисленного масла не более, мг КОН на 1 г масла	0,1	0,1	0,3	0,03	—	—	—	—
12	Тангенс угла диэлектрических потерь, % не более, при:								
	20 °С	0,2	0,2	0,05	—	0,4	0,4	0,1	—
	70 °С	1,5	2,0	0,7	0,3	2,0	2,5	1,0	0,5
	90 °С	—	—	1,5	0,5	—	—	2,0	0,7

тяжки или количественное определение водорастворимых кислот и определение температуры вспышки.

3. При заливке в оборудование свежих кондиционных масел разных марок смесь должна проверяться на стабильность в пропорциях смешения, причем стабильность смеси должна быть не хуже стабильности одного из смешиваемых масел, обладающего меньшей стабильностью.

4. Пробу масла отбирают из нижней части бака, предварительно промыв маслом сливное отверстие. Посуда, в которую отбирают пробу масла, должна быть чистой и хорошо высушенной.

5. Минимальное пробивное напряжение масла определяют на аппаратах типа АМИ-60 или АИИ-70 в маслопробойном сосуде со стандартным разрядником, который состоит из двух плоских латунных электродов толщиной 8 мм с закругленными краями и диаметром 25 мм, с расстоянием между электродами 2,5 мм (устанавливается по щупу). Залитое в сосуд масло необходимо выдержать 15—20 мин для удаления воздушных включений. Повышение напряжения до пробоя производится плавно со скоростью 1—2 кВ/с.

Всего производится шесть пробоев с интервалами между ними 5—10 мин. Первый пробой не учитывается.

Пробивное напряжение пробы масла определяется как среднее арифметическое значение из пяти последующих пробоев.

4-11. ИСПЫТАНИЯ СУХИХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

1. При внешнем осмотре проверяется целость изоляции, целость и комплектность изоляторов, качество лакового покрытия, правильность монтажа выводов.

2. Проверяется правильность установки комплекта реакторов при вертикальном их расположении.

Реакторы должны быть установлены в соответствии с заводской маркировкой: «Н» — нижний; «С» — средний; «В» — верхний.

Направление намотки витков среднего реактора должно быть противоположным направлению намотки витков нижнего и верхнего реакторов.

Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы при сквозных токах короткого замыкания динамические усилия, возникающие между реакторами разных фаз, действовали на сжатие реакторов, а не на отталкивание.

3. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно болтов крепления производится мегаомметром на напряжение 1000—2500 В между одним из выводов и каждым из болтов крепления. Сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм.

4. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение принимается согласно табл. 4.31. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

5. Проверка заземления нижних фланцев опорных изоляторов производится по методике разд. 3.

Таблица 4-31

Испытательное напряжение промышленной частоты фарфоровой опорной изоляции сухих реакторов

Класс напряжения реакторов, кВ	6	10	20	35
Испытательное напряжение, кВ	32	42	65	95

4-12. ИСПЫТАНИЯ ВВОДОВ И ИЗОЛЯТОРОВ

1. Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром на напряжение 2500 В.

Сопротивление изоляции каждого подвесного изолятора или каждого элемента штыревого изолятора должно быть не ниже 300 МОм. Сопротивление изоляции вводов с бумажно-масляной изоляцией относительно соединительной втулки должно быть не менее 1000 МОм. Измерение следует производить при положительной температуре окружающего воздуха.

В сырую погоду измерение сопротивления изоляции вводов рекомендуется производить с применением экрана.

2. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь производится у вводов и проходных изоляторов, имеющих основную изоляцию, выполненную из твердого органического материала, кабельных или жидких масс. Измерения производятся при температуре не ниже +10 °С и испытательном напряжении 3 кВ.

У вводов и проходных изоляторов с потенциометрическим устройством (ПИН) производится отдельно измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции основной и измерительной обкладок.

Тангенс угла диэлектрических потерь вводов и проходных изоляторов не должен превышать значений, указанных в табл. 4-32.

Таблица 4-32

Предельные значения тангенса угла диэлектрических потерь (%) изоляции вводов и проходных изоляторов (при температуре +20 °С)

Объект испытания и вид основной изоляции	Номинальное напряжение, кВ		
	3—15	20—35	60—110
Маслонаполненные вводы и проходные изоляторы с маслобарьерной изоляцией	—	3	2
Маслонаполненные вводы и проходные изоляторы с бумажно-масляной изоляцией	—	—	1
Вводы и проходные изоляторы с бакелитовой изоляцией (в том числе маслонаполненные)	3	2,5	2

При измерении тангенса угла диэлектрических потерь вводов и проходных изоляторов рекомендуется измерять их емкость.

Измеряется основная емкость между токоведущим стержнем и измерительным выводом и емкость между потенциометрическим устройством и соединительной втулкой. У вводов без ПИН измеряется емкость между последней обкладкой и соединительной втулкой.

Измеренные емкости не должны отличаться от заводских или паспортных данных более чем на 10 %.

3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты обязательно для вводов и проходных изоляторов на напряжение до 35 кВ.

Испытательное напряжение вводов и проходных изоляторов принимается по табл. 4-33, опорных изоляторов — по табл. 4-34.

Таблица 4-33

Испытательные напряжения промышленной частоты вводов и проходных изоляторов

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ		
	Изоляторы керамические, испытываемые отдельно	Аппаратные вводы и проходные изоляторы	
		с основной керамической или жидкой изоляцией	с бакелитовой изоляцией
6	32	32	28,8
10	42	42	37,8
20	68	65	58,5
35	100	95	85,5

Таблица 4-34

Испытательные напряжения опорных одноэлементных изоляторов

Испытуемые изоляторы	Испытательные напряжения, кВ, для номинального напряжения электроустановки, кВ			
	6	10	20	35
Изоляторы, испытываемые отдельно	32	42	68	100
Изоляторы, установленные в цепях шин и аппаратов	32	42	65	95

Подвесные и каждый элемент многоэлементных изоляторов испытывают напряжением 50 кВ. Продолжительность испытания 1 мин.

Стеклянные подвесные изоляторы повышенным напряжением не испытывают.

Испытательное напряжение вводов, устанавливаемых на трансформаторах и испытываемых совместно с обмотками, принимается по табл. 4-22.

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения для вводов и проходных изоляторов с основной изоляцией керамической, жидкой или бумажно-масляной 1 мин, а с основной изоляцией из бакелита или других твердых органических материалов — 5 мин.

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения для вводов, испытываемых совместно с обмотками трансформаторов, 1 мин.

Ввод считается выдержавшим испытание, если при этом не наблюдалось пробоя, перекрытия, скользящих разрядов и частичных разрядов в масле (у маслонаполненных вводов), выделений газа, а также если после испытания не обнаружено местного перегрева изоляции.

4. Испытание трансформаторного масла из маслонаполненных вводов. У вновь заливаемых вводов масло должно испытываться согласно § 4-10. После монтажа производится испытание залитого масла по показателям пп. 1—6 табл. 4-30, а у вводов, имеющих повышенный тангенс угла диэлектрических потерь, кроме того, по п. 12 табл. 4-30.

4-13. ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКТНЫХ ЭКРАНИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДОВ И ШИНОПРОВОДОВ

1. Методы испытаний оборудования, присоединенного к токопроводу или шинопроводу (силовые и измерительные трансформаторы, разъединители и т. п.), изложены в соответствующих пунктах настоящей главы.

2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытательное напряжение изоляции токопровода при отсоединенных обмотках генератора, силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения устанавливается согласно табл. 4-35. Длительность приложения испытательного напряжения к токопроводу с чисто фарфоровой изоляцией 1 мин. Если изоляция токопровода содержит элементы из твердых органических материалов, продолжительность приложения испытательного напряжения 5 мин.

Таблица 4-35

Испытательное напряжение промышленной частоты изоляции токопровода

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ, токопровода с изоляцией	
	фарфоровой	смешанной (керамической и из твердых органических материалов)
6	32	28,8
10	42	37,8
20	65	58,5

3. Проверка качества выполнения болтовых и сварных соединений. Болтовые соединения токопровода следует подвергнуть выборочной проверке на затяжку болтов.

Сварные соединения подвергаются осмотру в соответствии с инструкцией по сварке

алюминия или при наличии соответствующей установки — контролю методом рентгено- или гаммаскопии или другим рекомендованным заводом-изготовителем способом.

4. Проверка состояния изоляционных прокладок производится у токопроводов, кожухи которых изолированы от опорных металлоконструкций.

Целость изоляционных прокладок проверяется путем сравнительных измерений падения напряжения на изоляционных прокладках секции фазы или измерением тока, протекающего в металлоконструкциях между станинами секций.

4-14. ПРОВЕРКА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ «ЭЛЕКТРОН»

Основные технические данные

1. Автоматические выключатели серии «Электрон» предназначены для установки в цепях с номинальным напряжением постоянного тока до 440 и переменного тока до 660 В частотой 50 и 60 Гц. Выключатели предназначены для защиты электрических установок при перегрузках и коротких замыканиях, а также для нечастых (до 10 раз в сутки) оперативных включений и отключений электрических цепей при номинальных режимах работы. Выключатели с номинальным током максимально-токовой защиты до 1600 А допускают включение асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

2. Выключатели имеют следующие исполнения: *постоянного тока* — в двухполюсном исполнении; переменного тока — в трехполюсном исполнении; с электродвигательным приводом — все типы выключателей; с ручным приводом — только выключатели типа ЭО6. По способу установки — стационарные и выдвижные.

3. В выключателях применяют следующие виды расцепителей: максимальный расцепитель тока, минимальный расцепитель напряжения, независимый расцепитель.

4. Мощность, потребляемая электродвигательным приводом выключателя, составляет: на переменном токе 1,5 кВ·А и на постоянном токе 1,1 кВт. Время включения выключателя с электродвигательным приводом не более 0,4 с. Электродвигательный привод должен обеспечивать включение при напряжении 0,85—1,1 номинального.

5. Выключатели выпускают на номинальные токи 630, 800, 1600, 2500, 5000 и 6300 А (для условий эксплуатации УЗ и ХЛ3).

6. Выключатели могут снабжаться реле максимально-токовой защиты (МТЗ) мгновенного или замедленного действия. Номинальные токи МТЗ (для условий эксплуатации УЗ и ХЛ3): 250, 400, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000, 5000, 6300 А. Калибруемые уставки МТЗ: по току в зоне перегрузки — 0,8; 1,25; 2 $I_н$; в зоне короткого замыкания — 3; 5; 7; 10 $I_н$; по времени—в зоне перегрузки при токе $I_н$—100; 150; 200 с; при токе $6I_н$—4; 8; 16 с; при коротком замыкании — 0,25; 0,45; 0,7 с.

7. Минимальная защита при снижении напряжения осуществляется минимальным расцепителем напряжения, если выключатель исполнен с таким расцепителем. Минимальный расцепитель обеспечивает отключение выключателя при снижении напряжения в пределах 70—35 % номинального, не производит отключение включенного выключателя при напряжении выше 70 % номинального и допускает включение выключателя при напряжении 85 % номинального и выше. Установка напряжения срабатывания минимального расцепителя регулируется в пределах 70—35 % номинального.

8. Независимый расцепитель рассчитан на кратковременный режим работы и срабатывает при 0,7—1,2 номинального напряжения.

9. Максимально-токовая защита состоит из датчиков тока, блока сопротивлений, полупроводникового блока (реле МТЗ) и электромагнитного исполнительного устройства (расцепитель МТЗ).

Датчиками МТЗ постоянного тока служат установленные на нижних выводах выключателя магнитные усилители (МУ), датчики МТЗ переменного тока — трансформаторы тока. Трансформаторы тока одновременно являются источником питания МТЗ. Питание МТЗ постоянного тока должно осуществляться от независимого источника постоянного тока с напряжением 110 или 220 В. Коэффициент пульсации источника не более 0,15.

Конструктивно расцепитель МТЗ аналогичен независимому и минимальному расцепителям. При срабатывании реле МТЗ в выключателях переменного тока подается напряжение на катушку расцепителя МТЗ, в выключателях постоянного тока шунтируется удерживающая обмотка расцепителя МТЗ, которая в нормальном режиме постоянно находится под напряжением.

10. Разновременность касания дугогасительных и главных контактов не более 1 мм.

11. Включение выключателей обеспечено при напряжении 0,8—1,1 номинального.

Указания по наладке

1. Включить выключатель ремонтной рукояткой, предварительно заведя рукояткой пружину до срабатывания конечного выключателя.

Отключить выключатель поочередно кнопкой ручного управления, независимым расцепителем, расцепителем МТЗ. Для отключения, соблюдая осторожность, нажать на якорь проверяемого расцепителя. Включение и отключение должны происходить быстро, без заедания или задержек подвижных частей выключателя. Сделать четыре-пять операций включения и отключения. Подвести питание в соответствии с принципиальной электрической схемой. Включить выключатель кнопкой включения и отключить его подачей напряжения на независимый расцепитель или снятием напряжения с минимального расцепителя, сделать три-четыре операции.

2. Проверить расцепитель минимального напряжения. При нагретой катушке расцепитель должен четко отключать выключатель при плавном снижении напряжения в пределах 0,7—0,35 номинального. Настроить минимальный расцепитель на заданное напряжение срабатывания путем натяжения возвратной пружины расцепителя при помощи специального винта.

Таблица 4-36

Характеристики срабатывания МТЗ

Положение переключателя реле МТЗ	Время срабатывания при перегрузке	при кратности тока к выбранной уставке					
		1—2,2		2,2—3		3 и выше	
		переменный ток	постоянный ток	переменный ток	постоянный ток	переменный ток	постоянный ток
Обе перемычки замкнуты	Обратнозависимое от тока (рис. 6-39)	равно уставке МТЗ		равно уставке МТЗ или мгновенно	равно уставке МТЗ	мгновенно	равно уставке МТЗ
Верхняя перемычка разомкнута		МТЗ срабатывает мгновенно					
Нижняя перемычка разомкнута	МТЗ срабатывает мгновенно						

3. Проверить действие независимого расцепителя при пониженном до 0,7 и при повышенном до 1,2 номинального напряжении.

4. Установка программы для максимальнотоковой защиты выключателя осуществляется ручками управления, которые находятся на лицевой панели реле МТЗ. На рис. 4-39 изображена лицевая панель реле МТЗ.

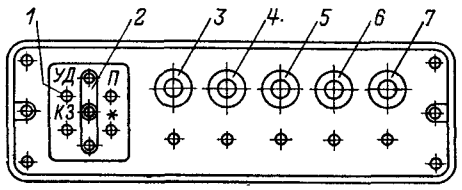


Рис. 4-39. Лицевая панель реле максимальной токовой защиты выключателя «Электрон».

В левой части панели расположены контрольные зажимы *1*, которые используются при калибровке и проверке защиты. Между контрольными зажимами расположен переключатель *2*, который может быть установлен в три различных положения. Время-токовые характеристики МТЗ выключателей в зоне перегрузки приведены на рис. 6-39.

В зависимости от установки переключателя в одно из этих положений характеристика срабатывания МТЗ будет соответствовать табл. 4-36.

В правой части панели имеется пять ручек. Ручка *3* служит для регулировки уставки по току в зоне перегрузки, ручка *4* — для регулировки уставки по току в зоне короткого замыкания, ручка *5* — для регулировки уставки по времени при номинальном токе МТЗ, ручка *6* — для регулировки уставки по времени при шестикратном токе, ручка *7* — для регулировки уставки времени при коротком замыкании.

На ручках нанесены риски и цифры, соответствующие уставкам, откалиброванным на заводе-изготовителе.

5. Проверка функционирования реле МТЗ — включить выключатель без тока в главной цепи; ручки *5*, *6*, *7* (рис. 4-39) повернуть против часовой стрелки до упора и замерить время срабатывания выключателя по схеме, приведенной на рис. 4-1, *б*, подавая напряжение переменного тока 220 В поочередно к зажимам *30—27*, *30—28* и *30—29* (номера зажимов — по схеме завода-изготовителя) при проверке МТЗ переменного тока. Длительность подачи напряжения не более 2 с.

При проверке МТЗ постоянного тока соединить зажимы *29—30* через резистор сопротивлением 1 кОм.

Время срабатывания при положении ручки *4*, повернутой до упора против часовой стрелки, должно быть 0,05—0,2 с, а при положении ручки *4*, повернутой до упора по часовой стрелке, 1—2 с.

На выключателях переменного тока с номинальным током МТЗ 2000 А и более в обоих положениях ручки *4* время срабатывания может оказаться равным 1—2 с, т. е. срабатывает только реле перегрузки. Для проверки реле в зоне к. з. нужно увеличить подаваемое напряжение.

6. Проверка калибровки реле МТЗ. Присоединить два крайних полюса выключателя, соединенных последовательно с регулируемым нагрузочным устройством. Нагрузочное устройство переменного тока должно обеспечивать практически синусоидальную форму тока. Подсоединить вольтметр постоянного тока с внутренним сопротивлением не менее 5 кОм/В к зажимам *П* и *.

Для проверки уставки по току в зоне перегрузки выставить требуемую уставку на

ручке *3* и включить выключатель. На выключателе постоянного тока вольтметр должен показать 17—21 В, на выключателе переменного тока — 0; плавно увеличивать ток нагрузочным устройством. На выключателе переменного тока показания вольтметра должны возрастать до 17—21 В. При токе нагрузки, равном току срабатывания реле на проверяемой уставке, показания вольтметра должны резко снизиться до 0—3 В. Ждать отключения выключателя не обязательно.

При проверке уставок по току в зоне к. з. (ручка *4*) вольтметр подключить к зажимам *КЗ* и *, остальные операции аналогичны изложенным.

При проверке уставок по времени в зоне перегрузки необходимо выставить уставку на ручке *5*, ручку *6* установить в среднее, а ручку *3* — в нулевое положение; установить номинальный ток и отключить выключатель, через 1 мин включить выключатель и по секундомеру замерить время срабатывания на проверяемой уставке.

При проверке выдержки времени при шестикратном токе ручку *5* установить в положение 200 с, а ручку *6* — в нулевое положение; установить шестикратный ток и отключить выключатель; по истечении 1 мин включить выключатель и замерить секундомером время срабатывания выключателя на проверяемой уставке.

При проверке выдержки времени в зоне к. з. уставка выставляется ручкой *7* и проверка производится в той же последовательности, как и при шестикратном токе. Ток устанавливается при этом выше уставки к. з. на ручке *4*.

При токе, превышающем уставку к. з. в 3 раза и более, время отключения не должно зависеть от положения ручки *7* и должно быть не более 0,1 с.

7. Выдвижные выключатели. Проверяется действие механической блокировки, которая должна препятствовать вкатыванию и выкатыванию выключателя при включенном положении. Проверку работы выдвижных выключателей по п. 1 надо проводить при их установке в каркасе в контрольном, а затем рабочем положении.

8. Проверка сопротивления изоляции выключателя производится мегаомметром на 500—1000 В. Сопротивление изоляции выключателя должно быть не менее 20 МОм. Сопротивление изоляции цепей вторичной коммутации проверяется в соответствии с указаниями разд. 3.

4-15. ПРОВЕРКА СХЕМ АВАРИЙНОГО ОСВЕЩЕНИЯ И АВАРИЙНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

1. Проверка соответствия проекту установленного оборудования и аппаратуры.

2. Проверка правильности соединения всех аппаратов схемы.

3. Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром на 500—1000 В на полностью собранной схеме со всеми присоединенными аппаратами (магнитные пускатели, контакторы, катушки автоматов, реле приборов и т. п.). Сопротивление изоляции должно быть не ниже 0,5 МОм.

4. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты (50 Гц). Испытательное напряжение для вторичных цепей схемы со всеми присоединенными аппаратами 1000 В. Продолжительность испытания 1 мин.

Если схема содержит полупроводниковые приборы (диоды, триоды и т. п.), выводы их на время испытания должны быть замкнуты накоротко.

5. Проверка работы автоматов и контакторов при номинальном и пониженном напряжении оперативного тока. Производятся пять включений при напряжении 90 % номинального, пять включений и отключений при номинальном и десять отключений при 80 % номинального напряжения.

6. Проверка полностью собранной схемы на правильность функционирования. Все элементы схемы должны надежно функционировать с предусмотренной проектом последовательностью как при номинальном, так и при пониженном до 90 % номинального напряжении оперативного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4-1. **Правила** устройства электроустановок. — 5-е изд. Гл. 1—8. Объем и нормы приемо-сдаточных испытаний электрооборудования. — М.: Атомиздат, 1976.—56 с.

4-2. **Министерство** энергетики и электрификации СССР. Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем. Нормы испытания электрооборудования. — М.: СПО ОРГРЭС, 1977.—420 с.

4-3. **Сборник** указаний по наладочным работам. Вып. 1. — М.: Энергия, 1972 (Минмонтажспецстрой СССР, Главэлектромонтаж).

4-4. **Новодворец Л. А.** Испытания силовых конденсаторных установок. — М.: Энергия, 1971. — 64 с.

4-5. **Якобсон И. А.** Наладка быстродействующих переключающих устройств силовых трансформаторов. — М : Энергия, 1976. — 96 с.

4-6. **Бодунген И. Н., Порубанский Ю. А.** Наладка оборудования электрических подстанций. — М.: Госстройиздат, 1963. — 166 с.

4-7. **Булгаков Н. И.** Группы соединения трансформаторов. — М.: Энергия, 1977. — 80 с.

4-8. **Сахновский Н. Л.** Испытание и проверка электрического оборудования. — М.: Энергия, 1975. — 104 с.

4-9. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. Н. С. Мовсесова, А. М. Храмушина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

А. ПРОВЕРКА И РЕГУЛИРОВКА ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

5-1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Релейную аппаратуру рекомендуется налаживать преимущественно на стенде, в условиях лаборатории, так как при наладке реле на месте их установки существенно затруднено выполнение операций по регулировке и проверке. Реле комплектных панелей защит налаживают на панелях.

Схемы, применяемые для испытаний реле, должны быть максимально простыми и максимально безопасными. Для наладки реле наиболее целесообразно применение стационарных стендов и комплектных переносных устройств, например типов У5052 и У5053 (выпускаются электропромышленностью взамен УПЗ-1, УПЗ-2).

Устройство переносное основное У5052 предназначено для наладки простых устройств релейной защиты. Оно состоит из двух блоков К513 и К514 и обеспечивает: регулирование и измерение однофазного переменного и постоянного (выпрямленного) тока и напряжения; измерение временных характеристик проверяемых устройств.

Устройство переносное комплектное У5053 предназначено для наладки простых и сложных (с фазозависимыми характеристиками) устройств релейной защиты. Состоит оно из трех блоков, устанавливаемых вертикально друг на друга: регулировочного К513 (средний блок), нагрузочного К514 (нижний блок), блока-приставки К515 (верхний блок).

Устройство У5053 обеспечивает получение трехфазного напряжения с регулированием одного из трех междуфазных напряжений и угла сдвига между однофазным током и трехфазным напряжением, проверку устройств защиты имитацией различных видов коротких замыканий.

Питание устройств осуществляется от сети переменного тока 220/380 В.

Применение комплектных устройств позволяет существенно увеличить производительность труда при наладке релейной защиты и автоматики.

При наладке реле выполняют следующие операции:

1. Внешний осмотр реле. Проверяют наличие пломб, целостность кожуха, плотность прилегания кожуха к цоколю, состояние уплотнений, состояние ламелей, винтов или шпилек; выполняется чистка реле.

2. Внутренний осмотр реле после снятия кожуха. При этом удаляют прокладки, заклинивающие подвижную систему, освобождают подвязанные подвижные части. При необходимости детали реле очищают с помощью жестких щеток и мягкой чистой ткани. Проверяют затяжку винтов, гаек, крепящих пружин, контакты, подпятники, магнитопроводы, надежность паек; осматривают сварные контакты наконечников. Изоляция проводов не должна попадать под шайбы, гайки и головки винтов.

У реле с полупроводниковыми элементами проверяют отсутствие замыкания между деталями печатных плат. Для этого платы вынимают из разъемов и осматривают монтаж печатных схем. Проверяют надежность фиксации разъемов, переменные резисторы регулировки уставки. Необходимо убедиться в легкости вращения, отсутствии затираний и надежности фиксации положений оси подвижного контакта резистора.

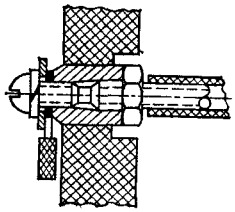


Рис. 5-1. Проходная втулка реле с внутренним проводом.

3. Проверка надежности соединений между проводниками. Винты, крепящие внутренние и внешние проводники к проходным втулкам, должны быть снабжены необходимыми плоскими и пружинящими шайбами и ввинчены до упора, чтобы проводники или ламели вблизи винтов невозможно было переместить пинцетом.

Между торцами внешнего винта (или шпильки) и внутреннего винта во втулке необходимо установить расстояние 1—1,5 витка резьбы (рис. 5-1). После этого закрепить шпильки с тыльной стороны реле контргайками, затем проверить правильность установки контактных угольников (для промежуточных реле типов РП-23, РП-25, РП-232 и т. д.).

4. Регулировка механической части выполняется, как правило, без разборки реле, если при осмотре не обнаружено неисправностей. В случае обнаружения серьезных дефектов, возникающих при транспортировке, хранении или монтаже, реле подлежит замене или ремонту.

Не рекомендуется смазывать подшипники и оси реле, если это не указано заводом-изготовителем.

5. Чистка подвижных и неподвижных контактов от загрязнения и тонкой пленки окисла выполняется чуркой из дерева нехвойных пород или кожей (ремнем). Подгоревшие или имеющие выбоины контакты необходимо зачистить и отполировать воронилом. Пользоваться надфилями нельзя, так как от них на поверхности контактов остаются глубокие царапины. Не допускается чистка контактов наждачной бумагой или другими абразивными материалами. Промывка контактов бензином, ацетоном недопустима, так как от них образуется плохо проводящий налет.

При необходимости контактный узел разбирают и неподвижные контакты для чистки помещают в специальный шаблон (§ 5-7). Незначительный налет можно очистить без разборки, придерживая контакт часовой отверткой.

С целью предотвращения износа контактов при наладке рекомендуется в большинстве случаев применять в качестве индикатора срабатывания реле лампу накаливания 3,5 В, 1 Вт, так как для многих реле завод-изготовитель гарантирует 5000 срабатываний, из них 500 срабатываний с нагруженными контактами. Для удобства отсчета следует располагать индикатор срабатывания вблизи шкалы измерительного прибора.

6. Измерение сопротивления изоляции мегаомметром 1000 В. Между электрически не связанными токоведущими частями реле, между ними и корпусом сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

Испытание реле повышенным напряжением проводится в полной схеме защиты.

7. Характеристики реле с изменяемыми уставками проверяют, как правило, в трех точках шкалы: в начале, в конце и на рабочей уставке. Результатом для каждой точки считается среднее арифметическое из трех измерений.

При снятии характеристик реле ток (напряжение) регулируется плавно в сторону только увеличения или только уменьшения во избежание ошибок за счет перемагничивания сердечника. Реле, имеющие стальной кожух, проверяют при надетом кожухе.

Применяемая терминология. Основные параметры реле защиты

Абсолютный разброс параметра — отношение в процентах наибольшей разности между измеренными значениями параметра к полусумме этих значений.

Погрешностью срабатывание реле называется отклонение параметра срабатывания реле от уставки, %

$$\Delta = \frac{k - k_{уст}}{k_{уст}} 100\%,$$

где k — наибольшее или наименьшее значение параметра срабатывания из нескольких срабатываний; $k_{уст}$ — значение уставки по шкале.

Параметр срабатывания реле — пороговое (граничное) значение воздействующей величины при срабатывании, разделяющее зоны срабатывания и несрабатывания реле в пределах непрерывного изменения этого параметра. Заданное пороговое значение воздействующей величины при срабатывании или заданная выдержка времени, после которой реле должно сработать, называется также уставкой, а положение указателя на шкале реле, соответствующее заданному параметру срабатывания или выдержке времени, называется уставкой по шкале. В некоторых случаях воздействующая величина зависит от соотношения входных величин и угла между ними (реле мощности или сопротивления). Зависимость между входными или воздействующими величинами в условиях срабатывания называется характеристикой срабатывания.

Воздействующая величина — величина, на которую должно реагировать реле. Воздействующая величина может образоваться из одной или нескольких величин, подведенных к различным входам реле и называемых входными величинами.

Коэффициент возврата реле определяют как отношение параметра возврата к параметру срабатывания. Для максимальных реле это отношение меньше единицы, для минимальных — больше единицы.

Мощность, потребляемая одной входной цепью реле, имеющей два вывода, определяют как произведение напряжения, приложенного к указанным выводам, на ток, протекающий по внутренней цепи, подключенной к этим выводам.

Для цепи тока реле

$$S_{р,т} = U_{р,т} I_р;$$

для цепи напряжения реле

$$S_{р,н} = U_р I_{р,н}.$$

Мощность, подводимую к однофазному реле мощности, имеющему два входа, определяют условно как произведение напряжения, приложенного ко входу (выводам обмотки напряжения), на ток, подаваемый на вход (выводы обмотки тока),

$$S_р = U_р I_р.$$

Сопротивление цепи тока реле

$$Z_{р,т} = \frac{S_{р,т}}{I_р^2};$$

сопротивление цепи напряжения реле

$$Z_{р,н} = \frac{U_р^2}{S_{р,н}},$$

где $U_р$, $I_р$ — напряжение и ток, подведенные к реле; $U_{р,т}$ — напряжение на выводах цепи тока реле; $I_{р,н}$ — ток, протекающий по цепи напряжения реле.

Коммутационная способность контактов регламентирована ГОСТ 12434-73, 11152-75, 22557-77 и техническими условиями на реле. В зависимости от значения коммутируемой мощности различают следующие категории контактов: пониженной, средней, нормальной и повышенной мощности. Контакты средней мощности могут коммутировать в цепи постоянного тока индуктивную нагрузку (с постоянной времени не более 0,005 с) мощностью 60 Вт, в цепи переменного тока (при коэффициенте мощности не менее 0,5) нагрузку мощностью 300 В·А при напряжении 24—250 В и токе до 2 А; контакты реле допускают длительное протекание тока до 2 А.

Принятые в тексте буквенные обозначения и сокращения:

$F_{ср}$ — м. д. с. срабатывания;
$F_т$ — м. д .с. торможения;
$F_{фр}$ — м. д. с. феррорезонанса;
$I_в$ ($U_в$) — ток (напряжение) возврата;
$I_{вх}$ ($U_{вх}$) — ток (напряжение) на входе;
$I_{д,к}$ — ток до коммутации;
$I_к$ — ток короткого замыкания;
$I_н$ ($U_н$) — номинальный ток (напряжение);
$I_{обр}$ — обратный ток диода;

$I_р$ ($U_р$) — ток (напряжение), подведенный к реле;
$I_{с.з}$ — первичный ток срабатывания защиты;
$I_{с.р}$ ($U_{с.р}$) — ток (напряжение) срабатывания реле;
$I_т$ — ток торможения;
$I_{уд}$ ($U_{уд}$) — ток (напряжение) удержания;
$I_{уст}$ ($U_{уст}$) — ток (напряжение) уставки;
I_0 (U_0) — ток (напряжение) нулевой последовательности;
M — момент вращающий подвижной системы реле мощности;
$S_р$ — мощность, подведенная к реле;
$R_{нагр}$ — активное сопротивление нагрузки;
$R_р$ — активное сопротивление обмотки реле;
$t_в$ — замедление при возврате;
$t_{ср}$ — замедление при срабатывании;
$w_{1р}$, $w_{2р}$ — рабочие (дифференциальные) обмотки реле;
$w_{1ур}$, $w_{2ур}$ — уравнительные обмотки реле;
$w_т$ — тормозная обмотка;
$Z_р$ — полное сопротивление обмотки реле;
$\varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности.

Все схемы внутренних соединений реле даны для вида спереди. Нумерация выводов и схемы могут непринципиально отличаться от приведенных в настоящем разделе в связи с внедрением новых конструктивных элементов реле.

В 3-е издание настоящего справочника не включены рекомендации по наладке: комплектов защит серии КЗ; реле тока, напряжения и мощности обратной последовательности; реле прямого действия; реле импульсной сигнализации; устройств АВР и АПВ. Достаточные сведения о наладке этих устройств приведены во втором издании справочника.

5-2. РЕЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РТ-40 И РН-50

Технические данные реле РТ-40, РН-53, РН-53/60Д, РН-54, РН-51

Схемы внутренних соединений реле даны на рис. 5-2, 5-3, конструкция реле — на рис. 5-4.

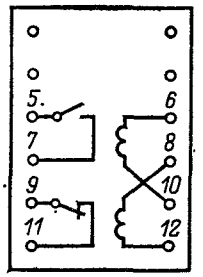


Рис. 5-2. Схема внутренних соединений реле РТ-40.

Таблица 5-1

Технические данные реле тока серии РТ-40

Тип	Последовательное соединение катушек			Параллельное соединение катушек			Потребляемая мощность при токе срабатывания на минимальной уставке, В·А
	Ток срабатывания, А	Номинальный ток, А	Термическая стойкость в течение 1 с, А	Ток срабатывания, А	Номинальный ток, А	Термическая стойкость в течение 1 с, А	
РТ-40/0,2	0,05—0,10	0,4	90	0,1—0,2	1	90	0,2
РТ-40/0,6	0,15—0,30	1,6	90	0,3—0,6	2,5	90	0,2
РТ-40/2	0,5—1,0	2,5	90	1—2	6,3	150	0,2
РТ-40/6	1,5—3,0	10	150	3—6	16	150	0,5
РТ-40/10	2,5—5,0	16	150	5—10	25	150	0,5
РТ-40/20	5—10	16	150	10—20	25	150	0,5
РТ-40/50	12,5—25,0	25	150	25—50	25	220	0,8
РТ-40/100	25—50	25	220	50—100	25	220	1,8
РТ-40/200	50—100	25	220	100—200	25	220	8,0

Таблица 5-2

Технические данные реле напряжения РН-53 и РН-54

Тип	Номинальное напряжение, В		Пределы уставок, В	1-й диапазон уставок		2-й диапазон уставок	
	1-й диапазон	2-й диапазон		Напряжение срабатывания, В	Номинальное напряжение, В	Напряжение срабатывания, В	Номинальное напряжение, В
РН-53/60	30	60	15—60	15—30	30	30—60	60
РН-53/200	100	200	50—200	50—100	100	100—200	200
РН-53/400	200	400	100—400	100—200	200	200—400	400
РН-54/48	30	60	12—48	12—24	30	24—48	60
РН-54/160	100	200	40—160	40—80	100	80—160	200
РН-54/320	200	400	80—320	80—160	200	160—320	400
РН-53/60Д	100	200	15—60	15—30	100	30—60	200

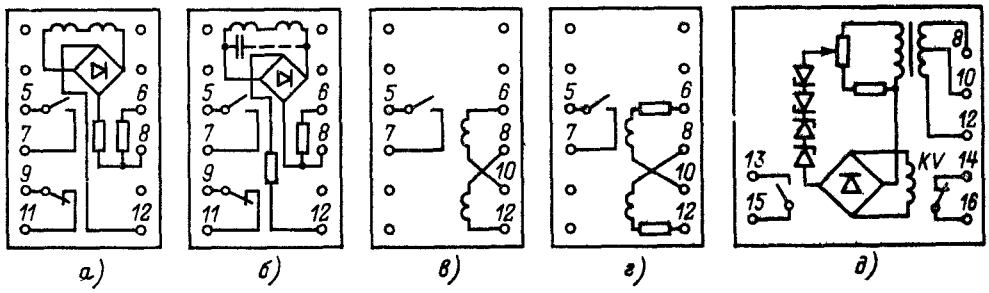


Рис. 5-3. Схемы внутренних соединений реле серии РН-50.

а — реле РН-53/60Д; *б* — реле РН-53/60, РН-53/200, РН-54/48, РН-54/160, РН 53/400, РН-54/320 (конденсатор, цепь которого обозначена штрихами, имеется в схеме только реле РН-53/400, РН-54/320); *в* — реле РН-51/1,4 и РН-51/6,4; *г* — реле РН-51/32; *д* — реле РН-58.

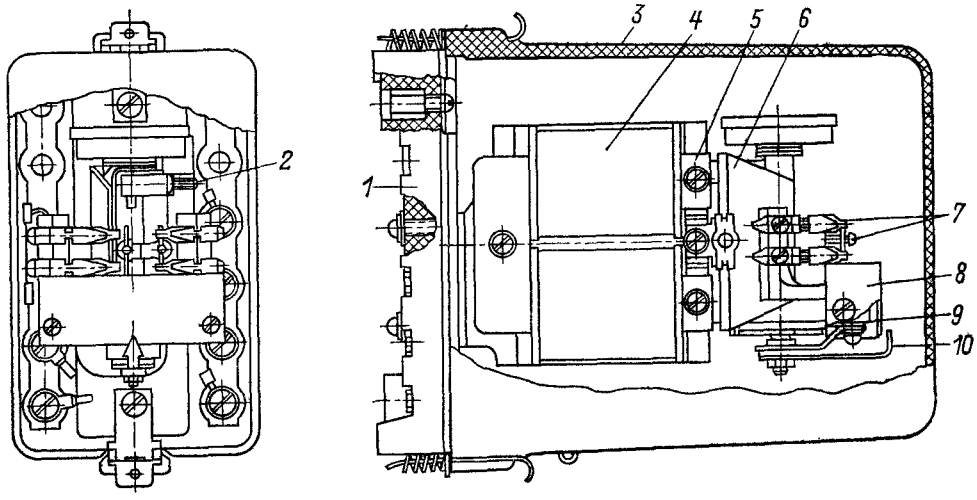


Рис. 5-4. Реле серии РТ-40. Общий вид.

1 — цоколь; *2* — упор; *3* — кожух; *4* — катушка; *5* — магнитопровод; *6* — якорь; *7* — контактная система; *8* — шкала; *9* — пружина; *10* — указатель.

Технические данные реле приведены в табл. 5-1—5-4.

Контакты реле средней мощности описаны в § 5-1.

Номинальная частота реле 50—60 Гц, кроме реле РН-51, предназначенных для включения в сеть постоянного тока.

Реле тока допускают продолжительный режим работы при $1{,}1I_н$, реле напряжения — при $1{,}1U_н$.

Потребляемая мощность реле РТ-40 приведена в табл. 5-1; потребляемая мощность РН-53, РН-54 около 1 В·А при напряжении минимальной уставки; реле РН-53/60Д — не более 5 В·А при номинальном напряжении на первом диапазоне уставок.

Класс точности реле РТ-40 5, разброс тока срабатывания не более 4 %. Погрешность реле РН-53, РН-53/60Д, ДН-54 ±10 %, разброс параметра срабатывания 5 %. Погрешность реле РН-51 ±5 %, разброс 5 %.

В намагниченном состоянии после снятия номинального напряжения напряжение срабатывания реле РН-51 изменяется не более чем

Таблица 5-3

Технические данные реле РН-51

Тип	Соединение катушек			
	последовательное		параллельное	
	Уставка, В	Номинальное напряжение, В	Уставка, В	Номинальное напряжение, В
РН-51/1,4	1,4	8	0,7	6
РН-51/6,4	6,4	60	3,2	24
РН-51/32	32	100	16	48

Таблица 5-4

Время действия реле РТ-40 и РН-50

Тип	Реле включено на ток или напряжение	Время срабатывания, не более, с	Снижение тока или напряжения до	Время возврата после снижения тока или напряжения, не более, с	Действие реле
РТ-40	$1,2I_{с.р}$	0,1	—	—	Замыкание замыкающего контакта
РТ-40	$3I_{с.р}$	0,03	—	—	
РН-53	$1,2U_{с.р}$	0,1	—	—	
РН-53	$2U_{с.р}$	0,03	—	—	
РН-53/60Д	$1,2U_{с.р}$	0,1	—	—	
РН-53/60Д	$2U_{с.р}$	0,05	—	—	
РН-51	$1,2U_{с.р}$	0,25	—	—	
РН-54	—	—	$0,8U_{с.р}$	0,15	Замыкание размыкающего контакта
РН-54	—	—	$0,5U_{с.р}$	0,1	
РН-54	$1,1U_{н}$		$0,8U_{с.р}$	0,05	Размыкание замыкающего контакта
РТ-40	$(1,2—20)I_{с.р}$	—	$0,7I_{с.р}$	0,035	

на 10 % по сравнению с напряжением срабатывания в размагниченном состоянии.

Технические данные реле РН-58

Исполнительный орган реле выполнен на базе реле РН-53. Схема внутренних соединений — на рис. 5-3.

Номинальное напряжение реле равно $1,2U_{уст}$, номинальная частота 50—60 Гц. Реле имеет два диапазона уставок напряжения срабатывания: 50—100 В (выводы *8—10*) и 100—200 В (выводы *8—12*). Погрешность напряжения срабатывания не превышает ±5 %, разброс не более 1 %. Коэффициент возврата не менее 0,95. Время срабатывания реле не более 0,15 с при $1,2U_{с.р}$ и не более 0,03 с при $2U_{с.р}$.

Замыкающие контакты реле замыкаются без вибрации в диапазоне напряжения от $1,1U_{с.р}$ до $2U_{с.р}$. Мощность, потребляемая реле, не более 1,5 В·А при наименьшей уставке и не более 4 В·А при наибольшей уставке. Реле выдерживают длительно $1,1U_{н}$ и в течение 5 с удвоенное значение напряжения уставки.

Указания по проверке и регулировке реле РТ-40, РН-54, РН-53, РН-53/60Д, РН-51, РН-58

А. Предварительные замечания. Конструкция электромагнитного реле РТ-40 и РН-50 с поперечным движением Г-образного якоря характеризуется малым изменением воздушного зазора между полюсами сердечника и полкой якоря при перемещении якоря из начального положения в конечное, что позволяет при регулировке реле согласовать оптимальные соотношения между электромагнитным моментом и моментом противодействующей пружины, при которых обеспечены четкое срабатывание и возврат реле, высокий коэффициент возврата. Пределы углов поворота якоря, при которых выполняются указанные условия, 62—75° (рис. 5-5) устанавливают упорами и неподвижными контактами. При угле меньше 62° недопустимо возрастает воздушный зазор. Вращение якоря далее 75° нежелательно, так как электромагнитный момент снижается и замыкание замыкающих контактов становится ненадежным.

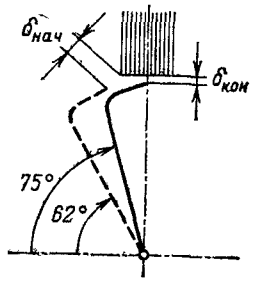


Рис. 5-5 Изменение зазора между якорем и полюсами при срабатывании реле серий РТ-40 и РН-50.

$\delta_{нач}$ — начальный зазор; $\delta_{кон}$ — конечный зазор.

При отсутствии тока в реле начальное положение якоря и жестко связанного с ним контактного мостика фиксировано левым упором и правой парой неподвижных контактов, а начальная затяжка пружины создает достаточное усилие на замыкание этих контактов. При токе срабатывания разность электромагнитного и противодействующего моментов (избыточный момент) в конце хода якоря создает достаточное давление контактного мостика на левую пару неподвижных контактов. Конечное положение якоря и контактного мостика фиксируют правым упором и замыкающими неподвижными контактами.

Б. Внешний и внутренний осмотр, чистка реле и контактов, подтяжка винтов (шпилек), проверка изоляции выполняются в соответствии с § 5-1.

В. Проверка и регулировка механической части реле.

1. Проверка крепления упоров в стойке. Для определения надежной фиксации левого упора вращают винт по часовой стрелке на один-два оборота, затем против часовой стрелки возвращают упор в прежнее положение, определяют достаточность трения, с которым упор поворачивается в резьбе. В случае свободного вращения (без трения) упор вывертывают, снимают бронзовую пластинку.

Придав необходимый изгиб бронзовой пластинке и прижав ее к своему основанию так, чтобы она прогнулась, ввертывают упор. Правильность установки левого упора определяют по току срабатывания на конечной уставке (см. ниже). При проверке фиксации правого упора подтяжку контргайки выполняют с од-

новременным придерживанием упора отверткой.

2. Люфт по оси подвижной системы при проверке должен быть в пределах 0,2—0,3 мм (измеряют щупами). Якорь должен поворачиваться без трения. При необходимости подрегулировки осевого люфта ослабляют винт, крепящий верхнюю полуось, и пинцетом поднимают ее, при этом люфт уменьшается, либо опускают — люфт увеличивается. При опускании верхней полуоси зазор между стойкой и П-образной скобой не должен быть меньше 1 мм. Поперечный люфт подвижной системы нерегулируемый составляет 0,1—0,15 мм.

3. Проверяют равномерность и воздушный зазор между плоскостью полки якоря и полюсами сердечника. При втянутом якоре зазор должен быть:

Для реле РТ-40/100, РТ-40/200	0,8—1 мм
Для реле РТ-40/20	0,7—0,9 мм
Для остальных исполнений реле РТ-40	0,5—0,7 мм
Для реле РН-53, РН-53/60Д, РН-54, РН-51	0,5—0,65 мм

Зазор регулируют при необходимости регулировки коэффициента возврата (см. ниже), а также в случае неравномерности его.

4. Спиральная пружина не должна иметь следов окисления, плоскость пружины должна быть параллельна плоскости стойки, между витками должен сохраняться равномерный зазор при изменении уставки от начальной до конечной. Параллельность плоскостей пружины и стойки достигается правильной припайкой внешнего конца пружины к хвостовику якоря. Равномерность зазора между витками достигается изгибом внешнего конца пружины у места крепления его к хвостовику. Регулировку пружины делают осторожно пинцетом.

5. Проверка надежности затяжки гайки регулировочного узла (рис. 5-4), обеспечивающей необходимое трение при перемещении указателя уставки по шкале.

6. Осмотр и регулировка контактов. Мостики подвижных контактов должны свободно поворачиваться на своих осях, угол поворота мостиков не более 6—8° относительно среднего положения. Осевой люфт мостика 0,1—0,15 мм.

Неподвижные контакты должны лежать в одной плоскости, а их оси должны быть параллельны между собой; контакты должны быть закреплены в контактной колодочке таким образом, чтобы бронзовая контактная пружина касалась переднего упора. Передний упор, ограничивающий вибрацию неподвижного контакта, не должен создавать предварительного нажатия на контактную пружину (пружина должна касаться упора без давления). Отсутствие давления проверяют незначительным отводом (0,5—1 мм) переднего упора от контактной пружины, которая должна оставаться неподвижной. Зазор между контактной пружиной и задним гибким упором должен составлять 0,2—0,3 мм.

Расположение неподвижных контактов относительно мостика подвижного контакта должно быть симметричным. При замыкании контактов путем поворота якоря от руки точка первого касания контактов должна находиться не менее чем в 1 мм от внешнего края неподвижных контактов; суммарный воздушный зазор между подвижными и неподвижными контактами в разомкнутом состоянии должен быть не менее 1,5 мм. Провал размышляющих контактов на первой уставке шкалы должен быть не менее 0,3 мм, совместный ход контактной пружины и заднего гибкого упора замыкающих контактов при полном втягивании якоря (до упора) 0,3 мм, скольжение контактного мостика по серебру неподвижных контактов 0,6—1,2 мм. Такая регулировка контактов обеспечивает их четкую работу при больших несинусоидальных токах. Контактную колодку крепят в крайнем левом положении, угол встречи контактов должен быть около 30°.

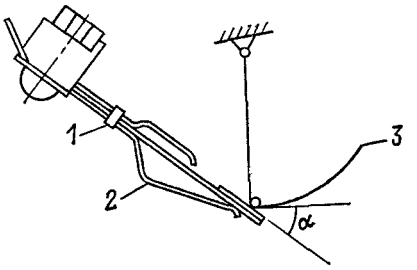


Рис. 5-6. Контактная система реле РТ-40 или РН-50 в замкнутом состоянии.

1 — место обжима; *2* — место подгибки; *3* — траектория движения контакта; α—угол встречи контактов.

Угол встречи контактов — это угол между плоскостью неподвижного контакта и касательной к траектории движения подвижного контакта при его касании с неподвижными контактами (рис. 5-6).

Угол поворота якоря должен обеспечивать невозможность одновременного замыкания мостиками замыкающего и размыкающего контактов; полка якоря при этом может заходить на полюсы электромагнита не более, чем на $^2/_3$ их ширины. Ограничение поворота якоря производят упорными винтами в пределах 62—75°.

Суммарный межконтактный зазор, совместный ход и провал контактов регулируют упорными винтами, а также подгибанием контактной пружины и ее упоров в местах, указанных на рис. 5-6.

При использовании начальной уставки во избежание отброса подвижной системы положение якоря при возврате должно определяться только правыми неподвижными контактами, т. е. между якорем и левым упором оставляют зазор 0,2—0,3 мм.

Г. Схемы, применяемые для проверки реле, даны на рис. 5-7. Обычно $R=5\div10$ Ом. Реостат R закорачивают (выводят) при проверке отсутствия вибрации контактов реле.

При проверке реле РТ-40/0,2, РТ-40/0,6 и РТ-40/2 (последнее при последовательном соединении катушек) сопротивление реостата $R\geqslant10Z_р$. Реостат R включают для снижения зависимости тока от воздушного зазора реле, улучшения формы кривой тока. Применяют

измерительные приборы электромагнитной системы, так как они реагируют на те же значения измеряемой величины, что и проверяемые реле. Класс точности приборов 0,5 или 1.

Для уменьшения износа контактов и с целью безопасности в качестве индикатора срабатывания реле применяют лампу 3,5 В, 1 Вт. Срабатывание реле определяют по лампе, а возврат — на слух в момент остановки якоря в конечном положении.

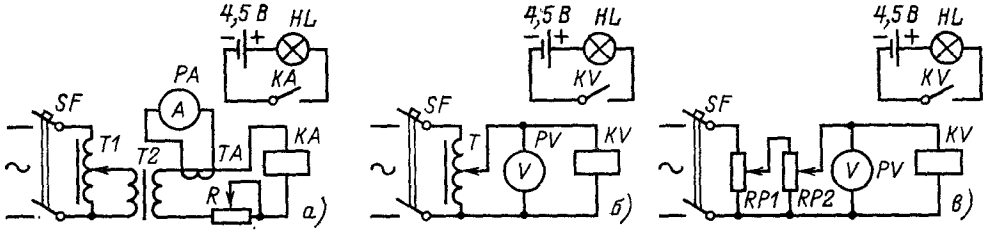


Рис. 5-7. Схемы для испытания реле РТ-40 и РН-50.

а — для реле РТ-40; *б* — для реле РН-50; *в* — для реле РН-50 на постоянном токе; *SF* — автомат защиты; *T*, *T1* — автотрансформатор РНО-250-2; *T2* — трансформатор ОСО-0,25; *KA* — реле тока; *KV* — реле напряжения; *TA* — трансформатор тока И-54; *RP* — потенциометр; *HL* — сигнальная лампа; *R* — реостат.

Д. Проверку и регулировку электрических характеристик реле выполняют на первом или втором диапазоне — в зависимости от рабочей уставки.

1. Отводят указатель уставки влево от начальной точки шкалы на угол 27—30° для всех типов реле РТ, РН, кроме РН-51, для которого указатель отводят на угол 35—40°. Подвижные контакты должны занять нейтральное положение. Если при этом подвижные контакты не в нейтральном положении, их устанавливают в это положение, поворачивая ключом шестигранную втулку в нужную сторону и удерживая указатель в неподвижном положении.

2. Указатель устанавливают на конечную отметку шкалы. При несовпадении тока (напряжения) срабатывания со шкалой регулируют начальное положение якоря левым упорным винтом и подгибанием правых неподвижных контактов. Уточнение угла закручивания пружины производят по значению тока срабатывания на начальной отметке шкалы.

3. Указатель устанавливают в точку шкалы, соответствующую рабочей уставке. Если ток (напряжение) срабатывания реле отличается от уставки, его корректируют смещением указателя в нужную сторону. Реле, уставки которых часто изменяют в эксплуатации, проверяют на всех отметках шкалы. Реле РТ и РН, уставки которых не предполагают изменять, допускается настраивать в одной точке шкалы — на уставке.

4. Настройка коэффициента возврата. Коэффициент возврата (в дальнейшем — коэффициент) рекомендуется устанавливать в следующих пределах: для реле РТ-40 0,85—0,92 или 0,82—0,88, если уставка на первой отметке шкалы; для реле РН-53, РН-53/60Д 0,86—0,92; для реле РН-54 1,18—1,12; для реле РН-51 не ниже 0,5. Коэффициент в больших пределах регулируют изменением воздушного зазора путем перемещения сердечника, предварительно ослабив винты, крепящие сердечник к стойке. Для увеличения коэффициента зазор следует уменьшить. В небольших пределах коэффициент можно увеличить, приблизив начальное положение якоря правым упором и правыми неподвижными контактами к полюсам, или незначительно ввинчивая левый упор, или увеличивая предварительную затяжку противодействующей пружины. Коэффициент зависит также от упругости и положения неподвижных контактов. Все способы изменения коэффициента более эффективны на начальных отметках шкалы. Регулировка тока (напряжения) срабатывания и коэффициента ведется одновременно.

После регулировки реле контактная система должна соответствовать требованиям п. В, 6 § 5-2. Также необходимо проверить затяжку всех винтов внутри реле и закрыть реле крышкой.

5. Проверка работы контактов на отсутствие вибрации. Причинами вибрации могут быть: несоосность полуосей реле, неравномерность воздушного зазора, неправильные регулировка контактов и положение противодействующей пружины. Перед данной проверкой указанные дефекты необходимо устранить. Необходимо проверить отсутствие вибрации и искрения контактов при нагрузке, которую контакты коммутируют в схеме защиты или автоматики, при подаче в обмотку реле тока от $1{,}05I_{с.р}$ до наибольшего возможного тока короткого замыкания, на реле напряжения — величины от $1{,}05U_{с.р}$ до $1{,}2U_{н}$.

Проверку отсутствия вибрации реле тока следует выполнять двумя способами: плавным подъемом тока до максимального возможного значения; включением реле на ток толчком во всем указанном диапазоне с интервалами 0,1 наибольшего тока короткого замыкания. Реле напряжения проверяют аналогично. Наиболее тяжелой нагрузкой на контакты является реле времени серии РВ-100.

В случае выполнения уставки на первой отметке шкалы реле тока требуется увеличить совместный ход контактов до 2 мм.

Проверяют ток (напряжение) срабатывания и возврата на уставке.

У некоторых экземпляров реле напряжения или тока с исполнительным органом типа РТ-40, включенным на выпрямленный ток, наблюдаются ненормальная вибрация подвижной системы на грани срабатывания и большой

разброс параметра срабатывания. В случае исправности диодного моста вибрацию устраняют переменой мест проводников на выходе выпрямителя. Причиной вибрации является несогласованность поля обмоток с направлением остаточной намагниченности железа якоря.

Рекомендуется соблюдать полярность включения реле РН-51 в соответствии с маркировкой выводов обмотки.

Е. Регулировка реле РН-58.

1. Проверку механической части исполнительного органа выполняют так же, как для реле РТ-40. Угол предварительного закручивания пружины 65—70°.

2. Для проверки исполнительного органа при подведении напряжения по схеме рис. 5-7, *б* к зажимам *8—10* реле (рис. 5-3) полностью выводят потенциометр реле поворотом ручки по часовой стрелке до отказа, изменением положения якоря (левым упорным винтом) или подгибанием замыкающих контактов добиваются срабатывания реле при напряжении 40±1 В и коэффициенте возврата не менее 0,97; допускается небольшое изменение угла закручивания пружины в ту или иную сторону.

3. Подавая поочередно напряжение 50, 60, 70, 80, 90 и 100 В, отмечают совпадение положения ручки-указателя с точками шкалы по напряжению срабатывания, которое должно отклоняться не более чем на ±5 % от уставки по шкале.

При существенном отклонении коэффициента возврата от значения, гарантированного заводом-изготовителем ($k_в \geqslant 0{,}95$), целесообразно провести проверку исправности стабилитронов.

5-3. РЕЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАКСИМАЛЬНОГО ТОКА РТ-40/Р И РТ-40/1Д

Технические данные трехфазного реле максимального тока РТ-40/Р

Схема внутренних соединений реле РТ-40/Р дана на рис. 5-8.

Реле РТ-40/Р-1 на номинальный ток 1 А с пределами уставок 130—260 мА и реле РТ-40/Р-5 на номинальный ток 5 А с пределами уставок 650—1300 мА при питании током обмотки *2—4* или *6—8* с меньшим количеством витков имеют потребляемую мощность на первой уставке 0,4 и на последней уставке 1,1 В·А. Эти же реле при питании обмотки *5—7* с большим количеством витков и уставках, меньших в 2 раза, имеют потребляемую мощность на первой уставке 0,8 и на последней 2,2 В·А.

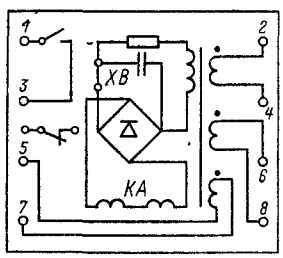


Рис. 5-8 Схема внутренних соединений реле РТ-40/Р.

Погрешность тока срабатывания ±5 %, разброс 10 %. Замыкающий контакт замыкается без вибрации при токах $1{,}1I_{с.р}$ и выше, размыкающий — при снижении тока до $0{,}6I_{с.р}$ и ниже.

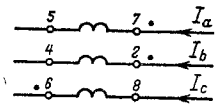


Рис. 5-9. Схема питания обмоток реле РТ-40/Р в цепях трансформаторов тока.

Коэффициент возврата не ниже 0,7.

Время срабатывания реле при токе $1{,}2I_{с.р}$ не более 0,15 с, при токе $3I_{с.р}$ не более 0,03 с.

Контакты реле средней мощности — см. § 5-1.

При питании обмоток трехфазным симметричным током по схеме рис. 5-9 реле длительно выдерживают $1{,}1I_н$ и в течение 1 с по любой обмотке ток $30I_н$. После прохождения больших токов (до $30I_н$) по любой из обмоток ток срабатывания может увеличиться на 15 %.

Технические данные реле РТ-40/1Д

Схема внутренних соединений реле дана на рис. 5-10. Номинальный ток реле 6 А, номинальная частота 50 Гц Пределы уставок и значения полного сопротивления токовых цепей реле приведены в табл. 5-5.

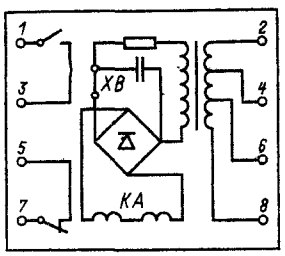


Рис. 5-10. Схема внутренних соединений реле РТ-40/1Д.

Погрешность тока срабатывания ±5 %, разброс 10 %. Коэффициент возврата не менее 0,7.

Таблица 5-5

Пределы уставок и значения полного сопротивления токовых цепей реле РТ-40/1Д

Диапазон уставок	Присоединение (№ зажимов)	Пределы уставок, А	Полное сопротивление, Ом, при токе		
			первой уставки	5А	30А
1	*2—8*	0,15—0,3	10	1,7	0,45
2	*2—6*	0,3—0,6	2,5	0,65	0,25
3	*2—4*	0,5—1,0	1,0	0,4	0,1

Время срабатывания реле при токе $1{,}2I_{с,р}$ не более 0,15 с, при токе $3I_{с,р}$ не более 0,05 с.

Замыкающий контакт замыкается без вибрации при токах свыше $1{,}5I_{с,р}$, размыкающий — при снижении тока ниже $0{,}5I_{с,р}$.

Контакты реле средней мощности — см. § 5-1.

Реле выдерживают ток $1{,}1I_{н}$ длительно и ток $30I_{н}$ в течение 1 с.

При прохождении больших токов (около $7I_{н}$) магнитопровод насыщающегося трансформатора может намагничиваться, при этом возникает дополнительная погрешность, не превышающая 15 %.

Регулировка реле РТ-40/Р и РТ-40/1Д

1. Регулировку механической части реле, проверку изоляции выполняют в соответствии с § 5-2. Воздушный зазор 0,5—0,6 мм, предварительная затяжка пружины 27—30°.

2. Снимают характеристику — зависимость напряжения на вторичной обмотке насыщающегося трансформатора от тока $(0{,}02 \div 10)\ I_{в}$ в обмотке *2—8* реле РТ-40/1Д; *5—7* реле РТ-40/Р

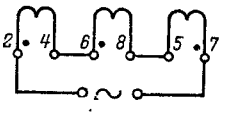


Рис. 5-11. Схема проверки полярности обмоток реле РТ-40/Р.

при снятой накладке *ХВ* (рис. 5-8, 5-10). Напряжение измеряют вольтметром с высоким входным сопротивлением.

3. Для проверки полярности обмоток реле РТ-40/Р по схеме рис. 5-11 обмотки реле включают последовательно на ток, равный 5-кратному номинальному. При положении указателя на первой уставке размыкающие контакты не должны размыкаться.

4. Шкалу токов срабатывания реле РТ-40/Р проверяют на начальной и конечной отметках при питании поочередно обмоток, а также на рабочей уставке.

5. Шкалу токов срабатывания реле РТ-40/1Д проверяют на начальной и конечной отметках при питании, подаваемом поочередно на зажимы *2—8*, *2—6*, *2—4* реле, и на рабочей уставке.

6. Проверяют надежность работы контактов (отсутствие вибрации, искрения) при токе от $1{,}05I_{с,р}$ до максимального тока к. з., но не менее $10I_{н}$, и при снижении тока до нуля (для размагничивания реле). Ток подают: на зажимы *2—8* реле РТ-40/1Д; на последовательно-согласно включенные обмотки *2—4*, *5—7* реле РТ-40/Р. Ток повышают плавно и включают толчками, как при испытании реле РТ-40 (§ 5-2).

5-4. РЕЛЕ ТОКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ РНТ-565—РНТ-567, ДЗТ-11 И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ДЗТ-21

Технические данные реле РНТ-565, РНТ-566, РНТ-566/2, РНТ-567, РНТ-567/2, ДЗТ-11

Реле состоят из насыщающегося трансформатора тока (НТТ) и исполнительного органа *КА* — реле РТ-40. На рис. 5-12 и 5-13 показаны принципиальные схемы реле и схемы включения реле.

Схема реле РНТ-567/2 отличается от схемы РНТ-567 только тем, что количество витков каждого ответвления в 5 раз больше.

Магнитодвижущая сила срабатывания реле составляет 100 ± 5 А.

Ток срабатывания реле возможно изменять ступенями в пределах, указанных в табл. 5-6, путем изменения количества включенных витков обмоток, обтекаемых током трансформаторов тока при аварии.

Таблица 5-6

Пределы изменения токов срабатывания реле РНТ

Тип реле	Пределы изменения токов срабатывания
РНТ-565	При включении: рабочей обмотки 2,87—12,5 А рабочей и уравнительной, соединенных последовательно, 1,45—12,5 А
РНТ-566	При включении: рабочей обмотки $w_{1р}$ 0,34—2 А рабочей обмотки $w_{2р}$ 0,625—4 А рабочей обмотки $w_{3р}$ 2,57—20 А
РНТ-566/2	При включении: рабочей обмотки $w_{1р}$ 0,34—2 А рабочей обмотки $w_{2р}$ 4,35—33,3 А
РНТ-567	При включении рабочей обмотки $w_{1р}$ или $w_{2р}$ 5,26—100 А
РНТ-567/2	При включении рабочей обмотки $w_{1р}$ или $w_{2р}$ 1,05—20 А

Время срабатывания реле при 3-кратном токе срабатывания не превышает 0,04 с.

Степень отстройки реле от неустановившихся переходных токов характеризуется коэффициентом загрубления ε; зависимость $\varepsilon = f(k)$ для каждого реле серии РНТ-560 соответствует рис. 5-14 с отклонением, не превышающим ± 20 %.

Величина ε — это отношение переменного тока срабатывания реле $I'_{с,р}$ при наличии постоянной составляющей $I_{п}$ к току срабатывания $I_{1с,р}$ при отсутствии постоянной составляющей

$$\varepsilon = \frac{I'_{с,р}}{I_{1с,р}}; \quad k = \frac{I_{п}}{I'_{с,р}},$$

где k — коэффициент смещения.

Допустимые значения токов и количество витков обмоток, по которым одновременно могут проходить токи в нормальном режиме, приведены в табл. 5-7. Витки $w_{1р}=85$ реле РНТ-566 выполнены проводом диаметром 0,8 мм, витки $w_{2р}=77$ — проводом диаметром 0,93 мм, остальные витки этих обмоток выполнены проводом диаметром 0,59 мм. Указанной особенностью определяются два возможных варианта допустимых нагрузок и сочетаний количества включенных витков обмоток реле РНТ-566.

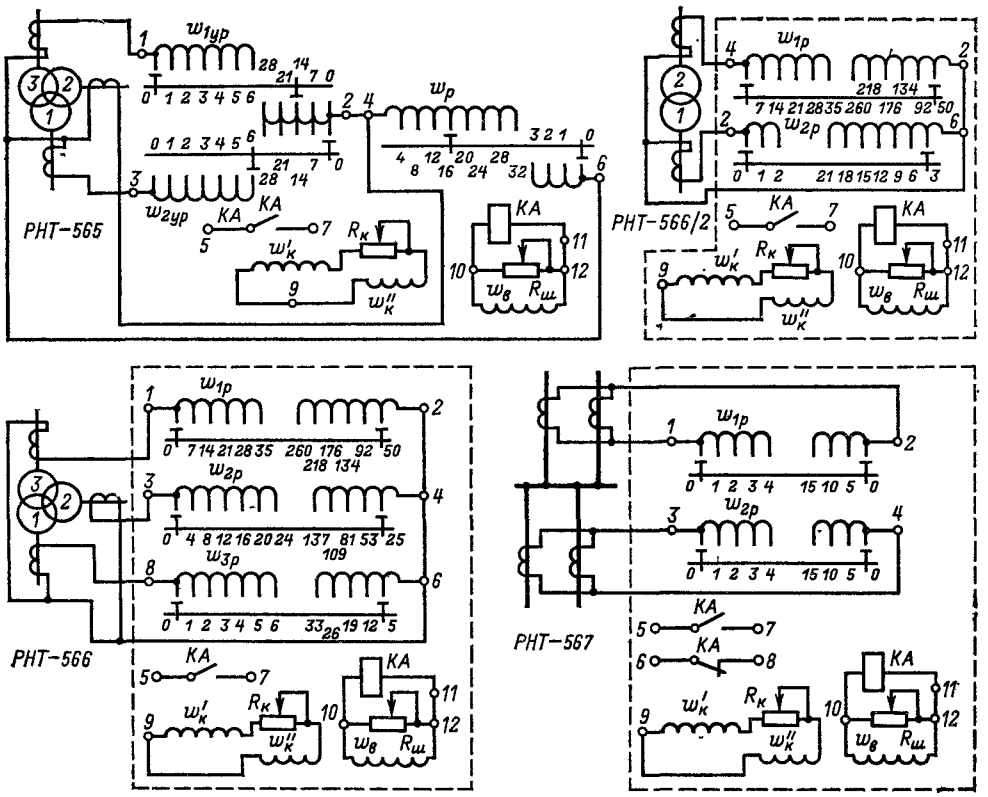


Рис. 5-12. Принципиальные схемы реле РНТ-565—РНТ-567 и схемы цепей тока дифференциальной защиты (для одной фазы).

КА — реле тока; $w_{1р}$, $w_{2р}$, $w_{3р}$ — рабочие (дифференциальные) обмотки; $w_{1ур}$, $w_{2ур}$ — уравнительные обмотки; $w_к'$, $w_к''$ — секции короткозамкнутой обмотки; $w_в$ — вторичная обмотка.

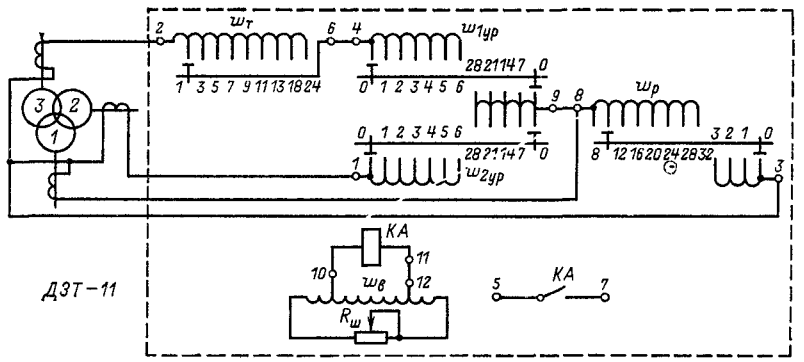


Рис. 5-13. Принципиальная схема реле ДЗТ-11 и схема цепей тока дифференциальной защиты.

КА — реле тока; $w_в$ — вторичная обмотка; $w_т$ — тормозная обмотка.

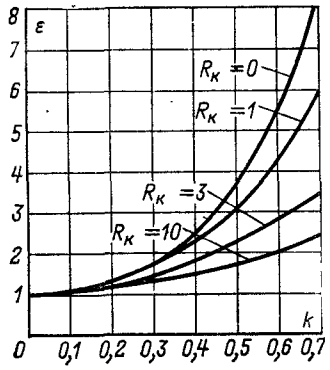


Рис. 5-14. Кривые отстройки от бросков тока с апериодической составляющей реле РНТ-565—РНТ-567.

$R_к$ — сопротивление в цепи короткозамкнутой обмотки, Ом.

Таблица 5-7

Допустимые значения токов при одновременном обтекании обмоток реле РНТ

Реле	Количество витков обмоток	Ток, А
РНТ-565	$w_р$=35 $w_{1ур}$=34 $w_{2ур}$=34	10 10 10
РНТ-566	$w_{1р}$=295 } максимальное $w_{2р}$=161 } количество $w_{3р}$=39 } витков	0,7 1,8 7
	$w_{1р}$=85 } провод большо- $w_{2р}$=77 } го диаметра $w_{3р}$=39	1,8 3,5 7
РНТ-566/2	$w_{1р}$=295 $w_{2р}$=23	2 15
РНТ-567	$w_{1р}$=19 $w_{2р}$=19	20 20
РНТ-567/2	$w_{1р}$=95 $w_{2р}$=95	4 4

Рабочие и тормозная обмотки реле ДЗТ-11 имеют ответвления для регулирования токов срабатывания и торможения; м. д. с. срабатывания реле при отсутствии торможения 100±5 А.

Уставку по току срабатывания реле ДЗТ-11 можно установить при отсутствии торможения в следующих пределах:

2,87—12,5 А в случае применения реле для дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора при включении рабочей обмотки реле в плечо с большим током;

1,45—12,5 А в схеме защиты двухобмоточного трансформатора при последовательном включении рабочей и (первой или второй) уравнительной обмоток.

Рабочие, уравнительные и тормозная обмотки реле ДЗТ-11 длительно выдерживают в нормальном режиме одновременное протекание тока 10 А при всех включенных витках.

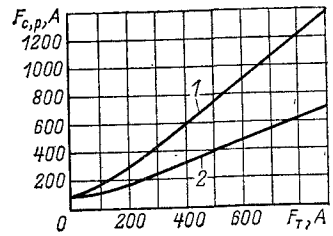


Рис. 5-15. Тормозные характеристики реле ДЗТ-11.

Время срабатывания реле ДЗТ-11 при 3-кратном токе срабатывания и коэффициенте торможения $k_т$=0,35 не превышает 0,04 с, при $2I_{ср}$ — около 0,05 с. Для реле ДЗТ-11 зависимость м. д. с. срабатывания реле $F_{ср}$ от изменения м. д. с. тормозной обмотки $F_т$ — тормозная характеристика $F_{ср}=f(F_т)$ дана на рис. 5-15. Торможение наиболее эффективно при угле между токами рабочей и тормозной обмоток в диапазоне 0±30°, наименее эффективно в диапазоне 90±30°.

Кривые *1* и *2* на рис. 5-15 представляют собой соответственно наибольшую и наименьшую зависимость $F_{ср}=f(F_т)$ при различных углах сдвига фаз между токами рабочих и тормозной обмоток, при нормальной затяжке пружины реле. Характеристику *1* используют при определении чувствительности защиты, а *2* — при определении количества витков тормозной обмотки.

Поведение дифференциальной защиты с реле ДЗТ-11 при внешних к. з. принято оценивать по значению коэффициента $k_т$, представляющего собой отношение тока срабатывания $I_{ср}$ к току торможения $I_т$. Коэффициент торможения определяют по тормозным характеристикам — по кривой *2* рис. 5-15, для реле ДЗТ-11 при $F_т$=300 А

$$k_т = \frac{I_{ср}}{I_т} = \frac{F_{ср} w_т}{F_т w_р},$$

где $w_р$, $w_т$ — количество витков рабочей и тормозной обмоток.

Коэффициент торможения может быть изменен в следующих пределах:

а) от 0,1 и выше при наибольшей уставке по току срабатывания. Это значение $k_т$ является наименьшим и выполняется при $w_т$=1; при включении большего количества тормозных витков $k_т$ пропорционально возрастает;

б) от 0,55 и ниже при наименьшей уставке по току срабатывания.

Например, для ДЗТ-11 по кривой *2* рис. 5-15 при $F_т$=300 А находим $F_{ср}$=240 А;

$$k_{т(а)} = \frac{F_{ср}\, w_{т,min}}{F_т\, w_{р,min}} = \frac{240 \cdot 1}{300 \cdot 8} = 0{,}1;$$

$$k_{т(б)} = \frac{F_{ср}\, w_{т,max}}{F_т\, w_{р,max}} = \frac{240 \cdot 24}{300 \cdot 35} = 0{,}55.$$

Наладка реле РНТ, ДЗТ

1. В соответствии с § 5-1 и 5-2 выполняют осмотр реле, проверку механической части, изоляции.

2. При включении исполнительного органа — реле РТ-40 по схеме рис. 5-16, *а* прове-

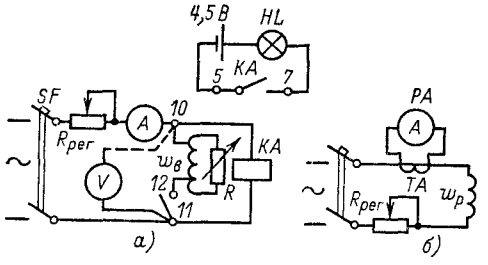


Рис. 5-16. Схемы проверки реле РНТ-565—РНТ-567 и ДЗТ-11.

а — исполнительного органа (цифрами обозначены зажимы реле); *б* — полностью собранного реле (контакт реле включают по схеме рис. 5-16, *а*).

ряют ток и напряжение срабатывания, коэффициент возврата реле РТ-40. Нормируемые значения 0,16—0,17 А; 3,5—3,6 В; $k_в = 0{,}8 \div 0{,}85$ (0,17 А с допуском —0,01 А; 3,6 В с допуском —0,1 В).

Проверку и в случае необходимости регулировку реле РТ-40 ведут в соответствии с указаниями § 5-2 со следующими уточнениями: зазоры между полкой якоря и полюсами магнитопровода (при втянутом положении якоря) должны быть одинаковыми и равными 0,3—0,4 мм (проверяют калибровочной пластинкой или щупом), суммарный воздушный зазор между неподвижными замыкающими контактами и мостиком 2—2,5 мм.

При регулировке реле необходимо отвести указатель вправо до отказа, при токе 0,16—0,17 А выбрать такое начальное положение якоря, при котором напряжение на обмотке реле, измеренное вольтметром с малым потреблением, равнялось бы 3,5—3,6 В (4,3—4,4 В при частоте 60 Гц); зафиксировать положение якоря относительно полюсов левым упорным винтом и установить указатель на риску таблички; изменением натяжения пружины добиться срабатывания реле при токе 0,16—0,17 А. Повторно проверить напряжение срабатывания.

Во избежание вибрации подвижной системы в начальном и конечном положении якоря после срабатывания между упорными винтами и якорем устанавливают небольшой зазор (не более 1 мм). Левый упор устанавливают так, чтобы контактный мостик не заходил за неподвижные контакты.

3. Проверку м. д. с. срабатывания реле выполняют при поочередной подаче тока в одну из рабочих обмоток $w_р$ (рис. 5-12, 5-13), максимальном количестве включенных витков этой обмотки, отсутствии тока в тормозных обмотках $w_т$ реле ДЗТ-11, замкнутой цепи короткозамкнутой обмотки реле $w_к$ РНТ — по схеме рис. 5-16, *б* или от установки типа У-5052 (см. § 5-1). Перед измерением устанавливают заданное значение сопротивления $R_к$ (рис. 5-12) в цепи короткозамкнутой обмотки реле РНТ (см. ниже). Для реле всех исполнений м. д. с. срабатывания должна быть равна 100±5 А. При откалиброванном исполнительном органе подрегулировку м. д. с. срабатывания выполняют изменением сопротивления резисторов $R_ш$ (рис. 5-12 и 5-13), включенных во вторичную обмотку НТТ. Изменение м. д. с. срабатывания изменением калибровки исполнительного органа недопустимо.

Сопротивление реостата $R_{рег}$ должно быть по крайней мере в 10 раз больше, чем сопротивление реле, во избежание искажения формы кривой тока.

Питание схемы осуществляется от источника с синусоидальным напряжением.

4. Для реле РНТ производят проверку правильности выполнения короткозамкнутой обмотки. Следует убедиться, что при изменении $R_к$ в пределах 0—10 Ом и замкнутой цепи $w_к$ м. д. с. срабатывания практически не изменяется, а при размыкании цепи $w_к$ м. д. с. срабатывания уменьшается на 20—30 %.

Если указанный эффект не обнаружен, измеряют ток в цепи короткозамкнутой обмотки при первичном токе, близком к току срабатывания. При неверном включении секций короткозамкнутой обмотки ток в ее цепи практически отсутствует.

Сопротивление $R_к$ в цепи короткозамкнутой обмотки устанавливают:

а) при использовании реле РНТ для защиты генераторов, синхронных компенсаторов, сборных шин $R_к = 10$ Ом;

б) в схемах защиты трансформаторов, блоков генератор — трансформатор, реакторов, электродвигателей $R_к = 2{,}5 \div 4$ Ом.

Если трансформаторы тока дифференциальной защиты сильно загружены, рекомендуется установить $R_к = 1$ Ом.

Не следует оставлять разомкнутой цепь обмотки $w_к$, так как в этом случае ухудшается отстройка реле от апериодических составляющих токов короткого замыкания.

5. Проверку отсутствия взаимной индукции между тормозной и вторичными обмотками реле ДЗТ-11 выполняют при подаче в тормозную обмотку м. д. с. торможения, которая будет иметь место при рабочей уставке и максимальном токе к. з. вне зоны дифференциальной защиты соответствующей стороны защищаемого трансформатора. Измеряют напряжение на разомкнутой вторичной обмотке реле ДЗТ. При м. д. с. тормозной обмотки, равной 150 А, напряжение на вторичной обмотке не должно быть более 0,1 В.

6. Чтобы проверить коэффициент отстройки реле, определяют первичный ток срабатывания $I_{1с.р}$ при питании рабочей обмотки реле РНТ или последовательно соединенных рабочей и тормозной обмоток реле ДЗТ-11 (количество витков обмоток реле ДЗТ-11 $w_т = 24$, $w_р + w_{ур} = 35 + 34$). Затем по этой же цепи пропускают ток $2I_{1с.р}$ ($5I_{1с.р}$), а указатель ис-

Таблица 5-8

Контрольные точки тормозных характеристик при нормальной регулировке исполнительного органа реле ДЗТ-11

Тормозная цепь			Рабочая цепь				
Количество витков	Ток, А	М. д. с. торможения, А	Количество витков	Контрольные точки			
				Торможение		Срабатывание	
				Ток, А	М. д. с., А	Ток, А	М. д. с., А
$w_т$=24	12,5	300	$w_р$+$w_{ур}$=35+34	3,45	240	6,1	420

полнительного органа устанавливают так, чтобы реле срабатывало при токе $2I_{1с.р}$ ($5I_{1с.р}$). После этого определяют ток срабатывания исполнительного органа $I^{(2)}_{с.р}$ ($I^{(5)}_{с.р}$) по схеме рис. 5-16, *а*.

Коэффициент отстройки реле $k_{отс}$ определяют как отношение синусоидального тока срабатывания $I^{(2)}_{с.р}$, $I^{(5)}_{с.р}$ исполнительного органа при первичном токе, равном $2I_{1с.р}$, $5I_{1с.р}$ соответственно, к синусоидальному току срабатывания исполнительного органа $I^{(1)}_{с.р}$, соответствующему первичному току $I_{1с.р}$,

$$k^{(2)}_{отс} = \frac{I^{(2)}_{с.р}}{I^{(1)}_{с.р}} = 1{,}2 \div 1{,}3;$$

$$k^{(5)}_{отс} = \frac{I^{(5)}_{с.р}}{I^{(1)}_{с.р}} = 1{,}35 \div 1{,}5.$$

Коэффициент отстройки исправного реле должен находиться в указанных пределах.

7. Проверку контрольных точек тормозных характеристик реле ДЗТ-11 производят при подаче синусоидального тока от источника с регулировочным реостатом в рабочую обмотку и тока от другого аналогичного источника в тормозную обмотку. Для изменения разности фаз тормозную обмотку питают через фазорегулятор или подключают обмотки поочередно к различным линейным и фазным напряжениям трехфазной сети переменного тока (рис. 5-17). При указанных в табл. 5-8 значениях рабочих и тормозных м. д. с. реле срабатывает (контрольная точка «срабатывание») или не срабатывает (контрольная точка «торможение») при любой разности фаз (от 0 до 360°) между рабочим и тормозным токами.

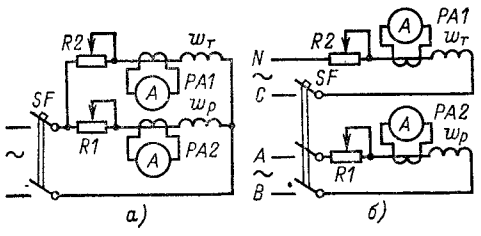


Рис. 5-17. Схемы для проверки тормозных характеристик реле ДЗТ-11.

а — при совпадении токов по фазе; *б* — при угле сдвига токов 90°.

Если м. д. с. срабатывания отличается от значений, приведенных в табл. 5-8, больше чем на ±10 %, снимают тормозную характеристику реле до м. д. с. торможения 800—1000 А.

8. Проверяют надежность работы контактов реле при изменении тока от $1{,}05I_{с.р}$ до $5I_{с.р}$.

9. Окончательно проверяют затяжку винтовых соединений. Устанавливают витки обмоток в соответствии с уставками. Реле закрывают крышкой. Измеряют токи срабатывания реле на рабочих уставках со стороны каждого «плеча» защиты. Рабочие, уравнительные и тормозные обмотки реле при этом включают по той схеме, по которой они будут включены в цепях трансформаторов тока. Для реле ДЗТ измеряют токи срабатывания без торможения и с включенным торможением (последнее, если по тормозной характеристике возможно срабатывание реле при заданных уставках торможения).

10. Проверку реле в полной схеме защиты выполняют в соответствии с § 5-27.

Назначение защиты ДЗТ-21

Дифференциальная защита ДЗТ-21 используется в качестве основной защиты трех фаз силового трансформатора или автотрансформатора при всех видах к. з. и позволяет обеспечить торможение от двух групп трансформаторов тока.

Приставка дополнительного торможения ПТ-1 предназначена для создания торможения от одной группы трансформаторов тока и используется, если в схеме защиты требуется осуществить торможение от трех групп трансформаторов тока.

Автотрансформаторы тока АТ-31 и АТ-32 предназначены для расширения диапазона выравнивания токов плеч одной фазы защиты и для ее подключения к трансформаторам тока с номинальным вторичным током 1 А.

Конструктивно защита выполнена в виде кассеты, содержащей три модуля реле дифференциальной защиты МРЗД и модуль питания и управления МПУ.

Защита ДЗТ-21 выпускается вместо реле ДЗТ-13 и ДЗТ-14, снятых с производства.

Основные технические данные защиты ДЗТ-21

Номинальная частота 50 Гц.

Регулирование минимального значения дифференциального тока срабатывания защиты при отсутствии торможения $I_{*д,0,ср}$ воз-

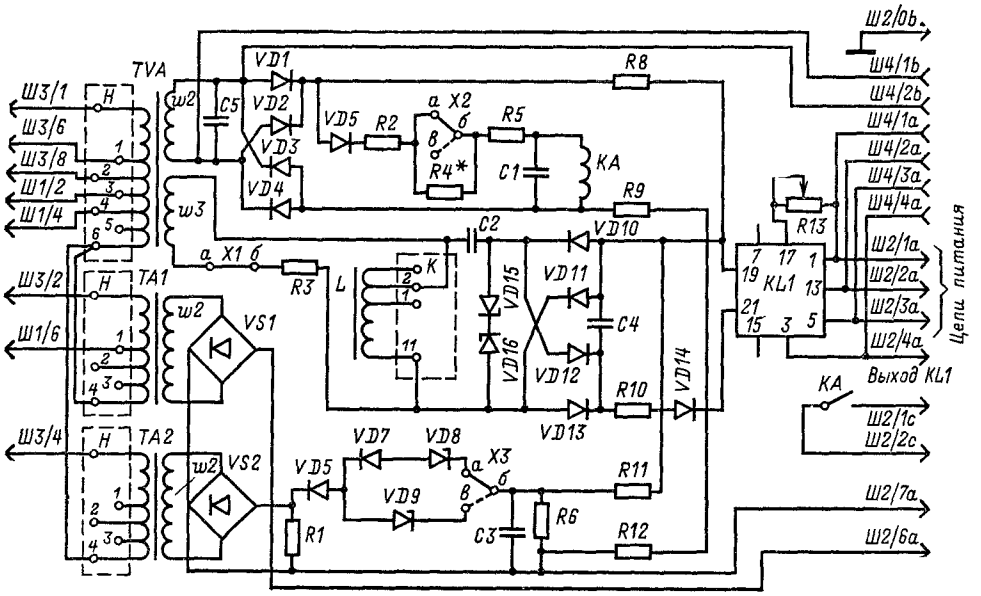


Рис. 5-18. Схема модуля реле дифференциальной защиты МРЗД.

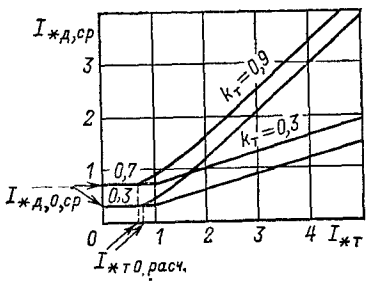


Рис. 5-19. Тормозные характеристики защиты ДЗТ-21.

можно в пределах 0,3—0,7 номинального тока ответвления первичной обмотки трансреактора *TVA* (рис. 5-18 и 5-19); указанная обмотка имеет шесть ответвлений; номерам ответвлений *1, 2, 3, 4, 5,* 6 соответствуют номинальные токи 5; 4,6; 4,25; 3,63; 3; 2,5 А. Первичные обмотки трансформаторов *TA1, TA2* имеют по четыре ответвления (*1, 2, 3, 4*), которым соответствуют номинальные токи 5; 3,75; 3; 2,5 А.

Диапазон выравнивания токов в устройствах ДЗТ-21 и ПТ-1 равен 2,5—5 А со ступенями, не превышающими 20 %, а для автотрансформаторов АТ-31 и АТ-32 указанный диапазон составляет 0,34—2,5 А и 5—33 А соответственно.

Защита обеспечивает на минимальной уставке по току срабатывания отстройку от бросков тока намагничивания с апериодической составляющей и амплитудой, превышающей амплитуду номинального тока ответвления *TVA* до 6 раз и отстройку от периодических токов включения с амплитудой, превышающей амплитуду номинального тока ответвления до 2 раз.

Коэффициент возврата защиты не менее 0,6.

Диапазон регулирования коэффициента торможения 0,3—0,9.

Время срабатывания защиты при двукратном токе срабатывания и отсутствии торможения: с выходным промежуточным реле не более 45 мс, без выходного реле не более 33 мс.

Напряжение питания защиты ДЗТ-21 220 В или 110 В постоянного тока.

Коммутационная способность контактов выходного реле защиты в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой и постоянной времени, не превышающей 0,005 с, не менее 50 Вт при напряжении до 250 В и токе до 2 А. При этих условиях количество срабатываний защиты не менее 1000.

Защита ДЗТ-21 надежно срабатывает при напряжении постоянного тока в пределах $(0,8—1,1)U_н$ и при напряжении выпрямленного тока $(0,7—1,2)U_н$.

Потребляемая мощность в цепях переменного тока защиты при одностороннем питании не превышает 2 В·А на фазу при номинальном токе ответвления; совместно с выравнивающим автотрансформатором тока не превышает 5 В·А на фазу при номинальном токе ответвления автотрансформатора АТ-31 и при первичном токе 5 А для автотрансформатора АТ-32.

Защита ДЗТ-21 при $U_н=220$ В потребляет в нормальном режиме 25, в режиме срабатывания 33, а при $U_н=110$ В — 15 и 23 Вт соответственно.

Элементы защиты ДЗТ-21 в нормальном режиме длительно выдерживают напряжение $1,1U_н$ постоянного тока и $1,2U_н$ выпрямленного тока.

Автотрансформаторы тока допускают длительное протекание тока, равного трем номинальным токам ответвления, но не менее 1,2 и не более 10 А.

Дифференциальные и тормозные цепи защиты, а также приставка торможения выдерживают длительное протекание тока 10 А на всех ответвлениях.

Односекундная термическая стойкость защиты, приставки и автотрансформаторов не менее 40-кратного номинального тока ответвления, но не менее 20 и не более 200 А.

Устройство и принцип действия ДЗТ-21

Для отстройки защиты от бросков намагничивающего тока силовых трансформаторов и от переходных токов небаланса, протекающих в дифференциальных цепях, используется время-импульсный принцип отстройки в сочетании с торможением от второй гармоники дифференциального тока. Для повышения отстройки от «трансформированных» однополярных бросков намагничивающего тока используется принцип коррекции формы кривой указанных токов.

Принципиальная схема МРЗД содержит следующие функциональные узлы: рабочую цепь, дифференциальную отсечку, цепь торможения от второй гармоники дифференциального тока, цепь процентного торможения, реагирующий орган *KL1* (рис. 5-18). Выпрямленный сигнал рабочей цепи при определенных условиях воздействует на срабатывание реагирующего органа *KL1*; выпрямители тормозных цепей включены встречно-параллельно выпрямителям рабочей цепи.

Рабочая цепь выполняет функции дифференцирующего звена и состоит из трансреактора *TVA*, выпрямительного моста на диодах *VD1—VD4* и резисторов *R7—R9*. Постоянная времени вторичной цепи трансреактора *TVA* совместно с его ветвью намагничивания равна примерно 0,06 периода промышленной частоты и является оптимальной для корректирования формы кривой «трансформированных» однополярных токов включения. Апериодическая составляющая тока к. з. поглощается ветвью намагничивания трансреактора *TVA* полностью за время 0,18 периода промышленной частоты. Конденсатор *C5* предназначен для защиты рабочей цепи от помех частотой более 1 кГц. При больших кратностях токов к. з. в защищаемой зоне, особенно при наличии апериодической составляющей, может наступить насыщение трансформаторов тока защиты, при этом во вторичном токе появляются паузы. Для обеспечения быстродействия и надежности реле в этих режимах применена дифференциальная отсечка, исполнительным органом которой является реле *KA* с магнитоуправляемым контактом. Диод *VD5* препятствует разряду конденсатора *C1* на рабочую цепь во время пауз в токе. С помощью накладки *X2*, введенной на лицевую панель, может быть получена уставка отсечки $6I_{н}$ ответвления или $9I_{н}$ с отклонением не более ±10 %.

В цепи торможения от второй гармоники стабилитроны *VD15*, *VD16* предназначены для ограничения тормозного сигнала на уровне, соответствующем периодическому броску тока намагничивания с амплитудой, равной удвоенному номинальному току ответвления. В качестве тормозного сигнала используется выпрямленный ток конденсатора *C2*, являющегося элементом фильтра второй гармоники *LC2*. Добротность фильтра равна примерно 2,3. При этом обеспечивается отстройка от периодического броска намагничивающего тока, имеющего длительность пауз не менее 3,33 мс и относительное содержание второй гармоники не менее 43 %.

В цепи процентного торможения резистор *R12* служит для регулирования коэффициента торможения. В начальной части тормозной характеристики (рис. 5-19) имеется горизонтальный участок, расчетная длина которого вдоль оси $I_{*т}$, обозначаемая $I_{*т0расч}$, зависит от того, какой из стабилитронов (*VD8* или *VD9*) включен в цепь торможения; указанная величина, равная 0,6 или 1 номинального тока ответвления трансреактора *TVA*, может быть установлена переключением накладки *X3*.

Характеристики $I_{*д.ср}=f(I_{*т})$ на рис. 5-19 даны в относительных единицах

$$I_{*д,ср}=\frac{I_{д,ср}}{I_{д,н}};$$

$$I_{*т}=0{,}5\left(\frac{I_{т1}}{I_{т,н1}}+\frac{I_{т2}}{I_{т,н2}}\right),$$

где $I_{д,н}$, $I_{т,н1}$, $I_{т,н2}$ — номинальные токи используемых в схеме защиты ответвлений дифференциальной и тормозных цепей соответственно; $I_{д,ср}$ — ток срабатывания, протекающий по дифференциальной цепи.

Схема реагирующего органа *KL1* выполнена на пяти транзисторах, содержит последовательно включенные релейный формирователь *РФ*, элемент выдержки времени на возврат $B_{в}$ и элемент выдержки времени на срабатывание *В*. Резистор *R13* (рис. 5-18), изменяющий ток смещения *РФ*, служит для регулирования минимального тока срабатывания $I_{*дос р}$. При однополярном броске намагничивающего тока длительность пауз на выходе *РФ* больше выдержки времени на возврат элемента $B_{в}$, и на выходе последнего имеются паузы с периодом следования, равным периоду промышленной частоты. При этом элемент *В*, имеющий уставку более периода промышленной частоты, не срабатывает. При синусоидальном токе на входе реле, превышающем уставку, длительность пауз на выходе *РФ* становится меньше уставки $B_{в}$; при этом сигнал на выходе элемента $B_{в}$ не имеет пауз и элемент *В* срабатывает. Уставка элемента $B_{в}$ находится в пределах 4,5—5 мс, уставка элемента *В* — в пределах 21—23,5 мс.

Модуль питания и управления защиты ДЗТ-21 (рис. 5-20) содержит параметрический стабилизатор напряжения на стабилитронах *VD4*, *VD5* и резисторах *R1—R4*. Перемычки, показанные штриховыми линиями, устанавливают при заводской калибровке. Номинальные напряжения питания полупроводниковых цепей — 13 и +6 В. Диод *VD6*-2 защищает стабилитроны *VD1—VD3* от подачи на модуль напряжения обратной полярности. Конденсатор *C1* предотвращает влияние помех на реагирующие органы реле.

Усилитель, выполненный на транзисторах *VT1*, *VT2*, имеет на входе схему ИЛИ на диодах *VD1—VD3* и служит для связи выходов реагирующих органов реле каждой фазы с промежуточным реле на герконе *K1*. После-

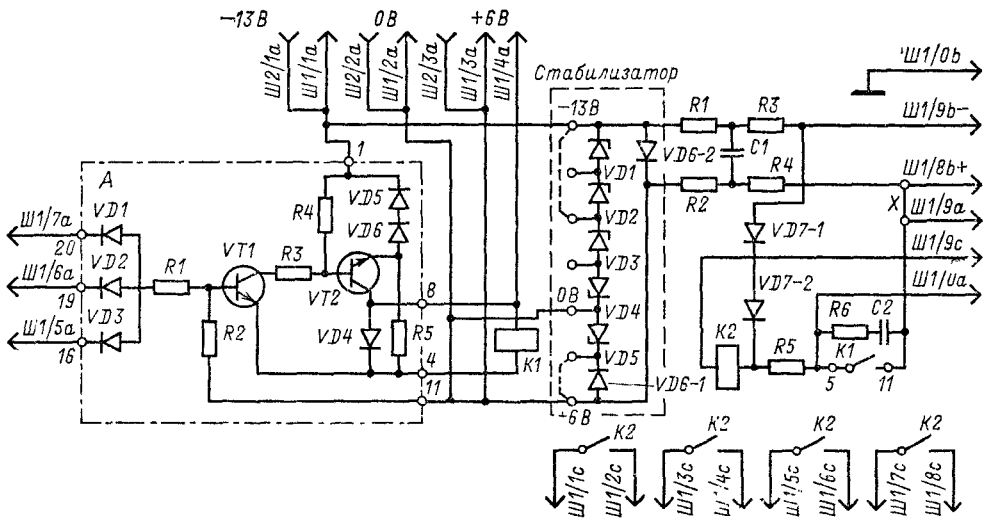


Рис. 5-20. Схема модуля питания и управления МПУ защиты ДЗТ-21.

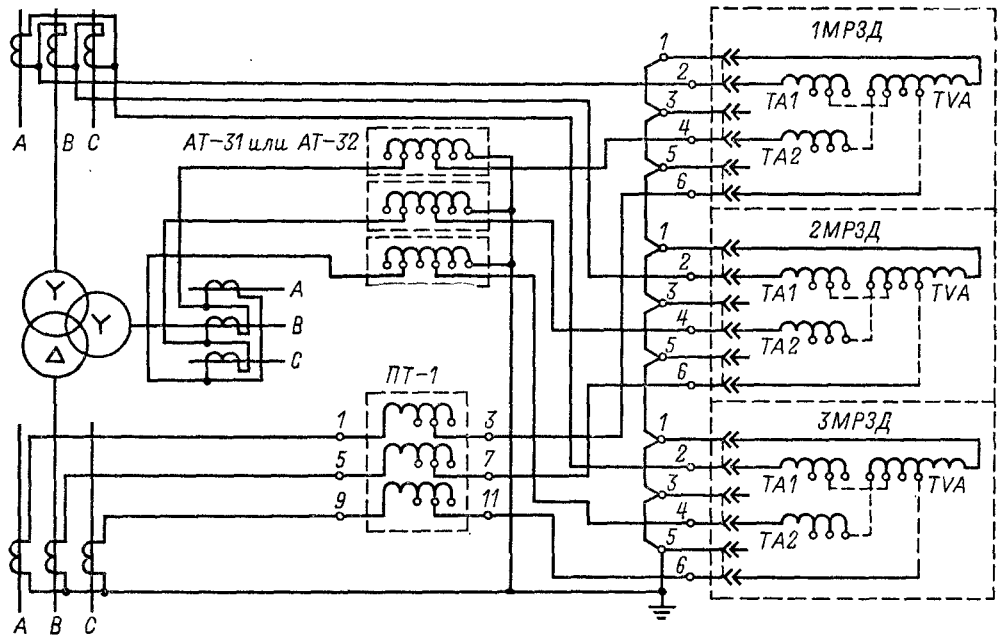


Рис. 5-21. Схема цепей переменного тока защиты ДЗТ-21.

довательно с обмоткой реле *К2* к выводу *Ш1/9с* модуля подключают реле типа РУ-21. В случае необходимости к выводу *Ш1/0а* подключают дополнительное промежуточное реле, которое потребляет мощность не более 8 Вт. Номинальный ток указательного реле РУ-21 0,015 А при напряжении питания 220 В или 0,025 А при напряжении 110 В. Полная схема цепей переменного тока защиты ДЗТ-21 дана на рис. 5-21.

Проверка и наладка защиты ДЗТ-21

1. Внешний осмотр защиты выполняют в соответствии с § 5-1.

2. Сопротивление изоляции цепей защиты относительно корпуса и между цепями измеряют мегаомметром 1000 В. Предварительно перемыкают между собой зажимы *Ш1/8b* и *Ш1/9b* МПУ («+» и «—» питания). Измерения выполняют дважды: при вынутых и при вставленных в разъемы блоках, содержащих полупроводниковые приборы. После окончания измерений временную перемычку снимают. Сопротивление изоляции цепей переменного тока защиты и цепей питания относительно корпуса во всех случаях должно быть не менее 10 МОм.

3. Напряжение срабатывания реле *К2* в

схеме МПУ должно находиться в пределах 40—100 В для исполнения на номинальное напряжение 220 В или 22—56 В для исполнения на 110 В.

4. Проверку фильтра второй гармоники МРЗД производят в следующей последовательности. Вынимают реагирующий орган *KL1* из разъема. Между точками *19* и *21* гнездной колодки *KL1* устанавливают перемычку. Размыкают накладку *X1* на плите трансреактора *TVA*. От генератора звуковой частоты подводят ток 3 мА к точке *б* накладки *X1* и общей точке обмотки дросселя *L* и конденсатора *C2*. Резонансная частота фильтра должна находиться в пределах 97—103 Гц. Напряжение на обмотке дросселя *L* при частоте 100 Гц и токе фильтра 3 мА должно находиться в пределах 17,5—20,5 В. Резонансную частоту фильтра при необходимости регулируют изменением воздушного зазора дросселя *L*. После окончания измерений замыкают накладку *X1* и снимают перемычку *19—21* гнездной колодки *KL1*.

5. Проверка реагирующего органа *KL1* состоит в проверке уставок элементов $B_в$ и *B*. Уставку элемента $B_в$ проверяют следующим образом:

а) подключают вход осциллографа к зажимам *13* и *15* гнездной колодки *KL1*, при этом входной зажим осциллографа, соединенный с корпусом прибора, должен подключаться к зажиму *13*;

б) подают напряжение питания;

в) на вход рабочей цепи подают синусоидальный ток, несколько меньший тока срабатывания реле. Затем ток плавно увеличивают до срабатывания, и в момент срабатывания фиксируют длительность импульсов и пауз на экране осциллографа. Передний и задний фронты импульсов на выходе *РФ* имеют точки излома, определяемые моментами закрытия или открытия коммутирующих диодов в схеме *KL1*. Длительность пауз фиксируют между указанными точками излома.

Уставка элемента $B_в$ может считаться в норме, если продолжительность пауз и импульсов в момент срабатывания примерно одинакова или длительность пауз несколько меньше продолжительности импульсов.

6. Уставку элемента *B* определяют следующим образом:

а) включают напряжение питания;

б) с помощью миллисекундомера определяют время от момента замыкания точек *Ш1/4а* и *Ш1/1а* (на колодке разъема МПУ) до момента замыкания контактов выходного реле *K2*;

в) с помощью того же миллисекундомера определяют время от момента замыкания точек *5* и *19* гнездной колодки *KL1* через резистор 0,8—1,2 кОм до момента замыкания контактов выходного реле.

Уставку элемента *B* определяют как разность измеренных по пп. «б», «в» значений.

При проверке реагирующего органа *KL1* необходимо все подключения к схеме *KL1* выполнять при отключенном напряжении питания с разрывом обоих полюсов.

При проверке времени срабатывания защиты ток на ее вход должен подаваться от источника синусоидального напряжения через последовательно соединенные дроссель и резистор. Постоянная времени указанной цепи должна быть не менее 10 мс.

7. При проверке МПУ отдельно от схемы защиты необходимо к зажимам *Ш1/1а* и *Ш1/2а* подключать нагрузочный резистор 200 Ом для исключения перегрузки стабилитронов.

При проверках МПУ и защиты рекомендуется пользоваться данными, приведенными в табл. 5-9.

Таблица 5-9

Напряжения контрольных точек защиты

Тип модуля	Контрольные точки	Напряжение, В
МРЗД	*Ш4/1а—Ш4/2а*	—12,4÷—13,5
	Ш4/3а—Ш4/2а	4,8—6,5
МПУ	*Ш2/1а—Ш2/2а*	—12,4÷—13,5
	Ш2/3а—Ш2/2а	4,8—6,5
KL1	*15—13*; *7—13*; *3—13*	0—0,2
	15—13; *7—13*; *3—13*	10,5—13

Примечание. Для *KL1* верхняя строка соответствует случаю бездействия защиты, а нижняя — срабатыванию при подаче постоянного тока на вход *KL1* без нагрузки на выходе *KL1* С нагрузкой (в схеме защиты) напряжение в контрольных точках *15—13* находится в пределах 3,7—5,5 В.

8. Тормозную характеристику защиты ДЗТ-21 снимают на рабочих уставках для МРЗД каждой фазы. При этом определяют: минимальный ток срабатывания защиты $I_{*дос р}$, расчетное значение горизонтального участка тормозной характеристики $I_{*т0расч}$, коэффициент торможения $k_т$. Для снятия тормозной характеристики ток $I_д$ подают на первичную обмотку трансреактора *TVA*, тормозные токи $I_{т1}$, $I_{т2}$ — к первичным обмоткам трансформаторов *TA1*, *TA2* (на отпайки, соответствующие рабочим уставкам).

Определяют ток $I_{д\,ср,отс}$ срабатывания реле *КА* токовой отсечки МРЗД каждой фазы. Для этого устанавливают временную перемычку между зажимами *Ш4/4а* и *Ш4/2а* МРЗД (рис. 5-18), чтобы вывести из действия чувствительный орган защиты. Затем подают ток на первичную обмотку.

9. Для проверки срабатывания защиты включают отпайки обмоток всех элементов защиты в цепях тока и все накладки защиты в соответствии с рабочими уставками. Окончательно проверяют надежность всех соединений. Защиту закрывают крышкой. Рабочие и тормозные цепи защиты с автотрансформаторами тока и приставкой дополнительного торможения (в случае их использования) включают по той схеме, по которой они будут подключены к трансформаторам тока. Целесообразно собрать постоянную схему цепей тока на панели защиты, а ток подавать от постороннего источника через штепсельные крышки типа ШК-4, ШК-6, вставленные в испытательные блоки типа БИ-4, БИ-6 панели защиты. Измеряют токи срабатывания пофазно со стороны каждого «плеча» защиты без торможения и с включенным торможением (последнее, если по тормозной характеристике возможно срабатывание защиты на рабочих уставках при протекании тока со стороны данного

«плеча»). Срабатывание определяют по замыканию цепи контакта реле *К2* МПУ (рис. 5-20).

10. Проверку защиты током нагрузки первичной цепи производят в соответствии с § 5-27. Для измерения напряжения небаланса дифференциальной цепи МРЗД прибор с высоким внутренним сопротивлением подключают к зажимам *1b* и *2b* разъема *Ш4* МРЗД.

11. При проверках защиты ДЗТ-21 необходимо обращать особое внимание на надежность цепей в разъемах модулей, плотность прилегания разъемов, отсутствие остаточного зазора между частями разъема при полностью вставленных модулях, зафиксированных винтами крепления.

5-5. РЕЛЕ КОНТРОЛЯ СИНХРОНИЗМА РН-55

Технические данные

Схема внутренних соединений реле показана на рис. 5-22, *а*. Номинальные напряжения катушек реле:

РН-55/90 60 В, 30 В;
РН-55/120 60 В, 60 В;
РН-55/130 100 В, 30 В;
РН-55/160 100В, 60 В;
РН-55/200 100 В, 100 В.

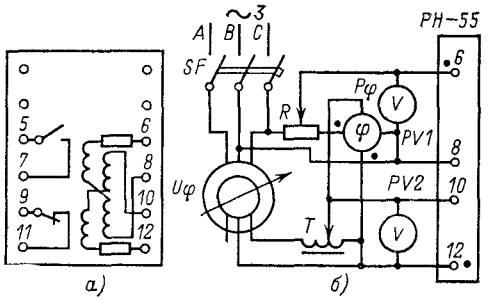


Рис. 5-22. Схемы реле РН-55.

а — внутренних соединений; *б* — проверки реле.

Бо́льшие значения напряжений относятся к цепи, выведенной на зажимы *6* и *8*, меньшие — к цепи, выведенной на зажимы *10* и *12*.

Номинальная частота 50 Гц.

При отклонении частоты на ±3 Гц от номинального значения угол срабатывания изменяется не более чем на 7 %.

Реле срабатывает при углах сдвига фаз между векторами напряжений в пределах 20—40° при номинальных напряжениях. Погрешность угла срабатывания не превышает 8 %, разброс не более 5 %. Коэффициент возврата реле по углу не менее 0,8.

Время срабатывания реле при угле сдвига фаз, равном полуторакратному значению уставки, и номинальном напряжении — не более 0,1 с.

Замыкающий контакт реле замыкается без вибрации при углах сдвига фаз, равных 1,3 уставки и выше, и номинальном напряжении на каждой обмотке.

При номинальных напряжениях, совпадающих по фазе, мощность, потребляемая каждой обмоткой, не превышает 6,5 В·А.

Контакты реле средней мощности — см. § 5-1.

Указания по проверке реле

Проверку механической части реле выполняют аналогично проверке реле РТ-40 (§ 5-2). Зазор между якорем и полюсами электромагнита устанавливают около 0,6 мм.

Проверку электрических параметров реле и в случае необходимости регулировку выполняют по схеме рис. 5-22, *б*.

Сопротивление реостата *R* должно быть таким, чтобы через реостат протекал номинальный ток фазометра.

1. При соблюдении указанных на рис. 5-22, *б* полярностей, номинальных напряжениях на обмотках реле и показании фазометра 0° реле не должно срабатывать.

2. Проверку угла срабатывания и возврата реле выполняют в начале и в конце шкалы и на рабочей уставке при номинальных напряжениях обмоток и плавном изменении угла сдвига фаз. Для исключения угловых погрешностей схемы измерений определение углов срабатывания и возврата выполняют дважды: при напряжении на одном из входов опережающем и затем отстающем по фазе от напряжения на другом входе. За действительное значение угла срабатывания или возврата принимают среднеарифметическое полученных результатов измерений. Регулировку реле по углу срабатывания и коэффициенту возврата производят так же, как и для реле РТ-40. Рекомендуемый коэффициент возврата 0,8 (конец шкалы) — 0,87 (начало шкалы).

3. Проверяют напряжение срабатывания и возврата реле на рабочей уставке от каждой обмотки. При этом вторая обмотка разомкнута.

4. Проверяют надежность работы контактов реле при угле сдвига 180° между напряжениями обмоток или при кратковременной подаче на одну из обмоток напряжения $2U_н$.

5-6. ИНДУКЦИОННЫЕ МАКСИМАЛЬНЫЕ РЕЛЕ ТОКА СЕРИЙ РТ-80 И РТ-90

Технические данные

Номинальные данные реле приведены в табл. 5-10, кинематическая схема реле и схемы внутренних соединений — на рис. 5-23, 5-24.

Потребляемая мощность при токе уставки реле РТ-81, РТ-82, РТ-83, РТ-84, РТ-85, РТ-86 не более 10 В·А, реле РТ-91, РТ-95 — не более 30 В·А. После срабатывания реле потребляемая мощность увеличивается на 15 %.

Реле РТ-83, РТ-84 и РТ-86 выдерживают длительное прохождение тока по обмотке до $1{,}1I_н$, реле РТ-81, РТ-82, РТ-85, РТ-91 и РТ-95 — до $1{,}1I_{уст}$ индукционного элемента.

Погрешность тока срабатывания индукционного элемента не превышает 5 %, а разброс не более 4 %. Коэффициент возврата индукционного элемента не менее 0,8.

Погрешность тока срабатывания электромагнитного элемента (отсечки) при уставках

Таблица 5-10

Номинальные данные реле серий РТ-80 и РТ-90

Реле	Номинальный ток А	Уставка времени срабатывания, с	Главный контакт	Сигнальный контакт
РТ-81/1	10	0,5; 1; 2; 3; 4	Нормальный	Нет
РТ-81/2	5	0,5; 1; 2; 3; 4	То же	»
РТ-82/1	10	2; 4; 8; 12; 16	»	»
РТ-82/2	5	2; 4; 8, 12; 16	»	»
РТ-83/1	10	1; 2, 3; 4	»	Есть
РТ-83/2	5	1; 2; 3; 4	»	»
РТ-84/1	10	4; 8; 12; 16	»	»
РТ-84/2	5	4; 8; 12; 16	»	»
РТ-85/1	10	0,5; 1; 2; 3; 4	Усиленный	Нет
РТ-85/2	5	0,5; 1; 2; 3; 4	То же	»
РТ-86/1	10	4; 8; 12; 16	»	Есть
РТ-86/2	5	4; 8; 12; 16	»	»
РТ-91/1	10	0,5; 1; 2; 3; 4	Нормальный	Нет
РТ-91/2	5	0,5; 1; 2; 3; 4	То же	»
РТ-95/1	10	0,5; 1; 2; 3; 4	Усиленный	»
РТ-95/2	5	0,5; 1; 2; 3; 4	То же	»

Примечания: 1. Выдержки времени даны при 10 кратном токе срабатывания.

2 Уставки срабатывания индукционного элемента реле исполнения 1 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 А, для реле исполнения 2 2, 2,5, 3, 3,5; 4; 4,5 и 5 А.

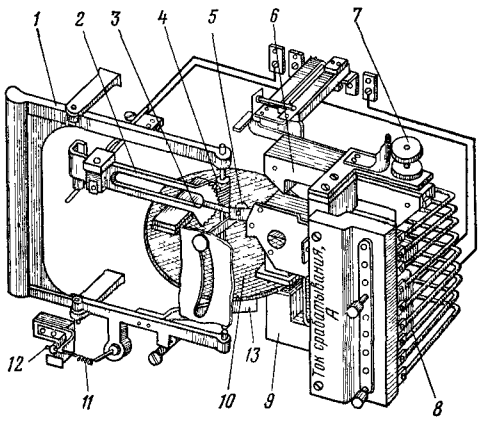


Рис 5-23. Кинематическая схема реле серии РТ-80.

1 — рамка с установленной на нее осью с диском; *2* — зубчатый сектор; *3* — постоянный магнит; *4* — червяк на оси диска; *5* — упор сектора; *6* — якорь электромагнитного реле, *7* — регулировочный винт отсечки; *8* — катушка реле; *9* — магнитная система; *10* — диск реле; *11* — арретирующая пружина; *12* — регулировочный винт; *13* — стальная скоба.

индукционного элемента 4 А (для реле с $I_н$ = =10 А) и 3 А (для реле с $I_н$=5 А) не превышает 30 %; при максимальных уставках индукционного элемента погрешность отсечки приведена ниже (здесь же дана шкала кратностей тока уставки отсечки по отношению к

Таблица 5-11

Отклонение времени срабатывания индукционного элемента от уставки при 10-кратном токе уставки

Реле	Отклонение времени срабатывания при уставке, с							
	0,5	1	2	3	4	8	12	16
РТ-81	±0,1	±0,15	±0,2	±0,2	±0,25	—	—	—
РТ-83	—	±0,15	±0,2	±0,2	±0,25	—	—	—
РТ-85	±0,1	±0,15	±0,2	±0,2	±0,25	—	—	—
РТ-82	—	—	±0,5	—	±0,5	±0,6	±0,75	±1,0
РТ-84	—	—	—	—	±0,5	±0,6	±0,75	±1,0
РТ-86	—	—	—	—	±0,5	±0,6	±0,75	±1,0

Таблица 5-12

Время срабатывания индукционного элемента при 4-кратном токе уставки

Реле	Время срабатывания при уставке, с							
	0,5	1	2	3	4	8	12	16
РТ-81	0,9	1,65	3,1	4,6	6,0	—	—	—
РТ-83	—	1,65	3,1	4,6	6,0	—	—	—
РТ-85	0,9	1,65	3,1	4,6	6,0	—	—	—
РТ-82	—	—	3,6	—	6,6	12,6	18,5	24
РТ-84	—	—	—	—	6,6	12,6	18,5	24
РТ-86	—	—	—	—	6,6	12,6	18,5	24
РТ-91	0,7	1,2	2,4	3,5	4,5	—	—	—
РТ-95	0,7	1,2	2,4	3,5	4,5	—	—	—

току уставки индукционного элемента для всех исполнений реле).

Кратность уставки отсечки	2	4	6	8
Погрешность, %	+15	+40	+60	+100

Отклонение времени срабатывания индукционного элемента от уставки при 10-кратном токе уставки (отсечка выведена) не превышает значений, приведенных в табл. 5-11.

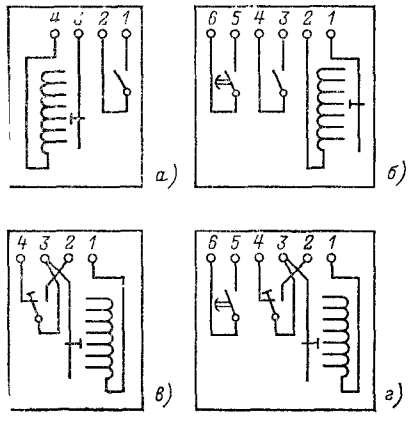


Рис. 5-24. Схемы внутренних соединений реле РТ-80 и РТ-90.

а — РТ-81, РТ-82, РТ-91; *б* — РТ-83, РТ-84; *в* — РТ-85, РТ-95; *г* — РТ-86.

Время срабатывания при 4-кратном токе уставки не более значений, приведенных в табл. 5-12.

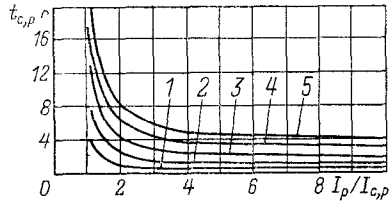


Рис. 5-25. Временные характеристики реле РТ-81, РТ-83 и РТ-85.

1 — уставка 0,5 с; *2* — уставка 1 с; *3* — уставка 2 с; *4* — уставка 3 с; *5* — уставка 4 с.

Зависимость времени срабатывания индукционного элемента от кратности тока в обмотке реле приведена на рис. 5-25 — 5-27.

Независимая часть время-токовой характеристики реле начинается при 8—10-кратном токе уставки, кроме реле РТ-91 и РТ-95, для которых указанная кратность 4—5.

При изменении частоты на ±3 % номинального значения ток срабатывания отсечки изменяется не более чем на 15 % значения тока, измеренного при номинальной частоте;

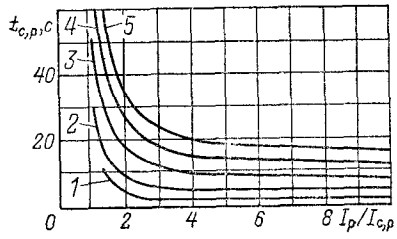


Рис. 5-26. Временные характеристики реле РТ-82, РТ-84 и РТ-86.

1 — уставка 2 с; *2* — уставка 4 с; *3* — уставка 8 с; *4* — уставка 12 с; *5* — уставка 16 с.

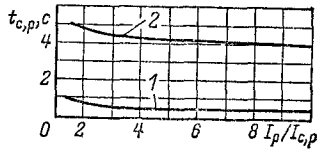


Рис. 5-27. Временные характеристики реле РТ-91 и РТ-95.

1 — уставка 0,5 с; *2* — уставка 4 с.

ток и время срабатывания при 10-кратном токе уставки индукционного элемента изменяются соответственно не более чем на +6 % и +15 %.

Время возврата реле при снижении тока в обмотке с $5I_{уст}$ до $0{,}7I_{уст}$ не превышает 0,8 с.

Инерционная ошибка реле не зависит от уставок и кратности $I_{дк}/I_{с.р}$ докоммутационного тока $I_{дк}$ и примерно равна 40 мс, за исключением реле РТ-91, РТ-95, для которых соответствующие зависимости приведены на рис. 5-28 и 5-29 (инерционная ошибка — это максимально возможный промежуток времени от момента сброса тока до момента замыкания контактов за счет сил инерции).

Главные усиленные контакты реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95 выполняют переключающими

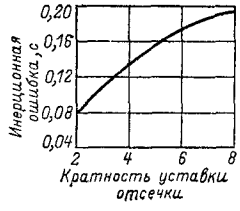


Рис. 5-28. Зависимость инерционной ошибки реле РТ-91 и РТ-95 от уставки отсечки (ток до коммутации $1{,}9I_{ср}$, сброс тока до $0{,}65I_{ср}$).

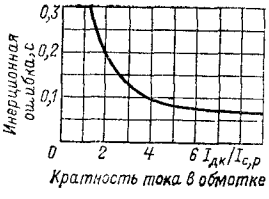


Рис. 5-29. Зависимость инерционной ошибки реле РТ-91 и РТ-95 от кратности тока до коммутации по отношению к току срабатывания (уставка отсечки 8, сброс тока до $0{,}65I_{ср}$).

без разрыва цепи трансформаторов тока; замыкающий контакт предназначен для замыкания цепи отключающей катушки выключателя, размыкающий — для дешунтирования ее.

Коммутационная способность контактов: замыкающие контакты нормального исполнения реле РТ-81, РТ-82, РТ-83, РТ-84 и РТ-91 способны включать постоянный или переменный ток 5 А при напряжении 24—250 В, но размыкание цепи должно быть произведено другими контактами, например вспомогательными контактами выключателя;

размыкающие контакты нормального исполнения способны отключать переменный ток 2 А и постоянный ток 0,5 А при напряжении 24 — 250 В.

Если управляемая цепь питается от трансформатора тока и при токе 4 А ее полное сопротивление не более 4 Ом, а при токе 40 А— не более 1,5 Ом, то контакты реле нормального исполнения способны шунтировать и дешунтировать эту цепь при токе до 50 А; контакты усиленного исполнения способны шунтировать и дешунтировать эту цепь при токе до 150 А; замыкающие сигнальные контакты способны замыкать или размыкать цепь постоянного тока до 0,2 А или переменного тока до 1 А при напряжении 24 — 250 В.

Проверка механической части реле

1. Выполняют осмотр реле и измеряют сопротивление изоляции в соответствии с § 5-1.

Якорь механизма отсечки должен свободно без трения поворачиваться вокруг своей оси и иметь осевой люфт 0,1—0,2 мм. Правый конец якоря с короткозамкнутым витком должен при срабатывании прилегать к магнитопроводу всей плоскостью без перекосов.

2. Диск не должен касаться полюсов магнитной системы и постоянного магнита как в нормальном положении реле, так и в перевернутом на 180° положении. Осевой люфт диска должен быть около 0,3 мм.

Зазоры между диском и полюсами электромагнита и постоянного магнита должны быть не менее 0,3 мм с каждой стороны. Люфт рамки в вертикальном направлении не должен превышать 0,5 мм.

3. Зубчатый сектор должен свободно вращаться на оси; свободный ход (люфт) в осевом направлении должен быть не более 0,5 мм.

При повороте рамки от руки сектор должен входить в зацепление с червяком при любом (в пределах шкалы уставок времени) положении поводка регулировки времени срабатывания; нормальная глубина зацепления должна быть не менее $^1/_3$ глубины нарезки.

Глубина зацепления установлена при сборке реле регулировкой положения скобы-держателя сектора, имеющей овальные отверстия. Точную регулировку производят упорным винтом рамки, обеспечивающим ход рамки 2,5—3 мм.

4. Зазоры между контактами должны быть:

а) главные замыкающие контакты реле РТ-81, РТ-82, РТ-83, РТ-84 и РТ-91 — не менее 2 мм (ограничитель должен слегка касаться контактной пружины главных контактов); размыкающие контакты — не менее 2 мм после срабатывания реле;

б) главные замыкающие контакты реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95 — $1{,}5_{+0{,}2}$ мм; размыкающие контакты (после срабатывания реле) — $2_{+0{,}2}$ мм;

в) сигнальные контакты реле РТ-83, РТ-84 и РТ-86 — 2—2,5 мм.

Зазоры главных контактов регулируют подгибанием упоров контактов и контролируют щупом. Контактная система показана на рис. 5-30.

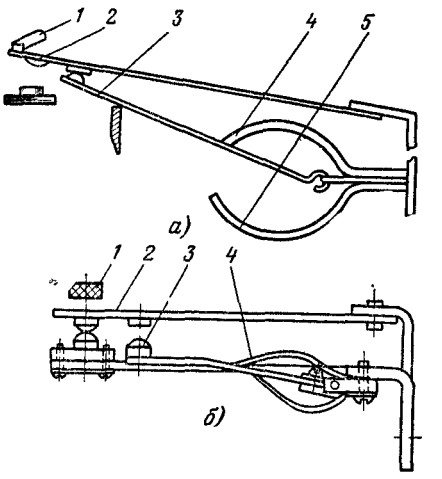


Рис. 5-30. Контактная система реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95.

а — кинематическая схема (реле сработало); *б* — общий вид (реле в обесточенном состоянии); *1* — изолированный упор; *2* — подвижный размыкающий контакт; *3* — замыкающий контакт; *4* и *5* — верхний и нижний упоры пружины.

5. Нажатие размыкающих контактов реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95 должно быть не менее 0,08 Н. Необходимую силу нажатия устанавливают подгибанием бронзовой контактной пластинки размыкающего контакта и контролируют граммометром. При определении силы нажатия шаровидный конец граммометра должен быть установлен на конце контактной пружины на расстоянии 1 мм от ее края перед контактной серебряной накладкой.

Нажатие пружины, возвращающей контактную пластинку замыкающего контакта, должно быть максимально возможным, но не менее 0,1 Н при условии, что якорь отсечки не будет останавливаться при срабатывании в промежуточном положении при токах в обмотке реле, равных: для реле РТ-85 и РТ-95— току срабатывания индукционного элемента (элемент отсечки при этом установлен в положение «бесконечность»); для реле РТ-86 — току срабатывания элемента отсечки при кратности 2.

Силу нажатия пружины измеряют граммометром на расстоянии 1—2 мм от свободного конца пружины.

Касание замыкающих и размыкающих контактов реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95 должно быть по центру. Регулировку положения точки касания размыкающих контактов производят перемещением пластинки с осью. При этом

расстояние между подвижной контактной пластинкой замыкающего контакта и неподвижной контактной пластинкой размыкающего контакта должно быть не менее 1 мм.

При срабатывании реле контактная пружина размыкающего контакта должна ложиться на упор с прогибом 0,2—0,3 мм.

После срабатывания реле плоскости контактной пластинки размыкающего контакта и упора должны быть параллельны (на глаз). Регулировку производят подгибанием неизолированной части упора. Регулировку межконтактных зазоров, контактных давлений, провалов, нажатия пружинки, возвращающей пластинку замыкающего контакта, производят подгибкой соответствующих упоров контактных пластин и пружинки. Должен обеспечиваться совместный ход замыкающего контакта с размыкающим, ясно видимый при вращении от руки якоря механизма отсечки.

Последнюю операцию подгибки следует производить в направлении уменьшения межконтактного зазора, увеличения давления, провала и нажатия пружинки для компенсации увеличения зазоров, уменьшения давлений, провалов и нажатия пружинки при возможном постепенном исчезновении упругих деформаций.

6. Гибкие соединения (шунты) контактов не должны быть излишне натянуты. Они не должны провисать, так как это может привести к перемыканию контактных групп между собой.

Не допускается наличие резких перегибов в шунтах; исправление конфигурации шунтов следует производить пинцетом с закругленными краями или круглогубцами.

7. Положение узла сигнального устройства должно быть отрегулировано таким образом, чтобы скоба якоря механизма отсечки начинала опрокидывать сигнальный флажок по возможности ближе к концу хода якоря. При этом увеличенная нагрузка на якорь отсечки будет прикладываться в момент наличия на якоре отсечки значительного электромагнитного усилия. Регулировка положения флажка относительно скобы якоря производится при необходимости перемещением скобы, к которой крепится флажок.

Проверка и регулировка электрических характеристик реле

А. Источник тока. Для получения достоверных результатов при проверке реле необходим источник синусоидального тока. Этому требованию в степени, достаточной для практических целей, удовлетворяют схемы, представленные на рис. 5-31 и 5-32. Реостат *R1* — на ток 15—20 А низкоомный, реостат *R2* — на ток 5—7 А, с большим сопротивлением (рис. 5-31). Автотрансформатор *T1* типа РНО-250-2. Трансформатор *T2* подбирают или изготовляют мощностью 500 В·А, коэффициент трансформации 2—5 (рис. 5-32). Вместо трансформатора *T2* могут быть применены два трансформатора типа ОСО-0,25, соединенные параллельно на сторонах первичного и вторичного напряжения.

Для снижения потребления тока из сети трансформатор *T2* должен обладать возможно меньшим рассеиванием. Целесообразно применение установки типа У-5052 или УПЗ-1.

Б. Индукционный элемент. Для проверки и регулировки электрических характеристик индукционного элемента винт регулировки уставки отсечки должен быть вывернут до упора.

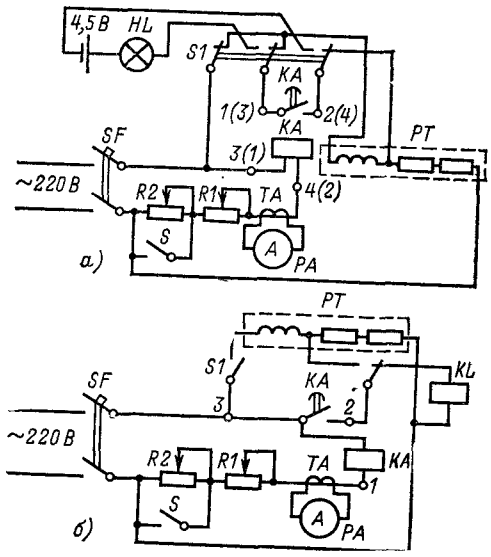


Рис. 5-31. Схемы проверки токов срабатывания и времени срабатывания индукционного элемента индукционного реле тока.

а — для реле РТ-81, РТ-82, РТ-91 (РТ-83, РТ-84); *б* — РТ-85, РТ-95. Цифрами обозначены зажимы реле. *KL* — реле типа РП-25; *PT* — электросекундомер.

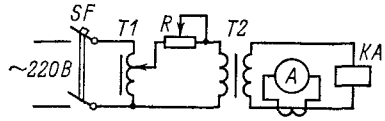


Рис. 5-32. Схема проверки электромагнитного элемента (отсечки) реле серий РТ-80 и РТ-90.

R — реостат на 3—5 А, 50—100 Ом; *T1* — автотрансформатор РНО-250-2; *KA* — реле тока.

1. Измерение и регулировка тока срабатывания индукционного элемента на заданной уставке по току и максимальной уставке по времени позволяют убедиться в надежности сцепления червячной передачи по всей длине сектора. Ток регулируют (рис. 5-31) реостатом *R2*, рубильник *S* разомкнут. Ток срабатывания устанавливают регулировкой натяжения арретирующей пружины.

При токе, равном току срабатывания индукционного элемента с точностью до 5 %, зубчатый сектор должен войти в зацепление с червяком и двигаться вверх плавно, без скачков и остановок. При соприкосновении с коромыслом якоря отсечки сектор не должен замедляться, останавливаться или соскакивать с червяка. Подъем сектора не должен замедляться после соприкасания толкателя с сигнальными контактами реле РТ-83, РТ-84 и РТ-86. При недостаточном сцеплении сектора с червяком увеличивают глубину зацепления.

Необходимо учитывать, что чрезмерно глубокое зацепление затрудняет возврат индукционного элемента, приводит к недопустимому снижению коэффициента возврата.

Измеряют ток начала свободного вращения диска, который должен быть не более 30 % тока срабатывания индукционного элемента.

2. Проверка и регулировка коэффициента возврата. Ток возврата измеряют при заданной уставке по току и максимальной уставке по времени. Если коэффициент возврата ниже требуемого значения, следует несколько отогнуть от сердечника электромагнита стальную скобу рамки, что ведет к увеличению тока возврата (чем ближе скоба к магнитопроводу, тем меньше ток возврата). Следует убедиться, что сектор не соскакивает в начале подъема коромысла, а также проверить, не увеличился ли ток срабатывания. Если ток срабатывания увеличился, ослабляют натяжение арретирующей пружины; следят, чтобы пружина надежно возвращала рамку в исходное положение. Таким образом, коэффициент возврата устанавливают взаимосвязанными регулировками скобы и пружины.

Проверку коэффициента возврата производят двумя способами: при плавном снижении тока и при внезапном сбросе тока. В обоих случаях ток снижают до значения, меньшего предполагаемого тока возврата, в момент подхода хвостовика сектора близко к коромыслу якоря, когда в зацеплении находится максимальное количество зубьев сектора.

По первому способу рубильник *S* (рис. 5-31) разомкнут, ток регулируют сопротивлением *R2*. По второму способу при замкнутом рубильнике *S* реостатом *R1* устанавливают 5-кратный ток срабатывания индукционного элемента, затем при разомкнутом рубильнике *S* реостатом *R2* устанавливают ток $0{,}8I_{с,р}$, отключают автомат *SF*, включают рубильник *S*, включают автомат *SF*. В момент подхода хвостовика сектора к коромыслу якоря размыкают рубильник *S*, при этом должен происходить четкий возврат сектора с рамкой в исходное положение.

3. Проверка разброса точек характеристики выдержки времени при полуторакратном токе срабатывания индукционного элемента (по схеме рис. 5-31, рубильник *S* отключен) на максимальной уставке по времени. Разброс не должен превышать 1 с для реле РТ-81, РТ-83, РТ-85, РТ-91 и РТ-95 и 2 с для реле РТ-82, РТ-84 и РТ-86 Количество отсчетов замеров должно быть не менее трех. Повышенный разброс может быть следствием неисправности подпятников или червячной передачи.

4. На заданных уставках индукционного элемента по току и времени срабатывания проверка времени срабатывания индукционного элемента при 10-кратном и 4-кратном токе уставки (по схеме рис. 5-31, рубильник *S* замкнут; если ток более 30 А, то по схеме рис. 5-32). Регулировку времени срабатывания выполняют подбором положения постоянного магнита, выдержки времени устанавливают в соответствии с табл. 5-11 и 5-12. Снимают две-три точки время-токовой характеристики (рекомендуются кратности токов уставки 1,5; 4; 10).

В. Электромагнитный элемент. Проверка и регулировка электромагнитного элемента (отсечки) выполняется по схеме рис. 5-32. Градуировка шкалы отсечки справедлива только на уставках индукционного элемента 4 А (для реле с $I_н=10$ А) и 3 А (для реле с $I_н=5$ А). На указанных уставках ведется заводская калибровка отсечки. На других уставках погрешность реле существенно изменяется (см. технические данные реле тока серий РТ-80 и РТ-90).

В зависимости от уставки и кратности тока в реле к току срабатывания отсечки время действия ее колеблется от 0,04 до 0,2 с.

1. Проверку выполняют на рабочей уставке индукционного элемента. Для этого устанавливают максимальную уставку по шкале времени, кратковременными толчками (во избежание перегрева реле) подают ток рабочей уставки отсечки, ток срабатывания устанавливают установочным винтом отсечки. Завод-изготовитель гарантирует работу отсечки с разбросом не более 15 %; с учетом указанного разброса добиваются срабатывания отсечки при токе ее уставки. Устанавливают шкалу отсечки в соответствии с действительной кратностью тока срабатывания на рабочей уставке.

2. В случае необходимости точное определение разброса тока срабатывания отсечки выполняют следующим образом. Незначительно снижая при каждом включении ток, определяют ток, при котором отсечка перестает срабатывать. Если при трех-четырех включениях отсечка ни разу не сработала, нужно немного увеличить ток и, дав реле остыть в течение 1 мин, повторить включения с интервалом 10 с, добиваясь однократного срабатывания из 10 включений. Измеренный ток является начальным током срабатывания $I_{с,р,нач}$. Затем, дав реле охладиться (перегрев приводит к возрастанию разброса), следует увеличить ток до значения, при котором отсечка срабатывает 10 раз из 10. Измеренный ток является током надежного срабатывания отсечки $I_{с,р,о}$. Разброс, %

$$\delta = \frac{2(I_{с,р,о} - I_{с,р,нач})}{I_{с,р,о} + I_{с,р,нач}} 100$$

характеризует механическое состояние узла отсечки. Повышенный разброс, а также вибрация якоря отсечки являются признаками неисправности механической части реле: перекоса или искривления осевой шпильки якоря отсечки; большого осевого люфта якоря; перекоса якоря относительно оси магнитного потока в результате неправильной сборки реле; затирания якоря в оси и с боков в результате загрязнений.

В таких случаях следует произвести повторную ревизию реле с устранением неисправностей.

Опытом эксплуатации подтверждается возможность устанавливать кратность срабатывания отсечки до 16; при этом начальный зазор между якорем отсечки и магнитопроводом определяют опытным путем. Однако в этих случаях имеют место большие разбросы тока срабатывания.

Применение уставок кратностью меньше двух не допускается, так как при этом реле срабатывает ложно от случайных сотрясений.

3. Надежность срабатывания отсечки проверяют при 4-кратном токе уставки отсечки, но не более 150 А.

4. Рабочую уставку восстанавливают по шкале времени.

Г. **Контакты, вибрация якоря.** Проверка надежности работы контактов, отсутствия вибрации якоря отсечки производится:

для реле РТ-81, РТ-82 и РТ-91 — при изменении тока в обмотке от 1,05 $I_{уст}$ индукционного элемента до 10 $I_{уст}$ (желательно выполнить это испытание как на стенде, так и при испытании защиты первичным током);

для реле РТ-85, РТ-86 и РТ-95 — при испытании защиты током, равным максимальному току короткого замыкания, и дешунтировании электромагнита отключения выключателя. Для испытаний рекомендуется использовать нагрузочный трансформатор новой конструкции типа ТОН или типа НТ-10 (см. разд. 1). Вторичный ток трансформаторов тока не должен превышать 150 А.

При предварительной проверке отсутствия вибрации на стенде нагрузкой для контактов служит промежуточное реле. Вибрация якоря отсечки, при которой промежуточное реле отпадает хотя бы однократно, является недопустимой; в этом случае следует обработать мелким надфилем заклепку магнитопровода реле, предназначенную для предотвращения залипания якоря. Причинами вибрации могут быть также указанные выше неисправности, вызывающие увеличенные разбросы тока при срабатывании отсечки. Неисправности устраняют, реле проверяют повторно.

Д. **Проверка затяжки всех винтовых соединений, отсутствия опилок под полюсами магнитов.** Необходимо почистить контакты, проверить ток срабатывания и возврата индукционного элемента, ток срабатывания отсечки и снять время-токовую характеристику на рабочих уставках при надетом, привинченном кожухе. Если реле перевозят после проверки, необходимо закрепить подвижную систему, заложив кусочки плотного картона между диском и постоянным магнитом, между сердечником электромагнита и якорем отсечки; привязать рамку реле.

Е. **Деформация цоколя.** Во избежание деформации цоколя при установке реле на панель или стенку ячейки РУ не допускается чрезмерная затяжка крепящих винтов; при наличии заднего присоединения необходимо в местах крепления между цоколем и панелью установить стальные прокладки, входящие в комплект деталей присоединения.

5-7. РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ РБМ-170 И РБМ-270

Технические данные

Схема магнитной системы реле показана на рис. 5-33, схемы внутренних соединений реле — на рис. 5-34.

Номинальное напряжение реле 100 В. Коэффициент возврата не менее 0,6. Потребляемая мощность цепи тока при номинальном

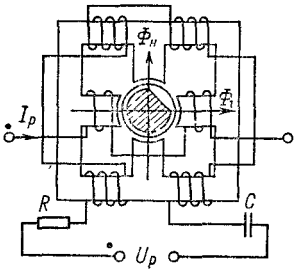


Рис. 5-33. Схема магнитной системы реле направления мощности серии РБМ.

токе не превышает 10 В·А. Мощность срабатывания реле (чувствительность) при номинальном токе и потребляемая мощность цепей напряжения при номинальном напряжении и частоте 50 Гц соответствует данным табл. 5-13.

Время срабатывания реле при 3-кратной мощности срабатывания, при угле максимальной чувствительности (определение см. ниже) и одновременном включении тока и напряжения не более 0,04 с для реле РБМ-171, РБМ-271, РБМ-177 и РБМ-277 и не более 0,05 с для реле РБМ-178 и РБМ-278. Время размыкания контактов при сбросе до нуля тока, равного $I_н$—30$I_н$, и номинальном напряжении или одновременном отключении тока и напряжения, а также при перемене направления мощности не превышает 0,05 с. При снятии обратной мощности продолжительность замкнутого состояния контактов реле одностороннего действия вследствие отброса подвижной системы не более 0,04 с.

Цепи тока реле длительно выдерживают ток до 1,1 $I_н$, а в течение 1 с — 30 $I_н$.

Реле РБМ-178 и РБМ-278 допускают включение на напряжение, равное номиналь-

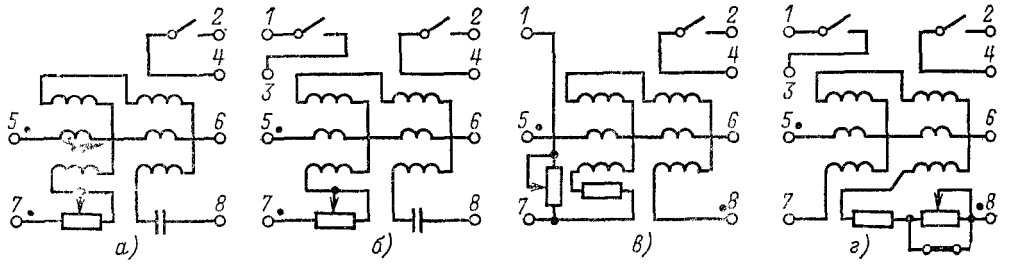


Рис. 5-34. Схема внутренних соединений реле серии РБМ.

а — РБМ-177, РБМ-178; *б* — РБМ-277, РБМ-278; *в* — РБМ-171; *г* — РБМ-271.

Таблица 5-13

Технические данные реле направления мощности серии РБМ

Тип реле	Номинальный ток $I_н$, А	Угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$	Зажимы цепи напряжения (рис. 5-34)	Мощность срабатывания, В А, при $\varphi_{м.ч}$ и $I_н$	Потребление цепей напряжения, В А, при $U_н$
РБМ-171/1	5	—30±5° —45±5°	*7—8* *1—8*	3 4	40 35
РБМ-171/2	1	—30±5° —45±5°	*7—8* *1—8*	0,6 0,8	40 35
РБМ-271/1	5	—30±5° —45±5°	*7—8*, перемычка замкнута *7—8*, перемычка разомкнута	3 4	40 35
РБМ-271/2	1	—30±5° —45±5°	*7—8*, перемычка замкнута *7—8*, перемычка разомкнута	0,6 0,8	40 35
РБМ-177/1 РБМ-177/2 РБМ-277/1 РБМ-277/2	5 1 5 1	+70±5°	*7—8*	3 0,6 3 0,6	35
РБМ-178/1 РБМ-178/2 РБМ-278/1 РБМ-278/2	5 1 5 1			1 0,2 1 0,2	90

ному, на время 60 с, реле РБМ-177, РБМ-277, РБМ-171 и РБМ-271 длительно выдерживают напряжение 1,1 $U_н$. Контакты реле средней мощности — см. § 5-1.

Проверка и регулировка механической части реле серии РБМ

1. Внешний и внутренний осмотр реле выполняют в соответствии с § 5-1.

При внутреннем осмотре следует обратить особое внимание на чистоту и равномерность зазоров между полюсами и барабанчиком.

2. Для проверки состояния верхнего и нижнего подпятников и концов осей подвижной системы следует вывернуть верхний и нижний подпятники, осмотреть их через лупу, при необходимости очистить от загрязнений рабочие поверхности подпятников концом заостренной из дерева палочки нехвойных пород. Рабочие поверхности подпятников прощупывают стальной иглой. В случае обнаружения шероховатостей или трещин подпятник заменяют, концы осей полируют.

При установке подпятников следует сначала отрегулировать положение нижнего подпятника, чтобы зазор между нижней плоскостью цилиндрического ротора и опорной планкой был 1,5—2 мм, а рабочие поверхности подвижного контакта и неподвижных контактов совпадали. Затем регулируют положение верхнего подпятника. Вертикальный люфт подвижной системы ненагретого реле должен быть 0,3—0,5 мм, с тем чтобы люфт нагретого реле, находящегося под рабочим напряжением, был не менее 0,2 мм.

3. Для проверки свободного хода барабанчика освобождают подвижную систему — снимают со стоек плату с неподвижными контактами, устанавливают угол закручивания противодействующей пружины (или двух пружин реле РБМ-270) так, чтобы подвижный контакт занял среднее положение между стойками. Затем отводят контакт вправо на 90° до упора его в стойку и отпускают. Подвижная система должна сделать не менее 10 полных колебаний. Если количество колебаний меньше, то имеет место затирание, причиной которого могут быть дефекты нижнего или верхнего подпятника, погнутость оси, попадание посторонних предметов в зазор между барабанчиком и неподвижными частями, задевание барабанчика за полюса, несовпадение осей подвижной системы и одного из подпятников. Если барабанчик задевает за верхнюю кромку внутреннего сердечника, то следует вынуть верхний подпятник и поднять барабанчик ввертыванием нижнего подпятника. После этого установить люфт (см. выше) и закрепить подпятники. Зазоры между полюсами

и барабанчиком должны быть 0,4—0,5 мм. Далее проверяют и регулируют самоходы (см. ниже).

4. Проверяют закрепление подвижного контакта на оси барабанчика. Осматривают, при необходимости зачищают подвижный и неподвижные контакты С этой целью снимают контактную плату, разбирают контактную систему, неподвижный контакт *1* укладывают в шаблон (рис. 5-35) на текстолитовую колодку *2*, поверх контакта накладывают прижимный угольник *3*, в котором сделан вырез по форме рабочей части контакта. Угольник крепится к колодке винтом *4* так, чтобы контактная пластина была плотно зажата между ними, а рабочая поверхность контакта оставалась свободной для обработки. Чистку и шлифовку контакта можно выполнять куском ремня, деревянной чуркой или полоской электрокартона. При наличии раковин на рабочей поверхности контакт обрабатывают воронилом.

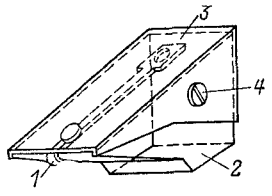


Рис. 5-35. Шаблон для обработки рабочих поверхностей контактов.

5. Контактную систему реле направления мощности регулируют следующим образом (рис. 5-36). Нижнюю пластину, более жесткую, устанавливают так, чтобы в нормальном режиме она не упиралась в передний упор, устанавливаемый от нее на расстоянии 0,2—0,3 мм. Хвостовик жесткой пластины должен прикасаться к задней ограничительной пластине, установленной под углом 100—110° к контактным пластинам, и обеспечивать значительное трение при нажатии на контактную пластину. Контактную пластину верхнего неподвижного контакта, имеющую незначительную упругость, устанавливают так, чтобы она прикасалась к переднему упору, но практически не имела предварительного нажатия на упор. Хвостовик ее должен отстоять от ограничительной пластины, расположенной под углом 120—130° к контактным пластинам, на 0,2—0,3 мм. Верхняя мягкая контактная пластина должна выступать над нижней жесткой на 0,2—0,3 мм, чтобы подвижный контакт сначала соприкасался с ней. Контактную колодку устанавливают таким образом, чтобы угол встречи подвижных и неподвижных контактов составлял 25—30°. С увеличением угла встречи увеличивается разрывная мощность контактов, но возникает опасность их отскока и подгорания; с уменьшением угла встречи разрывная мощность контактов снижается, но в то же время уменьшается возможность отскока и подгорания при срабатывании реле.

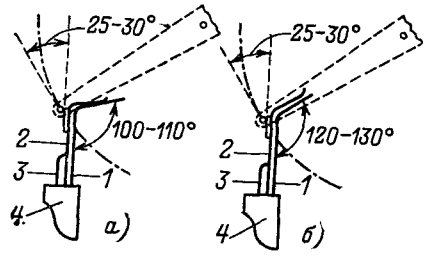


Рис 5-36. Регулировка контактной системы реле направления мощности серии РБМ.

а — подвижного и нижнего неподвижного контактов; *б* — подвижного и верхнего неподвижного контактов; *1* — ограничитель; *2* — контактная пластина; *3* — передний упор; *4* — контактная колодка.

Правку пластин неподвижных контактов выполняют одним или двумя пинцетами.

6. После регулировки самоходов устанавливают контактную плату на стойки так, чтобы рабочие поверхности подвижного и неподвижного контактов совпадали, закрепляют плату винтами. Касание подвижного и неподвижного контактов должно происходить вблизи переднего края неподвижного контакта на расстоянии не менее 1 мм от края; штифт подвижного контакта должен проскальзывать к заднему краю неподвижных контактов не ближе чем на 2 мм. Максимальный прогиб нижней контактной пластины должен быть 0,5 мм при нажатии отверткой на поводок подвижного контакта. Указанные ограничения устанавливают одновременным касанием левым упорным винтом *А* и правым упором — угольником *Б* выступа пластмассового дна ротора подвижной системы (рис. 5-37). Правым упорным винтом *В* и левым упором-угольником *Г* устанавливают зазор 1 мм между подвижным и неподвижным контактами. Следует проверить, чтобы при совместном ходе контактов во время их замыкания и размыкания хвостовики контактных пластин скользили без заеданий по ограничительным пластинам.

Одновременное касание ротором двух жестких упоров на одинаковом расстоянии от оси вращения подвижной системы позволяет существенно уменьшить вибрацию контактов

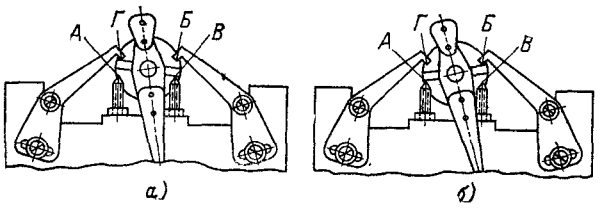


Рис. 5-37. Система упоров — ограничителей вращения подвижной системы реле направления мощности серии РБМ.

а — при отсутствии момента реле исполнения РБМ-170 или при срабатывании левой пары контактов реле исполнения РБМ-270; *б* — при замыкании правой пары контактов.

при искажении формы кривой тока, вызванном перегрузкой трансформаторов тока в максимальном режиме к. з., и устранить отбросы подвижной системы реле при снятии обратной мощности.

7. Регулировку двухконтактной системы реле РБМ-271, РБМ-277 и РБМ-278 выполняют аналогично. При отсутствии момента на замыкание контактов подвижные контакты должны находиться в среднем положении, расстояние (зазор) между каждым подвижным и соответствующими неподвижными контактами должно быть 1 мм. При замыкании правой пары контактов должно быть обеспечено одновременное касание в точках *А*, *Б*, при срабатывании левой пары контактов — в точках *В*, *Г* (рис. 5-37).

Лента каждого токопровода реле РБМ-270 должна иметь правильную форму без надломов и вмятин. Пайки токопроводов должны быть высококачественными и механически не напряжены. Токопроводы не должны мешать повороту подвижной системы.

8. Противодействующая пружина должна иметь правильную спиральную форму, ее витки не должны касаться друг друга при повороте подвижной системы. В пределах, ограниченных упорами, между витками должен сохраняться равномерный зазор. Плоскость спирали должна быть перпендикулярна оси подвижной системы.

Выправлять положение витков пружины можно легким изгибом поводка, к которому крепится внешний конец пружины. В крайних случаях допускается перепаивать пружину в указанном месте.

Проверка и регулировка электрических характеристик реле

1. Для проверки реле мощности *KW* применяют схему, представленную на рис. 5-38.

2. Для определения мощности, потребляемой обмоткой напряжения, измеряют ток в ней при номинальном напряжении 100 В. Для определения мощности, потребляемой обмоткой тока, измеряют напряжение на ней при номинальном токе. Потребляемую мощность подсчитывают в соответствии с § 5-1. Полученные значения не должны отличаться от приведенных в табл. 5-13 более чем на ±10 %.

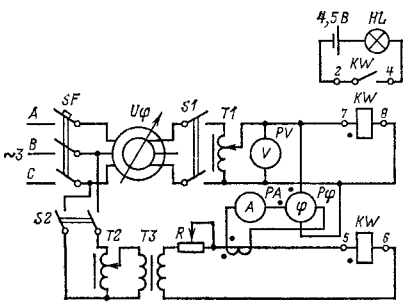


Рис. 5-38. Схема для проверки электрических характеристик реле направления мощности.

Т1, *Т2* — автотрансформаторы РНО-250-2; *Т3* — трансформатор ОСО-0,25, *R* — реостат 20—30 Ом; *Uф* — фазорегулятор.

3. Проверяют самоходы реле, производят их устранение (самоходом называется ход подвижной системы, вызываемый только током или только напряжением). Вращающий момент самохода появляется в результате несимметрии магнитной системы. Самоход в сторону размыкания контактов загрубляет реле, из-за чего вероятен отказ защиты. Самоход в сторону замыкания контактов может явиться причиной ложного действия защиты.

Устранение самохода реле защиты от междуфазных коротких замыканий выполняют при изменении тока от номинального значения до максимального тока, протекающего по защищаемому присоединению при коротком замыкании на шинах подстанции. Для защит от замыканий на землю самоход по току устраняют при изменении тока от нуля до тока срабатывания наиболее чувствительной ступени направленной защиты от замыканий на землю. Регулировку самоходов выполняют после проверки свободных колебаний подвижной системы, до установки на реле контактной платы. Поворотом установочного кольца пружины устанавливают подвижный контакт в то положение, которое он занимает при полностью собранной контактной системе, диамагнитным ключом ослабляют гайку, крепящую сердечник реле. Не снимая ключ, в обмотку реле подают ток (напряжение). Вращая сердечник рукой за головку винта нижнего подпятника, поворотом сердечника добиваются, чтобы подвижный контакт занял упомянутое выше положение, отключают ток (напряжение), затягивают гайку сердечника ключом; вновь проверяют самоход.

Самоход, вызываемый током, проверяют при замкнутой накоротко обмотке напряжения. Самоход, вызванный напряжением, проверяют при разомкнутой обмотке тока. Затем проверяют повторно количество свободных колебаний подвижной системы и осевой люфт. При проверках самоходов необходимо следить за температурой обмоток реле, не допуская их перегрева. Допускается оставлять самоход, компенсируемый закручиванием противодействующей пружины на угол не более 15°.

Если самоходы не удается устранить описанным способом, выполняют следующее. Осторожно ослабляют винт, крепящий ближайший к оператору полюс системы напряжения (полюс, на котором нет катушки), подают на реле напряжение, поворачивают полюс легким постукиванием молотка (через металлическую прокладку, в качестве которой можно использовать отвертку) в сторону, противоположную направлению самохода, до устранения последнего. Если момент от самохода весьма велик, сначала подают на реле напряжение 30 В и затем, по мере уменьшения момента самохода, поднимают напряжение до 100 В. Затем снова регулируют самоход от тока, вращая сердечник реле, затем — опять по напряжению, перемещая полюс. Полное отсутствие самоходов имеет место после второго приближения.

Закрепляют полюс винтом. Проверяют количество свободных колебаний подвижной системы, осевой люфт и отсутствие самоходов.

4. После сборки контактной системы проверяют зону действия, определяют угол максимальной чувствительности и однополярные

зажимы реле. Проверку выполняют при предварительно установленном угле затяжки противодействующей пружины 100°. При номинальных значениях тока и напряжения на реле фазорегулятором изменяют угол сдвига между током и напряжением от 0 до 360°, затем от 360° до 0 (при обратном вращении фазорегулятора). Измеряют углы φ_1 и φ_2, при которых реле замыкает контакт. Угол максимальной чувствительности

$$\varphi_{м.ч} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

Отклонение $\varphi_{м.ч}$ от приведенного в табл. 5-13 значения должно быть не более 5°. Если угол максимальной чувствительности соответствует данным табл. 5-13, то обмотки реле включены согласованно с обмотками фазометра, исходя из чего определяют однополярные зажимы реле (рис. 5-38).

5. Чувствительность (мощность срабатывания) реле проверяют по схеме рис. 5-38 при рабочей затяжке противодействующей пружины, номинальном токе и угле между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности. Одновременно определяют коэффициент возврата реле, снижая напряжение. Чувствительность реле устанавливают в соответствии с табл. 5-13, регулируя угол затяжки противодействующей пружины и изменяя напряжение в цепи напряжения реле. Для различных исполнений реле угол рабочей затяжки пружины находится в пределах 90—180°. Мощность срабатывания и возврата реле подсчитывают в соответствии с § 5-1. У реле РБМ двустороннего действия чувствительность регулируют при замыкании левого и правого контактов отдельно.

6. Проверку времени действия реле выполняют, если это требуется по условиям работы устройства защиты или автоматики.

7. Проверку работы контактов реле выполняют по схеме рис. 5-38. Проверку ведут при подводе к реле мощности от $1{,}2P_{с.р}$ до максимально возможной при коротком замыкании в защищаемой сети. При этом контакты реле включают в цепь нагрузки, которую реле коммутируют в устройстве защиты (автоматики).

Мощность подсчитывают по формулам:

а) для защиты от междуфазных к. з. — мощность, подводимая к реле при двухфазном к. з. у шин подстанции в зоне защиты,

$$S^{(2)}_{max} = \frac{3U_л I^{(3)}_{к.max}}{4n_т n_н},$$

где $I^{(3)}_{к.max}$ — ток трехфазного к. з. в максимальном режиме; $U_л/n_н = 100$ В — вторичное линейное напряжение; $n_н$ — коэффициент трансформации трансформаторов напряжения схемы звезда—звезда; $n_т$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока;

б) для защиты от замыканий на землю

$$S^{(1)}_{max} = \frac{3U_0 \cdot 3I_{0\,max}}{n_Δ n_т},$$

где $3U_0/n_Δ = 100$ В; $3I_{0max}/n_т$ — соответственно напряжение на реле и ток нулевой последовательности в цепи реле при однофазном к. з. вблизи шин подстанции в зоне защиты; $n_Δ$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения для обмоток, соединенных в разомкнутый треугольник.

Мощность на реле подают одновременным включением тока и напряжения на время, измеряемое несколькими секундами.

8. Проверку поведения контактов реле при подаче и сбросе обратной мощности выполняют в том случае, если отброс контактов может вызвать ложную работу устройства. По схеме рис. 5-38 на реле подают обратную (заклинивающую) мощность, изменяя ее в пределах от $10P_{ср}$ до максимально возможной мощности при к. з. на шинах подстанции, затем сбрасывают ее одновременным отключением тока и напряжения. Не должен происходить сильный отброс подвижного контакта, вызывающий его замыкание с неподвижными контактами. Если отброс все же имеет место и его не удается устранить регулировкой одновременности соприкосновения подвижной системы реле с упорами, увеличением межконтактного зазора, дополнительной затяжкой пружины, то в действие защиты должно быть введено достаточное замедление.

Проверку на отброс контактов реле РБМ двустороннего действия производят в полной схеме защиты.

9. После окончания регулировки реле следует проверить затяжку винтов, гаек, убедиться в отсутствии в реле посторонних предметов и проверить от руки ход подвижной системы, измерить мощность срабатывания реле. В случае перевозки необходимо зафиксировать подвижную систему, привязав поводок подвижного контакта к левой стойке (для реле одностороннего действия) или связав вместе рычаги пружины (для реле двустороннего действия).

5-8. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ РВ-01

Назначение, принцип действия, указания по калибровке

Реле времени РВ-01 применяют в устройствах релейной защиты и системной автоматики. Реле управляется включением и отключением напряжения питания. В схему реле (рис. 5-39, 5-40) входит времязадающая часть, воздействующая при срабатывании на выходное электромагнитное реле *К*. Для получения временно́й задержки в реле используется принцип заряда конденсатора от фиксированного начального уровня до уровня срабатывания пороговой схемы. Выдержка времени устанавливается изменением зарядного сопротивления дискретным переключением резисторов *R15—R33* с помощью двух перемычек на двух колодках. При пуске реле происходит быстрый заряд конденсатора *C1* через резистор *R1*, а также через резисторы *R15—R33* до напряжения стабилизации стабилитрона *VD1*. Диод *VD5* запирается, и дальнейший заряд конденсатора *C1* происходит по цепи резисторов *R15—R33*. Напряжение на конденсаторе *C1* сравнивается с опорным напряжением при помощи схемы сравнения на двух транзисторах

VT7 и *VT8* различных типов проводимости. В момент сравнения напряжений транзисторы *VT8* и *VT10* мгновенно открываются благодаря механизму сильной обратной связи и конденсатор *C1* разряжается по цепи *R2* — транзисторы *VT7*, *VT8* — переход база — эмиттер транзистора *VT10*. Реле *K* срабатывает через открытый транзистор *VT10*.

Выдержка времени реле соответствует сумме показаний двух шкал, одна из которых проградуирована через 10 %, а другая — через 1 % максимальной уставки номинального диапазона.

Калибровка шкалы реле производится при номинальном напряжении питания при нулевом положении переключателя младшего разряда уставки и максимальной уставке на переключателе старшего разряда. Вращением оси потенциометра *R5* добиваются минимального отклонения выдержки времени от значения уставки. Затем проверяют значения выдержек времени при минимальной уставке переключателя старшего разряда уставок при крайних положениях переключателя младшего разряда уставки. Отклонения выдержек времени от уставок не должны превышать значений основной погрешности, нормированных для этих уставок.

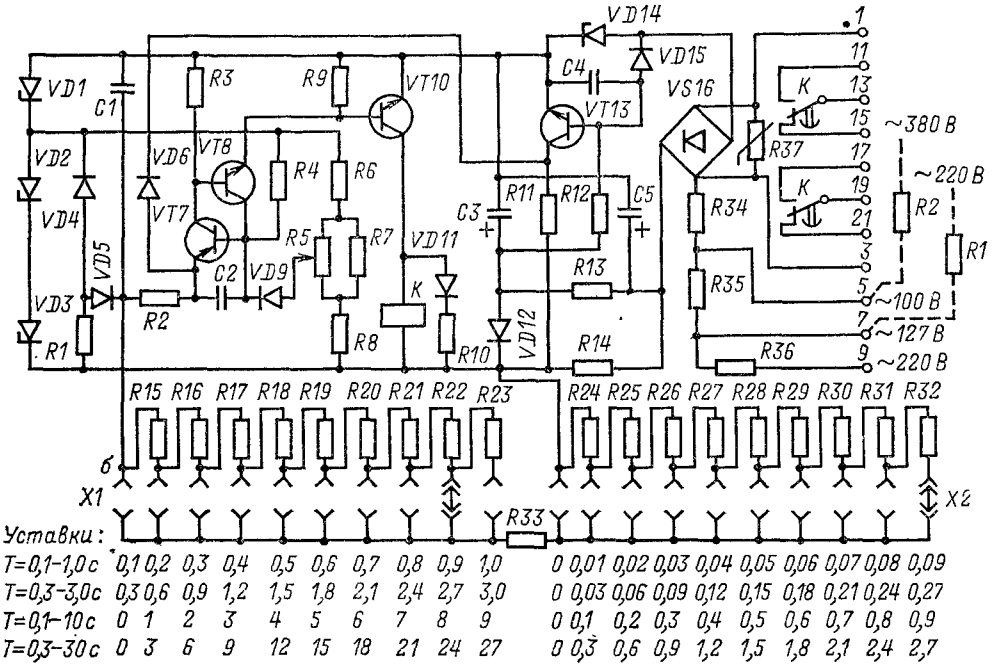


Рис. 5-39. Принципиальная схема реле времени РВ-01 исполнения на напряжения 100, 220, 380 В переменного тока.

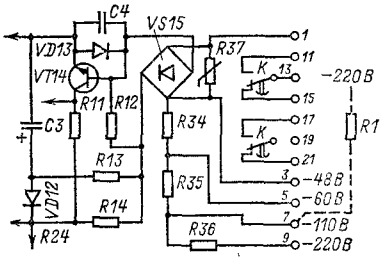


Рис. 5-40. Принципиальная схема реле времени РВ-01 исполнения на напряжения 48, 60, 110, 220 В постоянного тока в части, отличающейся от схемы рис. 5-39.

Выдержка времени реле соответствует сумме показаний двух шкал, одна из которых проградуирована через 10 %, а другая — через 1 % максимальной уставки номинального диапазона.

Калибровка шкалы реле производится при номинальном напряжении питания при нулевом положении переключателя младшего разряда уставки и максимальной уставке на переключателе старшего разряда. Вращением оси потенциометра *R5* добиваются минимального отклонения выдержки времени от значения уставки. Затем проверяют значения выдержек времени при минимальной уставке переключателя старшего разряда уставок при крайних положениях переключателя младшего разряда уставки. Отклонения выдержек времени от уставок не должны превышать значений основной погрешности, нормированных для этих уставок.

Основные технические данные

1. Номинальное напряжение питания, В: постоянного тока 24 или 48, 60, 110, 220; переменного тока 100, 127, 220, 380 – с внешним балластным резистором.

2. Номинальная частота пере енного тока 50 или 60 Гц.

3. Класс точности *a/b*.

4. Средняя основная погрешн сть на любой уставке при нормальных у ловиях, % уставки,

$$\delta \leqslant \pm \left(a + b\frac{T_{max}}{T}\right),$$

где T_{max} — максимальная уставк номинального диапазона уставок, с; T — з ачение уставки, с.

Для диапазонов уставок 0,1— с; 0,3—3 с; 0,1—10 с; 0,3—30 с значения a=: 5 и b=1,2; a=3,0 и b=0,8; a=3,0 и b=0,6; a= 3,0 и b=0,8 соответственно.

5. Дополнительная погрешнос ь от изменения напряжения питания в пре елах (0,8÷

$1{,}1)U_н$ не превышает 1,3% уставки ±10 мс, а для исполнения на 24 В при $(0{,}85 \div 1{,}1)U_н$ — не более 1,3 % уставки ±15 мс.

6. Дополнительная погрешность при крайних температурах рабочего диапазона при +55 °С — 1,4δ; при —40 °С — 2,4δ.

7. Разброс выдержки времени на уставках, превышающих 0,5 с, составляет 0,6δ; на уставках 0,5 с и менее — 0,7δ.

8. Время возврата для первого диапазона уставок 0,04 с, для второго 0,055 с, для третьего 0,06 с, для четвертого 0,075 с.

9. Время подготовки 0,06; 0,07; 0,1 и 0,11 с соответственно.

10. Коммутационная способность контактов для значений отключаемой мощности:

При постоянном токе, Вт	30	20	10
При переменном токе, В·А	250	150	100
Ток включения, А:			
постоянный	5	0,25	0,25
переменный	1	0,25	0,25
Ток отключения, А:			
постоянный	5	0,25	0,25
переменный	2	0,75	0,75

11. Количество ВО, 10^3 циклов 25, 1000, 1600.

12. Механическая износостойкость контактов не менее 6 300 000 циклов.

13. Потребляемая мощность при номинальном напряжении питания: при постоянном токе 24 В — 2 Вт; 48 В — 2,5 Вт; 60 В — 3 Вт; 110 В — 5 Вт; 220 В — 10 Вт; при переменном токе 100 В — 6 В·А; 127 В — 7 В·А; 220 В — 11 В·А.

14. При включении на номинальные напряжения 24—127 В включительно, а также на 220 и 380 В с внешним балластным резистором реле длительно выдерживает напряжение питания $1{,}1U_н$.

При включении реле на $U_н$=220 В без внешнего балластного резистора термическая стойкость при напряжении до $1{,}1U_н$ обеспечивается при повторно-кратковременном режиме включения при подаче напряжения на время не более 5 мин и относительной продолжительности включения не более 25 %.

Внешние балластные резисторы: при $U_н$= =220 В резистор ПЭВ-10 R_1=3,3 кОм; при $U_н$=380 В ПЭВ-25 R_2=10 кОм.

15. Масса реле не более 1,0 кг.

5-9. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ СЕРИЙ ЭВ-100, ЭВ-200 И РВ-100, РВ-200

Технические данные

Схемы внутренних соединений и исполнение контактов показаны на рис. 5-41, 5-42; технические данные реле приведены в табл. 5-14 и 5-15.

Механизмы времени реле серий РВ-100 и РВ-200 в отличие от механизмов времени реле серий ЭВ-100 и ЭВ-200, выполнены с применением камней для вращающихся частей.

Для реле времени разброс времени срабатывания определяют как разность между максимальным и минимальным временем срабатывания при десяти измерениях на одной и той же уставке при номинальном напряжении на катушке реле, а среднее значение времени срабатывания — это среднее арифметическое из десяти измерений.

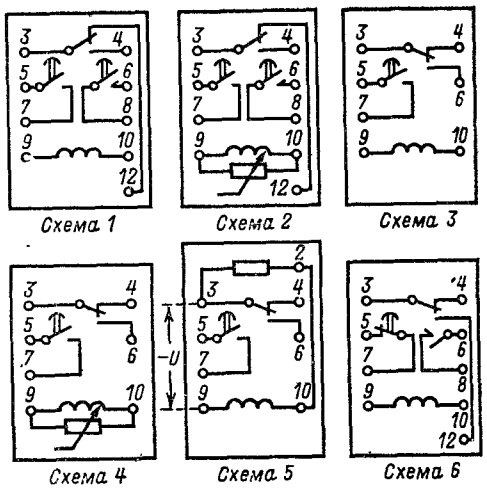


Рис. 5-41. Схемы внутренних соединений реле времени серий ЭВ и РВ.

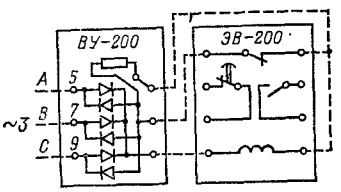


Рис. 5-42. Схема внутренних соединений реле ЭВ-215К—ЭВ-245К с выпрямительным устройством ВУ-200 (или РВ-215К—РВ-245К с устройством ВУ-200).

Реле времени ЭВ-112, ЭВ-122, ЭВ-132, ЭВ-142, ЭВ-114, ЭВ-124, ЭВ-134, ЭВ-144 и их аналоги серии РВ-100 выдерживают напряжение на обмотке $1{,}1U_н$ в течение не более 2 мин; реле времени ЭВ-113, ЭВ-123, ЭВ-133, ЭВ-143 и их аналоги серии РВ-100 длительно выдерживают напряжение $1{,}1U_н$.

Реле времени переменного тока серий ЭВ-200 и РВ-200 длительно выдерживают напряжение на обмотке $1{,}1U_н$.

Напряжения срабатывания:

а) для реле постоянного тока серий ЭВ-100 и РВ-100 не более $0{,}7U_н$, в тропическом исполнении не более $0{,}8U_н$;

б) для реле переменного тока серий ЭВ-200 и РВ-200, кроме указанных ниже, не более $0{,}85U_н$;

в) для реле ЭВ-215 — ЭВ-245 и ЭВ-215К—ЭВ-245К с устройством ВУ-200 и их аналогов серии РВ-200 не более $0{,}75U_н$, в тропическом исполнении не более $0{,}85U_н$.

Напряжение возврата якоря:

а) для реле постоянного и переменного

Таблица 5-14

Технические данные реле времени серий ЭВ-100, ЭВ-200 или РВ-100, РВ-200

Тип реле	Схема реле по рис. 5-41	Номинальное напряжение, В	Пределы уставок, с
	Реле постоянного тока		
ЭВ-112 или РВ-112	*1*	24, 48	0,1—1,3
ЭВ-112 или РВ-112	*2*	110, 220	
ЭВ-113 или РВ-113	*5*	24, 48, 110, 220	
ЭВ-114 или РВ-114	*3*	24, 48	
ЭВ-114 или РВ-114	*4*	110, 220	
ЭВ-122 или РВ-128	*1*	24, 48	0,25—3,5
ЭВ-122 или РВ-128	*2*	110, 220	
ЭВ-123 или РВ-127	*5*	24, 48, 110, 220	
ЭВ-124 или РВ-124	*3*	24, 48	
ЭВ-124 или РВ-124	*4*	110, 220	
ЭВ-132 или РВ-132	*1*	24, 48	0,5—9
ЭВ-132 или РВ-132	*2*	110, 220	
ЭВ-133 или РВ-133	*5*	24, 48, 110, 220	
ЭВ-134 или РВ-134	*3*	24, 48	
ЭВ-134 или РВ-134	*4*	110, 220	
ЭВ-142 или РВ-142	*1*	24, 48	1—20
ЭВ-142 или РВ-142	*2*	110, 220	
ЭВ-143 или РВ-143	*5*	24, 48, 110, 220	
ЭВ-144 или РВ-144	*3*	24, 48	
ЭВ-144 или РВ-144	*4*	110, 220	
	Реле переменного тока		
ЭВ-215 или РВ-215	*6*	100, 127, 220, 380	0,1—1,3
ЭВ-217 или РВ-217	*3*		
ЭВ-218 или РВ-218	*1*		
ЭВ-225 или РВ-225	*6*	100, 127, 220, 380	0,25—3,5
ЭВ-227 или РВ-227	*3*		
ЭВ-228 или РВ-228	*1*		
ЭВ-235 или РВ-235	*6*	100, 127, 220, 380	0,5—9
ЭВ-237 или РВ-237	*3*		
ЭВ-238 или РВ-238	*1*		
ЭВ-245 или РВ-245	*6*	100, 127, 220, 380	1—20
ЭВ-247 или РВ-247	*3*		
ЭВ-248 или РВ-248	*1*		
ЭВ-215К или РВ-215К	Рис. 5-42	100, 220	0,1—1,3
ЭВ-225К или РВ-225К			0,25—3,5
ЭВ-235К или РВ-235К			0,5—9
ЭВ-245К или РВ-245К			1—20

Примечание. Реле ЭВ-215, РВ-215, ЭВ-225, РВ-225, ЭВ-235, РВ-235, ЭВ-245 и РВ-245 срабатывают при размыкании цепи катушки, снижении или исчезновении напряжения; они входят также в комплекты ЭВ-215К, РВ-215К, ЭВ-225К, РВ-225К, ЭВ-235К, РВ-235К, ЭВ-245К и РВ-245К; указанные комплекты состоят из реле времени и выпрямителя ВУ-200, включаемого на напряжение трех фаз.

Таблица 5-15

Дополнительные технические данные реле времени серий ЭВ-100, ЭВ-200 и РВ-100 и РВ-200

Диапазон уставок, с	Разброс времени срабатывания, с	Отклонение от уставки, с		Время проскальзывания, с
		минимальной	максимальной	
0,1—1,3	0,06	±0,05	±0,15	0,05—0,12
0,25—3,5	0,12	±0,1	±0,4	0,1—0,4
0,5—9	0,25	±0,2	±0,85	0,25—0,7
1—20	0,8	±0,2	±1,5	0,6—1,6

тока, кроме указанных ниже, не менее $0{,}05U_н$;

б) для реле ЭВ-215—ЭВ-245 и их аналогов серии РВ-200 от $0{,}05U_н$ до $0{,}55U_н$;

в) для реле ЭВ-215К—ЭВ-245К с устройством ВУ-200 и их аналогов серии РВ-200 не более $0{,}35U_н$ при трехфазном и не более $0{,}55U_н$ при двухфазном питании (в случае обрыва одной фазы).

Мощность, потребляемая обмоткой реле при номинальном напряжении:

а) реле ЭВ-112, ЭВ-122, ЭВ-132, ЭВ-142, ЭВ-114, ЭВ-124, ЭВ-134, ЭВ-144, РВ-112, РВ-128, РВ-132, РВ-142, РВ-114, РВ-124, РВ-134 и РВ-144—30 Вт;

б) реле ЭВ-113, ЭВ-123, ЭВ-133, ЭВ-143, РВ-113, РВ-127, РВ-133 и РВ-143 в момент включения 30 Вт, длительно 15 Вт;

в) реле ЭВ-217, ЭВ-227, ЭВ-237, ЭВ-247, ЭВ-218, ЭВ-228, ЭВ-238, ЭВ-248, РВ-217, РВ-227, РВ-237, РВ-247, РВ-218, РВ-228, РВ-238 и РВ-248 при втянутом якоре не более 20 В·А, в момент срабатывания около 60 В·А;

г) для реле ЭВ-215, ЭВ-225, ЭВ-235, ЭВ-245, РВ-215, РВ-225, РВ-235 и РВ-245 при втянутом якоре не более 20 В·А, в момент включения около 60 В·А;

д) для реле ЭВ-215К, ЭВ-225К, ЭВ-235К и ЭВ-245К с устройством ВУ-200 и их аналогов серии РВ-200 при втянутом якоре не более 10 В·А на фазу, в момент включения не более 60 В·А на фазу.

Контакты реле (кроме проскальзывающего) способны коммутировать цепь переменного тока мощностью 500 В·А (коэффициент мощности нагрузки не менее 0,5) при токе не более 5 А или напряжении от 24 до 250 В или цепь постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени которой не превышает 0,005 с) мощностью 100 Вт при токе не более 1 А или напряжении 24—250 В.

Проскальзывающие контакты могут замыкать цепь переменного или постоянного тока с указанной выше мощностью. Мощность проскальзывающих контактов на размыкание (при условии, если разница между уставками конечного и проскальзывающего контактов не менее 10 % максимальной уставки реле) 100 В·А и 30 Вт соответственно для указанных выше условий нагрузки. Когда нагрузки на проскальзывающих контактах превышают приведенные выше значения, разрыв цепи проскальзывающих контактов должен осуществляться контактами других реле.

Длительно допустимый ток через замкнутые контакты равен 5 А для замыкающих с выдержкой времени контактов и 3 А для мгновенных контактов.

Механизм реле выдерживает 5000 срабатываний на максимальной уставке выдержки времени без механических повреждений при отсутствии нагрузки на контактах, в том числе 1100 срабатываний с указанной выше электрической нагрузкой на контактах.

Проверка механической части реле

1. Держатель подвижных контактов должен быть надежно закреплен стопорным винтом на выходной оси часового механизма. Должны быть надежно закреплены фиксирующими винтами колодки на подвижных контактах.

2. При притянутом якоре и замкнутых на максимальной уставке контактах между якорем и заводным рычагом часового механизма должен быть зазор 0,5—1 мм.

3. Касание подвижного мгновенного контакта должно быть примерно по центру неподвижного контакта. Зазор между мгновенными контактами должен быть не менее 1,5 мм для реле ЭВ-113, ЭВ-123, ЭВ-133, ЭВ-143, РВ-113, РВ-127, РВ-133 и РВ-143 и не менее 2,5 мм для остальных исполнений реле. Регулируют зазор подгибанием неподвижных контактных пластинок.

4. Прогиб пластинки переключающего мгновенного контакта должен быть таким, чтобы после замыкания замыкающего контакта якорь проходил еще 0,8—1,2 мм, что соответствует контактному нажатию 0,12—0,18 Н.

5. Провал неподвижных контактов, замыкающих с выдержкой времени, должен быть на любой уставке не менее 0,4 мм. Контактные пружины неподвижных контактов должны находиться в одной плоскости, перпендикулярной плоскости шкалы. Подвижный контактный мостик должен замыкать оба неподвижных контакта одновременно и не должен касаться контактных пружин.

6. Возвратная пружина должна четко возвращать часовой механизм в исходное положение (до упора). В случае необходимости регулируют сжатие (натяжение) пружины. Регулировку натяжения пружины реле серий ЭВ-200 и РВ-200 производят подгибанием «язычка» рамы.

Проверка электрических характеристик реле

1. Для реле ЭВ-113, ЭВ-123, ЭВ-133, РВ-113, РВ-127, РВ-133 и РВ-143 измеряют сопротивление цепи обмотки при отпущенном и втянутом якоре (рукой нажать на хвостовик якоря).

2. Прослушивают работу часового механизма при 10-кратном запуске реле.

3. По схемам рис. 5-43 проверяют напряжение четкого срабатывания реле. Напряжение должно соответствовать техническим данным. Напряжение подают плавно и «толчками».

4. Проверяют напряжение возврата реле,

которое должно соответствовать техническим данным.

5. Проверяют шкалу реле на минимальной, максимальной отметках и на заданной уставке по схеме рис. 5-43.

Результаты проверки должны соответствовать табл. 5-15. Разброс времени срабатывания проверяют на максимальной отметке шкалы.

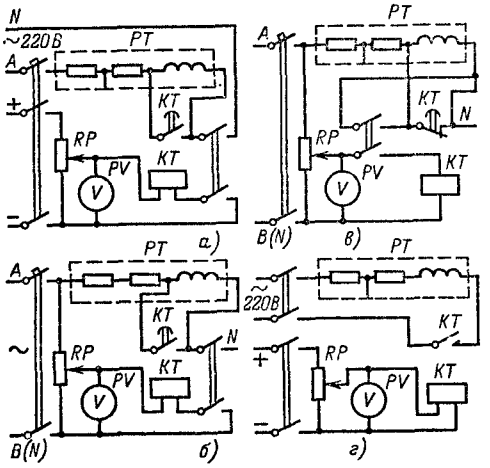


Рис. 5-43. Схемы для проверки напряжений срабатывания возврата и выдержек времени реле серий ЭВ и РВ.

а—проверка реле ЭВ-100 или РВ-100 с замыкающим контактом; *б* — проверка реле ЭВ-200 или РВ-200 с замыкающим контактом; *в*—проверка реле ЭВ-215К—ЭВ-245К или РВ-215К—РВ-245К с контактом, замыкающим при снятии напряжения; *г* — проверка продолжительности замкнутого состояния проскальзывающего контакта (на переменном напряжении потенциометр заменяют автотрансформатором).

6. Продолжительность замкнутого состояния проскальзывающего контакта регулируется изменением провала неподвижных контактов. Этот параметр должен соответствовать данным табл. 5-15 (универсальная схема для измерения замедления реле приведена в § 5-11).

7. Нечеткое притягивание якоря термически стойких реле постоянного тока вызвано преждевременным размыканием мгновенного контакта; в этом случае следует поднять выше толкатель мгновенного контакта.

8. При проверке шкалы реле может наблюдаться следующее:

а) время на максимальной уставке выходит за плюсовой допуск; для устранения этого шкалу устанавливают так, чтобы на наименьшей уставке выдержка времени соответствовала минусовому допуску отклонения (табл. 5-15);

б) время на максимальной уставке выходит за минусовой допуск, для устранения этого шкалу устанавливают так, чтобы на наименьшей уставке выдержка времени соответствовала плюсовому допуску (табл. 5-15).

В заключение затягивают гайку, крепящую шкалу реле, и проверяют время срабатывания реле на крайних отметках шкалы.

9. При проверке времени срабатывания проскальзывающего контакта схемы рис. 5-43, *а—в* позволяют измерить указанный параметр, так как продолжительность замкнутого состояния проскальзывающего контакта (время проскальзывания — табл. 5-15) является достаточной для выполнения отсчета. При выполнении уставки проскальзывающего контакта реле со шкалой 1,3 с целесообразно для измерений устанавливать упорный контакт в такое положение, при котором проскальзывающий контакт замыкается устойчиво, а затем, зафиксировав надежно положение неподвижного проскальзывающего контакта, выполнять уставку упорного контакта.

10. Реле ЭВ-215К — ЭВ-245К (РВ-215К—РВ-245К) проверяют в полном объеме требований настоящего параграфа комплектно с устройством ВУ-200. Трехфазное питание (рис. 5-42) подают на ВУ-200 от источника регулируемого трехфазного напряжения. Для измерения времени замыкания контакта при снятии напряжения используют схему, аналогичную схеме рис. 5-43, *в*, при этом для возврата реле используют трехполюсный рубильник: первым полюсом дешунтируют контакт реле времени, вторым и третьим полюсами отключают две фазы питания устройства ВУ-200.

5-10. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ РВМ-12 И РВМ-13

Технические данные

Схема внутренних соединений реле показана на рис. 5-44.

Реле состоит из двух насыщающихся трансформаторов, первичные обмотки которых включают во вторичные цепи трансформаторов

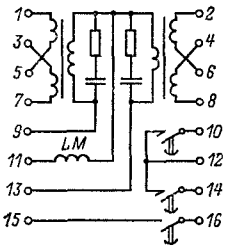


Рис. 5-44. Принципиальная схема реле РВМ-12 и РВМ-13.

LM — обмотка микроэлектродвигателя.

тока любых двух фаз трехфазной системы, индукционного синхронизированного микроэлектродвигателя, создающего выдержку времени контактов, и контактной системы.

Включение электродвигателя производится контактами других реле (зажимы *9*, *11* или *11*, *13* на рис. 5-44).

По максимальному значению выдержек времени выпускаются два исполнения реле: типа РВМ-12 на 4 с, РВМ-13 на 10 с.

Допустимые отклонения выдержек времени срабатывания основного контакта от уставок на шкале реле РВМ-12,РВМ-13 указаны в табл. 5-16.

Номинальный ток реле равен 2,5 или 5 А (в зависимости от способа соединения секций первичной обмотки насыщающегося трансформатора — последовательно или параллельно).

Таблица 5-16

Допустимые отклонения выдержек времени срабатывания

Деление шкалы, с	Отклонение, ± с	Деление шкалы, с	Отклонение, ± с
РВМ-12		*РВМ-13*	
0,5	0,12	1	0,15
1,0	0,12	2	0,2
1,5	0,15	3	0,25
2	0,2	4	0,35
2,5	0,2	5	0,4
3	0,25	6	0,4
3,5	0,3	7	0,45
4	0,35	8	0,45
		9	0,5
		10	0,5

Ток срабатывания реле не превышает номинальный.

Мощность, потребляемая реле при двойном номинальном токе, не превышает 10 В·А.

Реле допускают протекание по первичной обмотке насыщающегося трансформатора тока, равного 10 А длительно и 75 А в течение 10 с, на уставке срабатывания 2,5 А.

Реле имеют три контакта: два проскальзывающих и один конечный.

Конечный контакт способен коммутировать цепь переменного тока мощностью 500 В·А (коэффициент мощности нагрузки не менее 0,5) при токе не более 5 А или напряжении от 24 до 250 В или цепь постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени которой не превышает 0,005 с) мощностью 100 Вт при токе не более 1 А или напряжении от 24 до 250 В.

Проскальзывающие контакты могут замыкать цепи постоянного и переменного тока с указанной выше соответствующей мощностью. Разрыв тока в цепях проскальзывающих контактов должен осуществляться контактами других реле.

Длительно допустимый ток через замкнутые контакты 5 А.

Реле рассчитано для работы при частоте 50 Гц. Отклонение частоты приводит к соответствующему изменению выдержки времени контактов.

Проверка механической части реле

1. Завод выпускает реле в отрегулированном состоянии. При необходимости проверки микродвигателя СМ-1 надо иметь в виду следующее.

При подаче на катушку статора напряжения не более 55 В ротор должен вращаться с синхронной частотой 500 об/мин и входить четко в зацепление с зубчатым колесом; при питании через насыщающийся трансформатор и последовательном соединении первичных обмоток трансформатора и токах 2,5; 10; 50; 75 А микродвигатель должен вращаться равномерно.

При отключении двигателя ротор должен четко падать вниз. При нечетком втягивании или отпадании ротор следует снять и очистить поверхность оси от загрязнения. Для этого необходимо отвернуть два винта, крепящих пластмассовую крышку с нижней стороны двигателя (при этом следует придерживать крышку во избежание выпадания подшипника, бронзовой шайбы и ротора), и осторожно снять крышку, подшипник и ротор. Ось ротора промыть бензином и вытереть чистым лоскутом ткани. Отверстие в подшипниках прочищать деревянной палочкой. После очистки ось ротора и подшипники смазать тонким слоем масла и собрать двигатель. При исполнении реле для умеренного климата применяют часовое масло МН-45 по ГОСТ 8781-71, для тропического климата — часовое масло МЧТ-3; наносят масло тонким слоем специальной маслодозировкой, изготовленной из проволоки диаметром 0,3 мм, расплющенной до ширины 0,7 мм.

2. Рама с подвижными контактами должна свободно вращаться в своих подшипниках; осевой люфт должен быть 0,1—0,3 мм. В исходном положении рама должна опираться на угольник или одновременно на угольник и стойку.

3. Промежуточная ось редуктора должна иметь осевой люфт 0,2—0,4 мм. Зацепление с ведущей шестеренкой двигателя должно быть с зазором около 0,08 мм (проверяется визуально); не должно быть затирания. Изменение зазора в зацеплении производят перемещением двигателя за счет люфтов между крепящими винтами и отверстиями в плате двигателя.

4. Контактные пластинки неподвижных контактов должны при перемыкании их подвижными иметь примерно одинаковые провалы на любой уставке шкалы. Указанное достигается подгибкой пластин неподвижных контактов при установке провалов на средних точках шкал и проверкой на крайних.

Воздушный зазор между серебряными накладками пластин неподвижных контактов в разомкнутом состоянии должен быть 3,4—4 мм.

5. Пружина для возврата подвижной контактной рамы должна быть отрегулирована так, чтобы в любом положении могла преодолеть сопротивление двух контактов, установленных на одинаковые уставки, и обеспечить возврат контактной рамы в течение времени:

для реле типа РВМ-12 — 0,2 с на уставках до третьей точки шкалы и 15 % уставки на уставках от третьей точки шкалы и выше;

для реле типа РВМ-13 — 20 % уставки на уставках до второй точки шкалы и 15 % уставки на уставках от второй точки шкалы и выше.

Регулировку производить перемещением угольника, крепящего конец пружины.

Допускается касание витков пружины при условии обеспечения тока срабатывания и времени возврата, указанных выше.

Проверка электрических характеристик реле

1. Токи четкого срабатывания и возврата реле измеряют при питании поочередно каждого насыщающегося трансформатора по схеме рис. 5-45. Ток подают «толчком».

2. Разброс времени срабатывания прове-

ряется по схеме рис. 5-45 на последней уставке шкалы при полуторакратном токе срабатывания. Абсолютный разброс при изменении тока в первичной обмотке насыщающего трансформатора до 20-кратного номинального для реле типа РВМ-12 должен быть не более 0,12 с, для РВМ-13 — не более 0,25 с (определение разброса приведено в § 5-9).

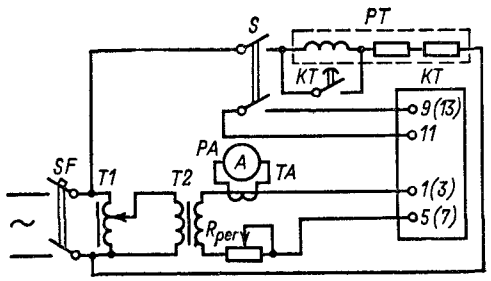


Рис. 5-45. Схема проверки реле времени РВМ-12 и РВМ-13.

T1 — автотрансформатор РНО-250-2; *T2* — трансформатор типа ОСО-0,25; $R_{р\,ег}$ — реостат; $R_{рег} \geqslant 10Z_р$

3. Проверка времени срабатывания реле на рабочей уставке. Если в процессе эксплуатации оперативный персонал использует несколько рабочих уставок, устанавливая их по шкале от руки, проверяют все указанные уставки.

4. Надежность работы контактов и отсутствие вибрации при изменении тока от $1{,}05I_{с.р}$ до максимального тока к. з. проверяются при поочередном питании каждого насыщающегося трансформатора.

5. Проверка времени действия реле в схеме защиты на заданной уставке. Установка более двух контактов на одинаковые уставки на время срабатывания не допускается, так как возвратная пружина может преодолеть из любого положения подвижной системы силу трения только двух контактов. Не допускается также установка двух проскальзывающих контактов в крайнее левое положение (проскальзывающие контакты замкнуты), так как мощность двигателя (при токе срабатывания) недостаточна для преодоления с места механического момента сопротивления двух контактов.

5-11. РЕЛЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ

Проверку реле выполняют в следующем порядке:

1. Осмотр реле, проверка сопротивления изоляции (§ 5-1).

2. Проверка регулировки механической части и состояния контактов. При этом в случае необходимости переделывают контакты (замыкающие на размыкающие или наоборот) и схему внутренних соединений реле. Проверяют межконтактные зазоры, провалы, совместный ход контактов, совпадение контактных поверхностей подвижных и неподвижных контактов, одновременность размыкания, замыкания контактов медленным перемещением от руки якоря реле. Регулировку исправного реле выполняют в основном подгибанием контактов. При необходимости регулируют опережение (запаздывание) срабатывания или переключение (групп) контактов без разрыва цепи.

3. Проверка напряжения (тока) срабатывания и возврата основной обмотки (обмотка, при коммутации которой реле выполняет свою основную функцию в устройстве). Должно быть $U_{с.р} \leqslant 0{,}7U_н$; $U_в \geqslant 0{,}05U_н$. Для реле с замедлением при возврате допускается $U_в \geqslant 0{,}01U_н$.

4. Проверка тока (напряжения) удержания по дополнительным обмоткам, при коммутации которых реле выполняет вспомогательные функции: удержание во включенном состоянии, изменение электрического параметра или задержка действия при выполнении основной функции реле, торможение и т. п. Как правило, намагничивающая сила дополнительной обмотки в схеме устройства недостаточна для срабатывания реле. Подают номинальное напряжение (ток) на основную и дополнительную обмотки, основную обмотку отключают, определяют ток (напряжение) удержания реле по дополнительной обмотке. Должно быть $I_{уд} \leqslant 0{,}8I_н$ или $U_{уд} \leqslant 0{,}7U_н$.

5. Определение однополярных выводов основных и дополнительных обмоток. При проверке по предыдущему пункту напряжение (ток) основной обмотки снижают плавно; если полярность включения основной и дополнительной обмоток не согласована, якорь реле отпадает, если согласована, якорь остается втянутым и отпадает при последующем снижении (отключении) тока (напряжения) дополнительной обмотки — при измерении параметра удержания.

6. Измерение времени действия реле, для которых время задано картой уставок или инструкцией по наладке. Для сложных устройств параметры реле по пп. 3—6 измеряют в полной схеме устройства защиты (автоматики) для проверки правильности включения реле, учета влияния элементов, включенных параллельно и последовательно с обмоткой испытуемого реле: обмоток других реле, резисторов, конденсаторов, диодов и т. п. В случае регулировки времени действия повторно выполняют измерения по пп. 3 и 4.

Схемы для испытаний по пп. 3, 4 и 6 приведены на рис. 5-46. В зависимости от характера замедления (при срабатывании или возврате) и действия контакта (замыкание, размыкание) устанавливают положения тумблеров *S1* и *S2*; нажатием кнопки *SB* приводят схему в действие; возвращают схему отключением автомата *SF*. Более простые схемы приведены на рис. 5-43.

Измерение промежутков времени, меньших 0,04 с, следует выполнить электронным миллисекундомером.

Параметры, измеряемые по пп. 3, 4 и 6, зависят от начального и конечного зазоров магнитной системы, межконтактных зазоров, силы нажатия контактов и сжатия противодействующей пружины. Параметры должны соответствовать техническим данным реле.

7. Нагрузка в цепи контакта не должна

превышать его коммутационной способности (табл. 5-17).

Проверка и регулировка реле серии РП-220.

1. Недопустимо трение в подвижных частях реле, а также люфты, перекос и заклинивание якоря на всем ходе подвижной системы.

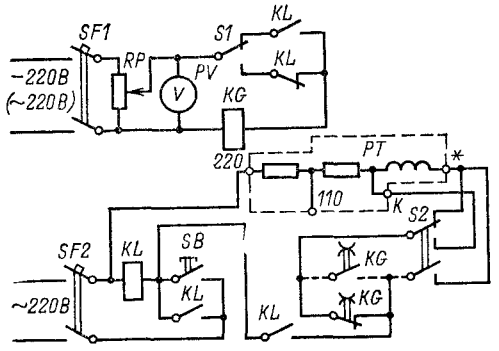


Рис. 5-46. Схема измерения напряжения срабатывания и возврата и проверки замедления реле.

KL — промежуточное реле в схеме измерения времени; *KG* — испытуемое реле; *RP* — реостат 400 Ом, 0,8 А; *S1*, *S2* — тумблеры.

Осевой люфт якоря в горизонтальном направлении должен быть около 0,5 мм.

2. Недопустимо сползание неподвижных контактов с плоскости подвижных. В случае несовпадения вершин контактов необходимо отпустить винт, крепящий контактную систему, и переместить контактную пластинку до совпадения центров контактов. Концы подвижных контактных пластинок должны выступать за рамку толкателя примерно на 2 мм.

3. Воздушные зазоры при отпущенном якоре должны быть (рис. 5-47):

зазор *а* между якорем и плоскостью заднего керна сердечника не более 0,05 мм;

зазор *б* между якорем и немагнитной прокладкой переднего керна сердечника около 1 мм.

Регулировку зазора *а* производят перемещением сердечника (вверх или вниз) вдоль скобы, на которой он установлен, при отпущенных винтах и гайках, крепящих магнитную систему.

Зазор *б* регулируют винтом с гайкой, установленным на скобе. При отпущенном якоре торец винта должен касаться верхней плоскости якоря.

4. Межконтактный зазор *в* должен быть не менее 1 мм как для замыкающих контактов при отпущенном якоре, так и для размыкающих контактов при притянутом якоре. Ре-

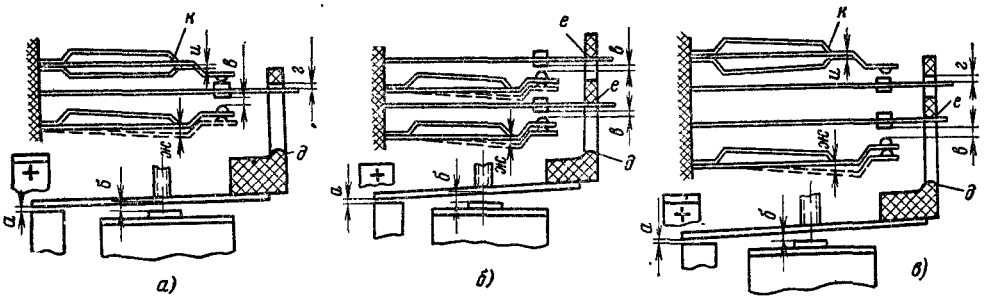


Рис. 5-47. Контактная система реле серии РП-220.

а — РП-221; *б* — РП-222 — РП-224; *в* — РП-225.

Таблица 5-17

Коммутационная способность контактов промежуточных реле при напряжениях 24—250 В

Тип реле	Параметры коммутируемой цепи						Длительно допустимый ток контактов, А	Наибольший ток включения, А
	постоянного тока			переменного тока				
	L/R, с, не более	мощность, Вт	при токе, А, не более	cos φ не менее	мощность, В·А	при токе А, не более		
РП-8, РП-9, РП-11, РП-12	0,005	50	2	0,5	450	2	5	1
РП-23, РП-25, серия РП-250	0,02	100	2	0,5	500	5	5	5
Серия РП-220	0,005	50	2	0,5	300	2	3	12
РП-321, РП-232, РП-233	0,05	100	2	0,5	500	2	5	—
РП-341, РП-342 (контакты нормальной мощности)	0,005	50	1	0,5	450	2	5	—

Примечание. Переключающие контакты повышенной мощности реле типов РП-341 и РП-342 способны шунтировать и дешунтировать управляемую цепь переменного тока при токах до 150 А, если управляемая цепь питается от трансформатора тока и ее полное сопротивление при токе 3,5 А не более 4,5 Ом, а при токе 50 А не более 1,5 Ом; L/R — постоянная времени электрической цепи.

гулировка зазора осуществляется совместным подгибанием упорной пластинки и неподвижной контактной пластинки у места выхода их из контактной колодки.

5. В реле типов РП-221 и РП-225 при отпущенном якоре с целью устранения передачи вибрации якоря на подвижную контактную пластинку размыкающего контакта между последней и рамкой толкателя должен быть зазор *г* 0,3—0,55 мм (рис. 5-47).

6. Для обеспечения четкого срабатывания и возврата реле в исходное положение давление каждой подвижной контактной пластинки замыкающих контактов на изоляционную рамку толкателя при отпущенном якоре должно быть:

не менее 0,05 Н для реле типов РП-221, РП-225;

не менее 0,03 Н для реле типов РП-222, РП-223, РП-224.

7. Провал неподвижных замыкающих контактов при притянутом якоре для всех реле серии РП-220 должен быть 0,2—0,3 мм (зазор *ж*, рис. 5-47); определяется он наличием зазора не менее 0,25 мм между торцом немагнитной пластинки на переднем керне сердечника и якорем. При этом замыкающие контакты должны быть замкнуты.

8. Давление каждой подвижной контактной пластинки размыкающего контакта на неподвижную в реле типов РП-221 и РП-225 должно быть не менее 0,05 Н, что соответствует провалу этих контактов не менее 0,3 мм (размер *и*, рис. 5-47).

Указанный провал определяется наличием зазора не менее 0,3 мм между торцом регулировочного винта и наружной плоскостью якоря; при этом размыкающие контакты должны быть замкнуты.

Верхняя упорная пластинка при отпущенном якоре должна касаться своим торцом (в точке *к*, рис. 5-47) плоскости неподвижной контактной пластинки замыкающего контакта.

9. Для обеспечения отсутствия вибрации замыкающих контактов при срабатывании реле давление каждой неподвижной контактной пластинки замыкающего контакта на свою упорную пластинку должно быть равно около 0,2 Н, при этом должен быть обеспечен межконтактный зазор не менее 1 мм (п. 4).

10. Суммарное усилие на толкателе в точке *д* (рис. 5-47) от цилиндрической пружины и пластин подвижных контактов должно быть: 0,1—0,2 Н для реле РП-221 и РП-225; 0,2—0,4 Н для реле РП-222, РП-223 и РП-224.

11. В случае необходимости напряжение срабатывания реле регулируют изменением в небольших пределах зазора *б* (см. выше), а напряжение срабатывания, возврата, ток удержания — изменением натяжения цилиндрической пружины (подгибом полки угольника, к которой крепится конец пружины).

Особенности регулировки реле РП-251

Реле РП-251, применяемые в качестве выходных реле защит, наряду с необходимой задержкой на срабатывание имеют задержку на возврат 0,4—0,7 с, если не подвергаются специальной регулировке при наладке. По этой причине при застревании подвижной системы реле тока РТ-40/Р, применяемого в схемах УРОВ и в других устройствах, может иметь место ложная работа устройств.

Реле РП-251 регулируют следующим образом: с магнитопровода реле снимают все латунные шайбы, катушку реле закрепляют кольцом со стопорными винтами, регулировочный винт якоря ввинчивают и закрепляют контргайкой таким образом, чтобы конечный воздушный зазор получить 0,3—0,5 мм, регулируют контактную систему и время срабатывания реле (в пределах 0,05—0,12 с) регулировочным винтом скобы якоря.

Время отпадания реле РП-251 после регулировки получают 0,05—0,1 с, что намного меньше уставки УРОВ, принимаемой в большинстве случаев 0,4 с.

Проверка и регулировка реле РП-321, РП-341 и РП-342

1. Сердечник должен быть установлен так, чтобы якорь свободно вращался на оси и в притянутом положении упирался в немагнитную прокладку и полюс сердечника с катушкой, зазор между якорем и полюсом сердечника со стороны оси вращения якоря должен быть 0,1—0,2 мм при притянутом якоре. Установку положения сердечника производят перемещением его вверх или вниз при отпущенных винтах, крепящих сердечник к скобе.

2. В реле РП-321 между толкателем и подвижными контактными пластинками переключающих контактов при отпущенном якоре должен быть зазор 0,5—1 мм, а подвижные контактные пластинки замыкающих контактов должны упираться в толкатель. Зазор регулируют подгибанием неподвижных контактных пластинок размыкающих контактов. Зазор между замыкающими контактами переключающей пары должен быть 2,5—2,8 мм, а зазор между замыкающими контактами второй пары контактов (одной стороны цоколя) должен быть не менее 2,5 мм.

3. Для реле РП-321, РП-341 и РП-342 нажатие каждого подвижного контакта переключающих контактов нормальной мощности на неподвижный размыкающий контакт должно быть 0,12—0,18 Н, а каждой подвижной контактной пластинки замыкающего контакта на толкатель не менее 0,08 Н.

Провал контактов нормальной мощности должен быть не менее 0,3 мм; с этой целью при зазоре между сердечником и якорем 0,25 мм (при срабатывании реле) должно быть соприкосновение подвижных и неподвижных замыкающих контактов.

4. В реле РП-341 и РП-342 при отпущенном якоре зазор между угольником и подвижной пластинкой переключающего контакта нормальной мощности должен быть 0,5—0,8 мм, а между замыкающими контактами нормальной мощности не менее 1,6 мм.

Межконтактный зазор усиленного замыкающего контакта должен быть 1,5—2 мм, размыкающего контакта после срабатывания реле — не менее 2 мм. Для обеспечения переключения без разрыва цепи усиленных замыкающего и размыкающего контактов должен быть зазор 0,5—0,8 мм между угольником и подвижной контактной пластинкой размы-

Таблица 5-18

Технические данные реле РП-342, РП-341 и РП-321

Тип реле	Номинальные данные, род тока	Электрические параметры действия	Время срабатывания, с	Потребляемая мощность, не более	Термическая стойкость	Гарантированное количество срабатываний
РП-342	110, 220 В, постоянный ток	$U_{с,р} \leqslant 0{,}7\ U_н$	$\leqslant 0{,}04$ при $U_н$	10 Вт при $U_н$	1,1 $U_н$ длительно	6300, в том числе 1200—контактов нормальной мощности; 75—контактов повышенной мощности
РП-341; РП-321	Переменный ток	$I_{с,р} \leqslant 2{,}5$ А* или $I_{с,р} \leqslant 5$ А**	$\leqslant 0{,}04$ при $2\,I_{с,р}$	10 В·А при $2\,I_{с,р}$	10 А** длительно; 150 А**—4 с	

* При последовательном соединении секций первичной обмотки НТТ.
** При параллельном соединении НТТ.

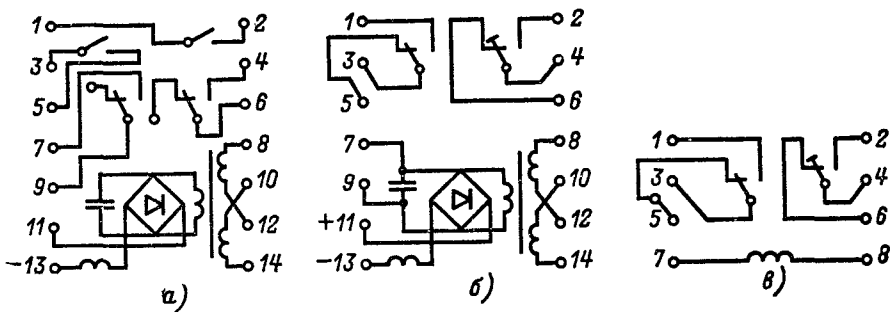


Рис. 5-48. Схемы внутренних соединений реле.
а — РП-321; *б* — РП-341; *в* — РП-342.

кающего контакта в момент замыкания замыкающего контакта. Регулировку при необходимости осуществляют подгибанием угольника, укрепленного на толкателе.

Нажатие усиленного замыкающего контакта после замыкания должно быть не менее 0,5 Н, а нажатие усиленного размыкающего контакта (при отпущенном якоре) не менее 0,3 Н.

5. Для реле РП-321, РП-341 и РП-342 регулировку межконтактных зазоров выполняют подгибанием «язычка» хвостовика якоря, подрегулировку зазоров — подгибанием неподвижных контактных пластинок у места закрепления их в колодках (расстояние от места изгиба до колодки должно быть 3—8 мм, радиус изгиба при этом должен быть не менее 2 мм). При обесточенном реле хвостовик якоря должен упираться «язычком» в сердечник.

6. Для реле РП-342 проверяют напряжение, а для реле РП-321 и РП-341 — ток срабатывания и возврата (табл. 5-18). При необходимости эти параметры изменяют подгибанием переднего хвостовика скобы якоря, упирающегося в сердечник. Схема внутренних соединений реле приведена на рис. 5-48.

7. Снимают зависимость вторичного выпрямленного напряжения от первичного тока при последовательно соединенных обмотках НТТ для реле РП-321 и РП-341 до тока насыщения.

8. Проверяют надежность работы контактов реле РП-341 и РП-342 при максимальном токе к. з. и дешунтировании электромагнита отключения. Для испытаний рекомендуется использовать нагрузочный трансформатор (см. § 5-6).

5-12. БЛОКИ ПИТАНИЯ БПТ-1002 И БПН-1002

Технические данные

Принципиальные схемы блоков приведены на рис. 5-49 и 5-50.

На схеме блока БПТ-1002 показана первичная обмотка трансформатора *Т*, состоящая из секций, выводы которых подключены к зажимам *1—2*, *3—4*, *5—6*, *6—7*, *7—8* на плате трансформатора *Т*. Количество витков, содержащихся в каждой из указанных секций: $w_{1-2}=100$; $w_{3-4}=50$; $w_{5-6}=25$; $w_{7-8}=13$. В зависимости от нагрузочной способности трансформатора (или трансформаторов) тока, к которому подключается блок БПТ-1002, используется то или иное количество витков указанных секций в соответствии с табл. 5-19, для чего определенные секции соединяются перемычками последовательно.

Положения перемычек между выводами секций обмоток на платах блоков питания

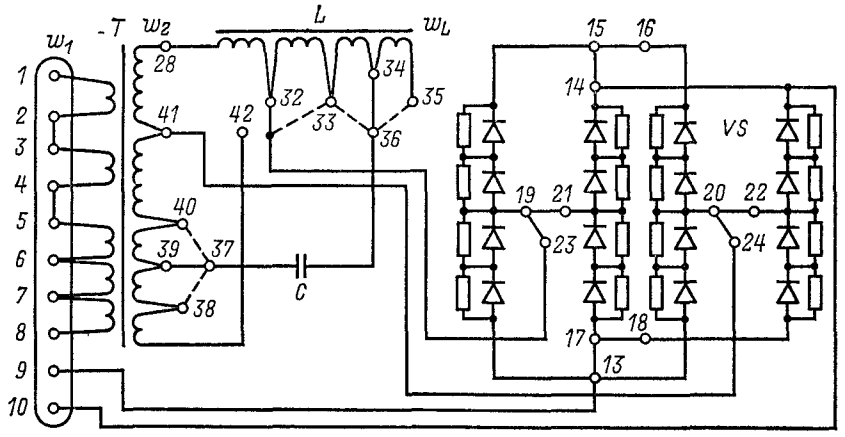


Рис. 5-49. Принципиальная схема блока питания БПТ-1002 (положение перемычек показано для уставки номинального выходного напряжения 110 В).

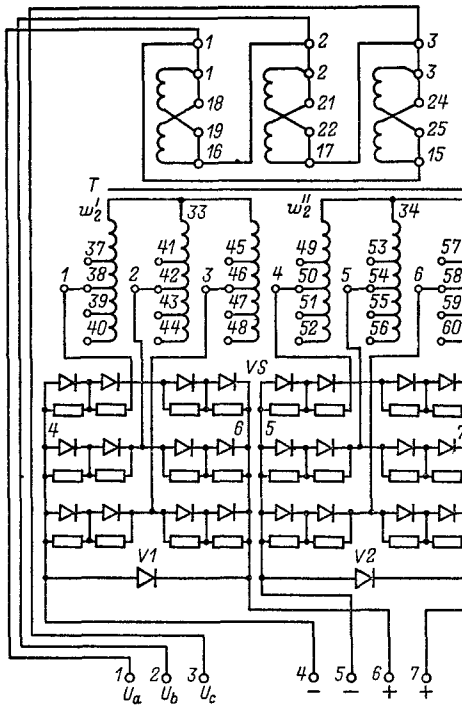


Рис. 5-50. Принципиальная схема блока питания БПН-1002.

$w'_2 = w''_2 = 115$ витков, ответвления от 83, 95 и 105-го витков.

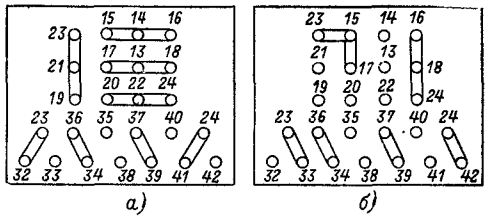


Рис. 5-51. Положение перемычек на плате дросселя блока БПТ-1002 для разных уставок номинального выходного напряжения.

а — $U_{вых,н} = 110$ В; *б* — $U_{вых,н} = 220$ В.

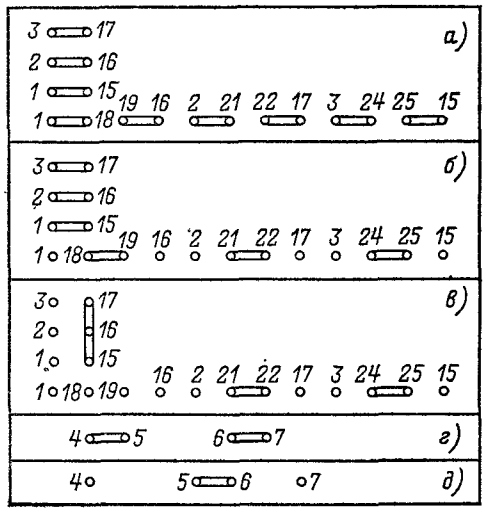


Рис. 5-52. Положение перемычек между выводами секций первичной обмотки на плате трансформатора *Т* блока БПН-1002 для уставок номинального выходного напряжения.

а — 100, 110, 115, 127 В; *б* — 220, 230 В; *в* — 380, 400; 440 В Положение перемычек на выходе блока для уставок номинального выходного напряжения, *г* — 110 В; *д* — 220 В.

для разных номинальных параметров показаны на рис. 5-51, 5-52 и 5-53.

При плавном увеличении тока в первичной обмотке и отсутствии нагрузки на выходе блока БПТ-1002 феррорезонанс наступает при м. д. с. 840 ± 100 А.

Выходное напряжение при протекании тока 10 А по всем секциям первичной обмотки трансформатора *Т* блока БПТ-1002 соответст-

Таблица 5-19

Данные для выбора количества витков ω_1 первичной обмотки блока БПТ-1002

Тип трансформатора тока	Коэффициент трансформации или класс точности	Количество витков ω_1
ТВТ-35М	150/5	50
	200/5	50
	300/5	100
	400/5	125
	Остальные	200
ТВТ-35/10	600/5	50
	750/5	75
	1000/5	100
	1500/5	150
ТВТ-110 (исполнения 300 и 600 А)	100/5	50
	150/5	75
	200/5	100
	300/5	175
	400/5	200
	600/5	200
ТВТ-110 (исполнения 1000 и 2000 А)	400/5	150
	Остальные	200
ТВТ-220	200/5	125
	Остальные	200
ТВДМ-35-1 (исполнения 200, 300 и 600 А)	200/5	50
	300/5	75
	400/5	100
	600/5	125
ТВУ-110/50 (исполнения 600, 1000 и 2000 А)	200/5	100
	300/5	175
	Остальные	200
ТВ-220/25 (исполнения 600, 1000 и 2000 А)	200/5	100
	300/5	150
	Остальные	200
ТВС-220/40	—	200
ТПОЛ-10 (обмотки класса Р)	600/5	50
	1000/5	50
	800/5	75
ТПЛ-10 (обмотки класса Р)	1000/5	75
	400/5	75
	Остальные	50
ТВЛМ-10 (обмотки класса Р)	Исполнение 600 А	75
	Исполнение 800 А	100
	Исполнение 1000 А	75
	Исполнение 1500 А	125

Продолжение табл. 5-19

Тип трансформатора тока	Коэффициент трансформации или класс точности	Количество витков ω_1
ТПЛМ-10 и ТПЛМУ-10 (обмотки класса Р)	Исполнение 300 А	50
	Исполнение 400 А	75
ТВ-35/10 и ТВ-35/25 (исполнения 300 и 600 А)	200/5	50
	300/5	50
	400/5	75
	600/5	125
ТВС-35/6,3 (исполнения 150, 300 и 400 А)	100/5	50
	200/5	50
	300/5	75
	400/5	100
ТВС-35/50 (исполнения 1200, 2000 и 3000 А)	600/5	175
	Остальные	200
ТВ-110/20 и ТВ-110/50 (исполнения 200, 300, 600 и 1000 А)	100/5	50
	150/5	100
	200/5	100
	300/5	175
	Остальные	200
ТВС-110/80 (исполнения 1200, 2000, 3000 А)	—	200
ТЛМ-10 (обмотки класса Р)	Исполнение 300 А	75
	Исполнение 800 А	100
	Исполнение 1000 А	100
	Исполнение 1500 А	125
ТФНД-35М		
Исполнения 150—600 А	Класс Р	150
	Класс 0,5	100
Остальные исполнения	Класс Р	200
	Класс 0,5	100
Класс 0,5	800/5	150
ТФНР-35	Класс Р	200
Класс 0,5	500/5—1000/5	75
Остальные		200

Продолжение табл. 5-19

Тип трансформатора тока	Коэффициент трансформации или класс точности	Количество витков w_1
ТФНД-110М	Класс Р	150
Исполнения 150—600 А	Класс 0,5	50
Исполнения 400—800 А	Класс Р	200
	Класс 0,5	75
ТФНД-110М-II	Класс Р	200
Класс 0,5	750/5—1500/5	75
	1000/5—2000/5	150
	Остальные	200
ТФНД-220-I и ТФНД-220-IV	—	200

Таблица 5-20

Значения выходного напряжения блока БПТ-1002

Сопротивление нагрузки, Ом	Выходное напряжение, В	
	Уставка	Пределы изменения
∞	110	Не более 130
10		Не менее 90
∞	220	Не более 260
40		Не менее 180

вует данным табл. 5-20. Блок выдерживает в течение 5 с ток 50 А первичной обмотки при нагрузке 10 Ом — для уставки номинального выходного напряжения 110 В, 40 Ом — для уставки 220 В.

Блок БПТ-1002 в длительном режиме работы выдерживает при отсутствии нагрузки: протекание по первичной обмотке трансформатора *Т* токов, не превышающих токов феррорезонанса; после наступления феррорезонанса — 9,5 А при максимальном количестве включенных витков первичной обмотки трансформатора *Т*.

Длительно допустимый ток нагрузки блока БПТ-1002 7 А для уставки номинального выходного напряжения 110 В; 3,5 А для уставки номинального выходного напряжения 220 В.

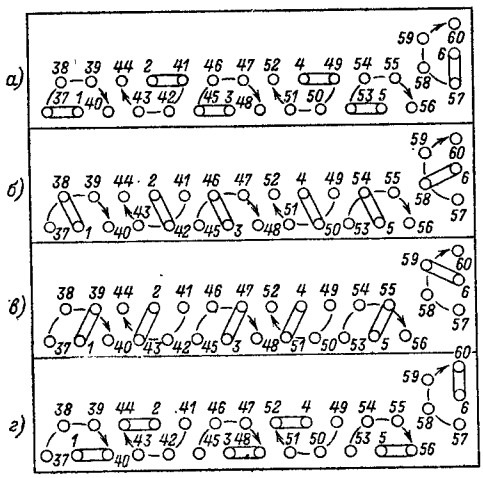


Рис. 5-53. Положение переключателей вторичных витков трансформатора *Т* блока БПН-1002 при включении на различные входные напряжения.

а — 127, 440 В, *б* — 110, 115, 220, 230, 380 и 400 В; *в* — 100 В; *г* — менее 100 В. (Стрелки на переключателях *1—6* направлены в сторону увеличения количества витков вторичных обмоток.)

Таблица 5-21

Значения входного и выходного напряжения блока БПН-1002

Схема соединения первичных обмоток для уставок входного напряжения, В			Количество витков вторичных обмоток трансформатора w_1 и w_2	Положение переключателей на плате трансформатора (рис. 5-53)	Напряжение входа, % напряжения уставки	Выходное напряжение					
						Уставка 110 В (рис. 5-52, *г*)			Уставка 220 В (рис. 5-52, *а*)		
						Сопротивление нагрузки, Ом					
Рис. 5-52, *а*	Рис. 5-52, *б*	Рис. 5-52, *в*				∞	5	10	∞	20	40
127	—	440	83	*а*	110	Не более 140 В	—	—	Не более 280 В	—	—
110, 115	220, 230	380, 400	95	*б*							
100	—	—	105	*в*							
95	—	—	115	*г*							
127	—	440	83	*а*	85	—	Не менее 80 В	Не менее 86 В	—	Не менее 160 В	Не менее 172 В
110, 115	220, 230	380, 400	95	*б*							
100	-	—	105	*в*							
95	—	—	115	*г*							

Номинальные входные напряжения блока БПН-1002 при трехфазном питании: 100, 110, 127, 220, 380 и 440 В. Блок может быть включен на напряжения 115, 230 и 400 В. При этом на обмотках трансформатора T должны использоваться ответвления в соответствии с рис. 5-53, 5-52 и табл. 5-21.

Потребление блока БПН-1002 при указанных входных напряжениях составляет:

а) не более 25 В·А на фазу при отсутствии нагрузки;

б) не более 1500 В·А на фазу при нагрузке 5 Ом (уставка выходного напряжения 110 В) и 20 Ом (уставка выходного напряжения 220 В);

в) не более 750 В·А на фазу при нагрузке 10 Ом (уставка выходного напряжения 110 В) и 40 Ом (уставка 220 В).

Блок питания БПН-1002 в длительном режиме работы допускает включение на входное напряжение $1{,}1U_{н}$, при этом ток нагрузки не должен превышать следующих значений: 6,4 А для уставки выходного напряжения $U_{вых.н}=110$ В; 3,2 А для уставки выходного напряжения $U_{вых.н}=220$ В.

Схемы включения блоков питания рассмотрены в § 5-14.

Наладка блоков питания БПТ-1002

1. Проверка качества монтажа (§ 5-1) и исправности выпрямителей. Омметром комбинированного прибора (например, Ц-4312) на малом пределе измеряют прямое и обратное сопротивление диода. При этом важно убедиться лишь в значительном расхождении значений сопротивлений в прямом и обратном направлениях. Каждый диод проверяется в отдельности без распайки схемы.

При необходимости проверяют обратные токи диодов Д243.

2. Сопротивление изоляции измеряется мегаомметром 1000 В при закороченных зажимах выхода:

а) вход — корпус; б) выход — корпус; в) вход — выход. Сопротивление изоляции цепей относительно корпуса должно быть не менее 10 МОм.

3. Напряжение выхода блока определяется при токе 10 А, заданной уставке $U_{вых.н}$ и $w_1=200$ витков по схеме рис. 5-54. Напряжение выхода при холостом ходе и нагрузке должно соответствовать данным табл. 5-20. Определяют м. д. с. начала феррорезонанса, которая должна быть $F_{фр}=840\pm100$ А.

4. Уставка — количество витков w_1 первичной обмотки трансформатора T определяется в зависимости от коэффициента трансформации и типа трансформатора тока (табл. 5-19) и путем сравнения вольт-амперных характеристик трансформатора тока и ненагруженного блока питания. Первая характеристика должна располагаться выше (предварительно можно использовать характеристики, представленные на рис. 5-55). При питании блока от двух параллельно или последовательно соединенных вторичных обмоток трансформаторов тока напряжение вольт-амперной характеристики соответственно уменьшается или увеличивается.

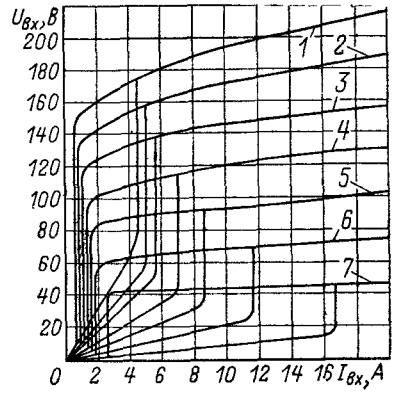


Рис. 5-55. Входные вольт-амперные характеристики ненагруженного блока питания БПТ-1002.

1 — $w_1=200$ витков; *2* — $w_1=175$ витков; *3* — $w_1=150$ витков; *4* — $w_1=125$ витков; *5* — $w_1=100$ витков; *6* — $w_1=75$ витков; *7* — $w_1=50$ витков.

Необходимо снять вольт-амперную характеристику указанной схемы трансформаторов тока и сравнить ее с вольт-амперной характеристикой ненагруженного блока питания.

5. На блоке устанавливают уставки w_1 и $U_{вых.н}$ (рис. 5-49 и 5-51). Перемычки на плате дросселя *L 36—33, 36—34, 37—38, 37—39, 37—40* устанавливают на заводе при калибровке тока феррорезонанса.

6. По схеме рис. 5-54 (рубильник S отключен) снимается характеристика холостого хода блока $U_{вх}=f(I_{вх})$ и $U_{вых}=f(I_{вх})$ на рабочих уставках до вхождения в режим резонанса, который определяют по резкому возрастанию напряжения (рис. 5-55 и 5-56). Определяется ток надежной работы блока $I_{н.р}$ при холостом ходе, т. е. при $R_{нагр}=\infty$. Характеристику снимают при повышении и при сни-

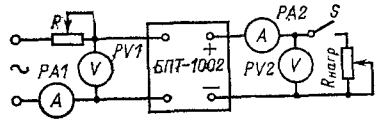


Рис. 5-54. Схема проверки блока питания БПТ-1002.

PV2, PA2 — вольтметр и амперметр магнитоэлектрические.

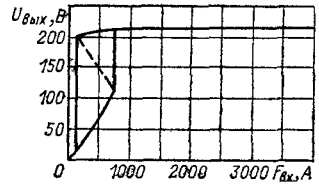


Рис. 5-56. Зависимость выходного напряжения блока питания БПТ-1002 от намагничивающей силы без нагрузки (для уставки $U_{вых.н}=220$ В).

жении напряжения (рис. 5-55). Если м. д. с. начала феррорезонанса выходит за пределы 840±100 А, ее регулируют путем изменения ответвлений дросселя или вторичной обмотки трансформатора T, на которые включен конденсатор C.

Ток надежной работы $I_{н.р}$ — это минимальное значение тока на входе блока, при

ны; имитация работы блока питания БПТ-1002 совместно с трансформаторами тока обеспечивается нагрузочным устройством (*T1*, *T2*, *R*). На входе схемы трансформаторы тока — блок протекает ток $I'_{вх}$, измеряемый прибором *PA1*. Измеряют ток надежной работы блока $I'_{вх.н.р}$, вычисляют ток надежной работы блока, про-

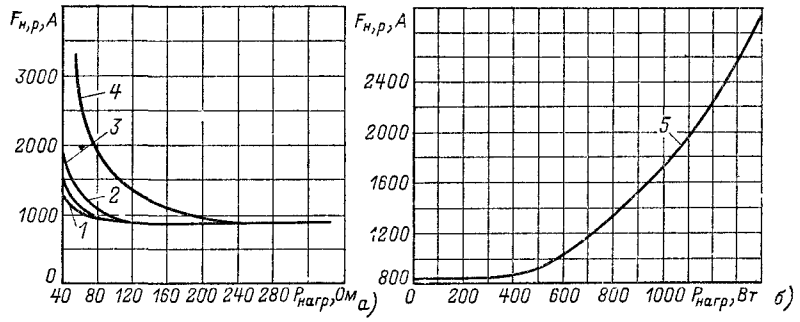


Рис. 5-57. Зависимость м. д. с. надежной работы блока питания БПТ-1002.

а — от сопротивления нагрузки; *б* — от мощности нагрузки при постоянном $U_{вых}$: *1* — $U_{вых}$ = =0,73$U_{вых.н}$; *2* — $U_{вых}$ =0,8$U_{вых.н}$; *3* — $U_{вых}$ =0,9$U_{вых.н}$; *4* — $U_{вых}$=$U_{вых.н}$; *5* — $U_{вых}$= =0,85$U_{вых.н}$. Кривые *1*—*4* для уставки $U_{вых.н}$=220 В.

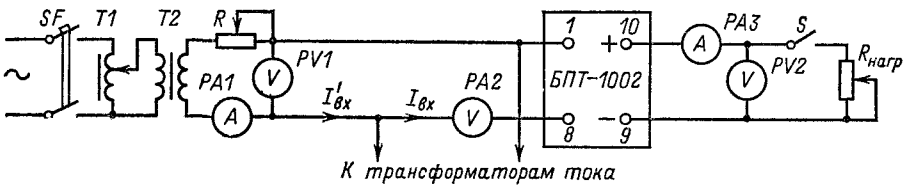


Рис. 5-58. Схема для определения тока надежной работы блока БПТ-1002 с учетом отсоса в цепь намагничивания трансформаторов тока

котором на выходе блока обеспечивается $U_{вых} \geqslant 0{,}85\, U_{вых.д}$.

7. Характеристика $U_{вых}=f(I_{вх})$ снимается при сопротивлении $R_{нагр}$ на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки в цепях оперативного выпрямленного тока при повреждении на линии, оборудованной сложными защитными, или при повреждении трансформатора. При этом определяется ток надежной работы $I_{н.р}$.

Нагрузка на один блок БПТ-1002 не должна превышать 1200 Вт; учитываются только блоки, обтекаемые равными токами одноименных фаз однотипных трансформаторов тока.

Зависимости м. д. с. надежной работы $F_{н.р}$ от параметров нагрузки для блока БПТ-1002 приведены на рис. 5-57.

8. Полученные опытным путем значения $I_{н.р}$ при холостом ходе и нагрузке блока сравнивают с токами к. з. и уставками защит (см. § 5-13).

9 Характеристики по пп. 6 и 7 рекомендуется по возможности снимать при полностью собранных токовых цепях по схеме рис. 5-58, которая позволяет учитывать погрешность трансформаторов тока В этой схеме первичные обмотки трансформаторов тока обесточе-

текающий в первичной цепи трансформатора тока,

$$I_{1н.р} = I'_{вх.н.р}\,\frac{n_т}{k_{сх}}\,,$$

где $n_т$, $k_{сх}$ — коэффициент трансформации и коэффициент схемы соединения трансформаторов тока соответственно. Значения $k_{сх}$ принимают следующие: $k_{сх}=\sqrt{3}$ — трансформаторы тока, питающие блок, включены по схеме на разность токов фаз; на подстанции имеются блоки БПНС-2, выходы которых соединены параллельно с выходами блоков БПТ-1002; $k_{сх}=1$ — во всех остальных случаях.

Проверяют расчетом обеспеченность питания оперативного тока (§ 5-13).

10. Срабатывание защиты (автоматики) проверяют действием на отключение выключателей при питании оперативным током по постоянной (предусмотренной проектом) схеме от испытываемого блока (блоков) питания, при включении на входы блоков питания тока (напряжения) от постороннего источника.

11. Указанное в предыдущем пункте испытание для блока БПТ-1002 желательно выполнить при прогрузке первичным током. При

токе, близком к номинальному, измеряют величины, указанные на рис 5 59 Затем в первичную цепь кратковременно подают ток $I_к$, незначительно превышающий предполагаемый первичный ток надежной работы блока, поочередно имитируя к з при сочетаниях фаз *AB*, *BC*, *CA* по рис 5 59 В каждом случае

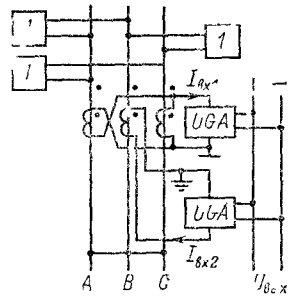


Рис 5 59 Схема испытания блоков питания БПТ 1002 первичным током

1 — нагрузочное устройство *UGA* — блок питания

запускают защиты от контактов реле при максимальной нагрузке блока с действием на отключение выключателей Если на подстанции имеются блоки БПНС 2, выходы которых включены параллельно с выходами блоков БПТ 1002, испытание первичным током выполняют только при питании тех фаз, на ток которых включены блоки БПТ 1002 (для имитации трехфазного к з)

Напряжение срабатывания электромагнитов отключения выключателей, цепи управления которых питаются от блоков тока (напряжения), рекомендуется устанавливать в пределах 40—50 % номинального, после чего можно допустить снижение напряжения на выходе блока до $(0{,}75-0{,}8)U_н$ в наиболее тяжелых режимах

По возможности испытания блоков питания совмещают с испытанием защит первичным током

В случае недостаточной мощности нагрузочных устройств ток подают во вторичные цепи по схеме рис 5 58 для каждого блока БПТ-1002

12 Для снижения волновых перенапряжений в блоке БПТ 1002 при к з в сети необходимо включить параллельно первичной обмотке блока последовательно соединенные конденсатор 0,5—1 мкФ и резистор 160—230 Ом

Наладка блоков питания БПН-1002

1, 2 См выше «Наладка блоков питания БПТ 1002», пп 1 и 2

При необходимости проверяется выпрямленное напряжение селенового столба 40ГД8Я по схеме рис 5 60, *а* При токе 0 6 А вольтметр *PV1* должен показывать не менее 75 В Если селеновые столбики не соответствуют этому требованию в результате длительного хранения, их формуют в схеме рис 5 60, *б* в течение не менее 2 ч затем проверяют снова

3 На платах блока устанавливают уставки в зависимости от требуемых значений первичного и вторичного номинальных напряжений (табл 5 21, рис 5 52 и 5 53)

4 Снимается характеристика холостого хода блока по схеме рис 5-61 (при отключенном рубильнике *S*) При напряжении $U_{вх} = 0{,}1U_{вх\,н}$ включают автомат *SF2*, измеряют

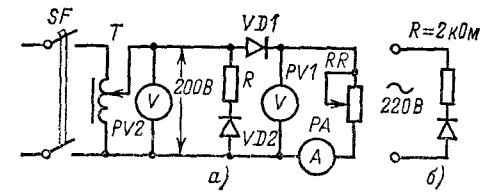


Рис 5 60 Испытание селеновых выпрямителей

а — проверка выпрямленного напряжения, *б* — восстановление выпрямителей *VD1* — испытуемый выпрямитель *VD2* — вспомогательный выпрямитель *RR* — реостат 200—300 Ом 1 А *R* — резистор 200 Ом, *PV1 PA* — вольтметр и амперметр магнитоэлектрические *PV2* — вольтметр электромагнитный

ток короткого замыкания блока, пересчитывают его значение на номинальное напряжение Указанное значение $I_к$ необходимо для проверки чувствительности аппаратуры защиты При $U_{вх} = U_{вх\,н}$ измеряют ток потребления блока Мощность, потребляемая при $U_{вх\,н}$, должна быть $S_ф \leqslant 25$ В А на фазу (рис 5 62)

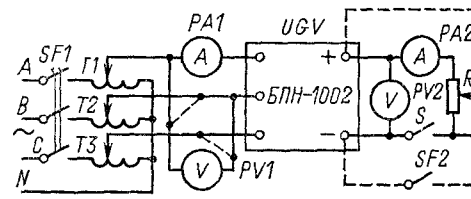


Рис 5 61 Схема испытания блока питания БПН 1002 (или БПНС 2)

T1 T2 T3 — автотрансформаторы типа РНО 250 2 или трехфазный автотрансформатор (потенциалрегулятор) мощностью не менее 1500 В А на фазу *PV1 PA1* — приборы электромагнитные *PV2 PA2* — приборы магнитоэлектрические (вольтметр *PV1* используют для поочередных измерений всех трех линейных напряжений или включают три вольтметра)

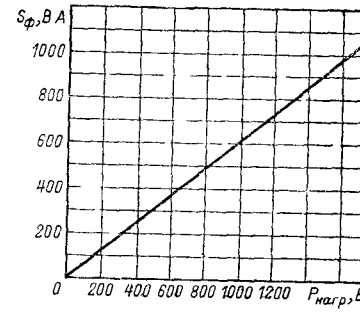


Рис 5 62 Зависимость полной мощности, потребляемой одной фазой блока питания БПН-1002, от мощности нагрузки

При $U_{вх}=1{,}1U_{вх,н}$ должно быть $U_{вых}\leqslant$ $\leqslant 280$ В (для уставки $U_{вых,н}=220$ В) или $U_{вых}\leqslant 140$ В (для уставки $U_{вых,н}=110$ В). Требуемое напряжение выхода устанавливают количеством включенных витков трансформатора T.

5. По схеме рис. 5-61 снимается нагрузочная характеристика блока $U_{вх}=f(R_{нагр})$ при $U_{вых}=0{,}85U_{вых,н}$ (рубильник S включен). По этой характеристике определяется $U_{вх}=$ $=U_{вх,н,р}$ — напряжение надежной работы блока, при котором (при максимальной нагрузке блока) $U_{вых}\geqslant 0{,}85U_{вых,н}$ (рис. 5-63).

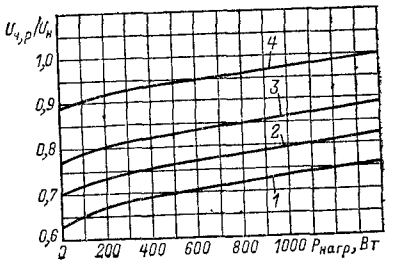


Рис. 5-63. Зависимость напряжения надежной работы блока БПН-1002 от мощности нагрузки при трехфазном симметричном питании блока и $U_{вых}=0{,}85U_{вых,н}$.

1 — $w_2=115$ витков; *2* — $w_2=105$ витков; *3* — $w_2=95$ витков; *4* — $w_2=83$ витка.

Для блоков, питающих цепи сигнализации или цепи блокировки разъединителей, данное испытание не выполняется.

6. См. выше «Наладка блоков питания БПТ-1002», п. 10.

5-13. БЛОКИ ПИТАНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ БПНС-2

Технические данные

Блоки БПНС-2 выпускают вместо блоков БПНС-1. Принципиальная схема блока БПНС-2 дана на рис. 5-64, номинальные данные приведены в табл. 5-22. В зависимости от модификации трансформаторы блока *T1*, *T2*, *T3* могут быть соединены по схеме треугольник — звезда или звезда — звезда.

Выходная мощность блока БПНС-2: номинальная длительно допустимая 1000 Вт, в течение 30 с — 1800 Вт, в течение 1 с — 2000 Вт

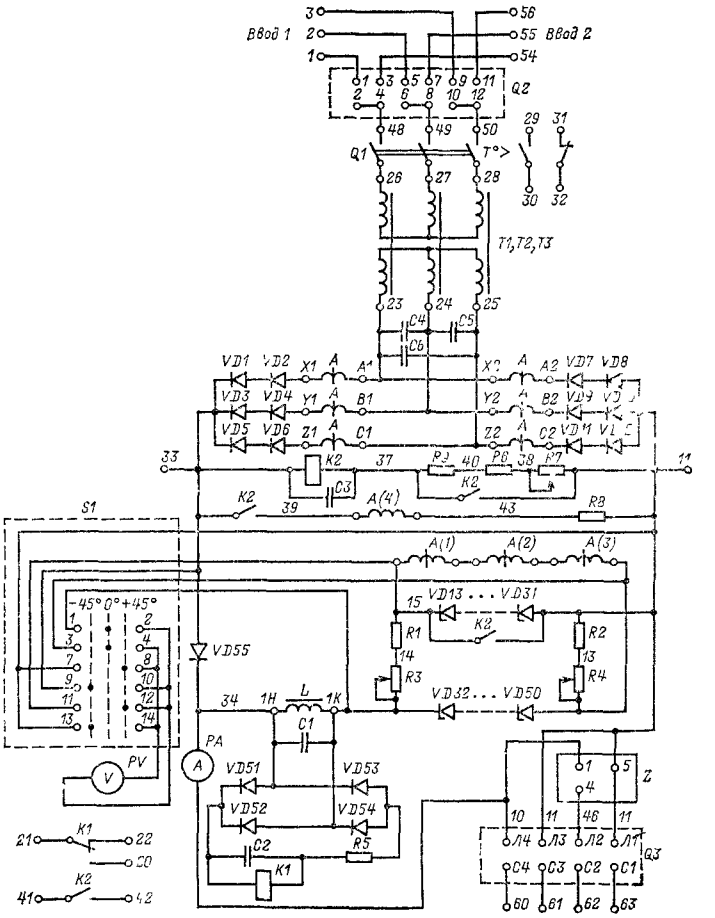


Рис. 5-64. Принципиальная схема блока питания типа БПНС-2.

Таблица 5-22

Технические данные блоков питания БПНС-2

Напряжение питания, В	Номинальная частота, Гц	Номинальный ток расцепителя *Q1*, А	Напряжение питания, В	Номинальная частота, Гц	Номинальный ток расцепителя *Q1*, А
100	50	16	380	60	4
115	60	16	400	60	4
220	60	6,4	415	50 и 60	4
230	50 и 60	6,4	440	60	4
240	50	6,4	550	50	4

(последние два значения при симметричном напряжении на входе 0,9 $U_{вх,н}$).

Блок обеспечивает напряжение на выходе в пределах 0,85—1,1 номинального значения (220 В) при следующих параметрах:

изменение входного напряжения от 0,5 до 1,1 номинального значения при трехфазном питании и изменение сопротивления нагрузки от 40 Ом до ∞; при сопротивлении нагрузки 30 Ом нижний предел входного напряжения составляет 0,6 номинального значения;

изменение входного напряжения от 0,7 до 1,1 номинального значения (для ряда $U_{вх,н}$ 100, 220, 230, 240 В) или от 0,75 до 1,1 (для $U_{вх,н}$ 380, 400, 415, 440, 550 В) при однофазном питании и изменение сопротивления нагрузки от 40 Ом до ∞.

При питании номинальным трехфазным напряжением и коротком замыкании на выходе блока ток в месте к. з. не превышает 40 А.

Блок БПНС-2 имеет два исполнения: со сглаживающим фильтром *Z* и без него. Схема фильтра дана на рис. 5-65. Параметры фильтра: номинальная мощность 500 Вт; коэффициент пульсаций выходного напряжения не более 3 %.

На входе блока установлен трехполюсный автоматический выключатель *Q1* типа АП50-3Т (без максимального расцепителя), обеспечивающий отключение коротких замыканий на выходе блока с временем действия 1,5—2 с, но не менее 0,15 с. Это дает возможность выполнить защиту цепей постоянного тока, питаемых от блока БПНС-2, селективной.

Блок БПНС-2 содержит магнитный усилитель *A* с положительной внутренней обратной связью и с отрицательной обратной связью по напряжению выхода блока, которая образуется следующим образом: три последовательно соединенные обмотки управления фаз магнитного усилителя включены в

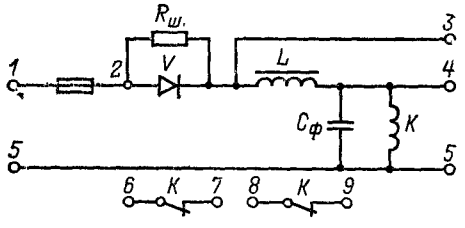


Рис 5-65 Принципиальная схема сглаживающего фильтра блоков БПНС-2.

диагональ моста, состоящего из четырех резисторов *R1*, *R2*, *R3*, *R4* и двух плеч нелинейных элементов, в качестве которых используют кремниевые стабилитроны *VD13—VD50* типа Д815Б, включенные последовательно по 19 стабилитронов в плече.

Вход блока может быть подключен к одному из двух вводов питания с помощью переключателя *Q2* на три положения: питание от ввода *1*, отключено питание (*0*), питание от ввода *2*. На выходе блока установлен выключатель *Q3*, через который проходят две цепи: выпрямленного сглаженного напряжения и цепь без сглаживания (рис. 5-64). Блок БПНС-2 снабжен переключателем *S1*, который предназначен для проверки исправности элементов блока.

Наладка блока БПНС-2

1. Проверка соответствия аппаратуры блока проекту и данным заводской информации.

2. Сопротивление изоляции между обмотками и корпусом блока измеряется мегаомметром 1000 В. Для этого необходимо предвари-

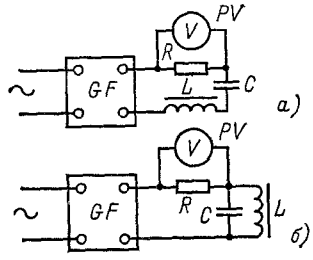


Рис. 5-66. Схема проверки фильтра второй гармоники блока БПНС-2.

а — в цепи выхода; *б* — в цепи управления.

тельно зашунтировать перемычками диоды, стабилитроны и конденсаторы. Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

3. Снятие частотной характеристики *LC*-фильтра измерительного органа и фильтра *Z* в цепи выхода по схеме рис. 5-66. При напряжении звукового генератора 10—20 В минимум тока через первый фильтр и максимум тока через второй должны иметь место при частоте 100 Гц с отклонением 5 Гц. При необходимости регулируют резонансную частоту фильтра воздушным зазором дросселя *L*. При измерениях реле, включенные параллельно элементам фильтра, не отсоединяют.

4. Проверка блока в режиме холостого хода (по схеме рис. 5-61):

а) к зажимам входа подводят трехфазное напряжение, равное 0,5 $U_{вх,н}$, на зажимах выхода (рубильник *S* разомкнут) измеренное выпрямленное напряжение должно быть в пределах 187—195 В;

б) напряжение входа увеличивают до 1,1 $U_{вх,н}$, напряжение выхода должно быть не более 242 В.

Регулировка напряжения выхода блока БПНС-2 производится изменением сопротивлений резисторов *R3* и *R4*, которые подбирают примерно одинаковыми, а также количест-

вом стабилитронов *VD13—VD50* измерительного органа. Уменьшение количества стабилитронов, увеличение *R3* и *R4* приводят к снижению напряжения. Выключаемый из схемы стабилитрон шунтируют перемычкой. При наладке не допускается оставлять менее 17 стабилитронов в плече (тип стабилитрона Д815Б). Не рекомендуется уменьшать R_3, R_4 ниже 150 Ом, так как резисторы могут выйти из строя.

Проверку стабилизирующей способности блока целесообразно начинать при следующих параметрах элементов схемы: $R_3=R_4=250$ Ом (при среднем положении регулировочного хомутика); количество стабилитронов типа Д815Б по 19 в каждом из двух плеч моста.

Исправность стабилитронов проверяют следующим образом. Подают на вход блока трехфазное номинальное напряжение, переключатель *S1* поочередно устанавливают в положения «0» и «+45°». Показания вольтметра *PV* на дверце шкафа должны быть одинаковыми для указанных положений переключателя *S1*. В случае неисправности количество вышедших из строя стабилитронов определяют по формуле

$$n = N - \frac{U_в}{U_{ст}},$$

где $U_в$ — показание вольтметра при положении переключателя *S1* «+45°»; $U_{ст}=6{,}2$ В — напряжение стабилизации стабилитрона Д815Б; N — количество стабилитронов в плече нелинейного элемента (19 или 18).

При трехфазном питании снимают характеристику $I_{упр}=f(U_{вых})$ — зависимость тока управления от напряжения на выходе. Положение характеристики относительно осей координат устанавливают резисторами *R3*, *R4* и количеством включенных стабилитронов, тем самым определяют уровень стабилизированного напряжения на выходе блока.

5. Снимают характеристики $U_{вых}=f(U_{вх})$ при трехфазном питании и $R_{нагр}=\infty$ и при $R_{нагр}=40$ Ом по схеме рис. 5-61 и изменении напряжения входа от 0,5 до 1,1 номинального значения. Прибором ВАФ-85 или токоизмерительными клещами контролируют симметрию токов фаз на входе блока. Характеристики должны находиться в зоне допустимого разброса в соответствии с ТУ 536.448-80.

Длительная нагрузка блока должна быть не более 1000 Вт, а при отключении выключателей не более 2500 Вт. При подсчете нагрузки на один блок в случае действия защит учитывают только те блоки, остаточные напряжения на входах которых одинаковы по значению при рассматриваемом к. з. в сети. При действии АЧР учитывают все блоки БПНС-2, выходы которых включены параллельно.

По снятым кривым $U_{вых}=f(U_{вх})$ определяется напряжение $U_{вх.н.р}$ надежной работы блока при $R_{нагр}=\infty$ и при $R_{нагр}=40$ Ом (см. § 5-12 и рис. 5-67) или при минимальном сопротивлении нагрузки, соответствующем срабатыванию релейной защиты и электромагнитов отключения выключателей.

6. Пределы изменения напряжения выхода проверяют при однофазном питании в соответствии с техническими данными (см. выше) при холостом ходе и нагрузке блока 40 Ом. Напряжение подают на входные зажимы *1* и *2*, а зажимы *2* и *3* перемыкают. Напряжение на выходе блока не должно уходить из диапазона 187—242 В. При подъеме напряжения с нуля отмечают значение $U_{вх}$, при котором срабатывает реле *K1* сигнализации

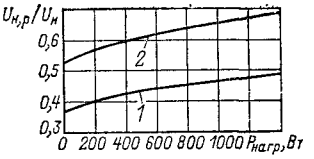


Рис. 5-67. Зависимость напряжения надежной работы блока БПНС-2 от мощности нагрузки при $U_{вых}=0{,}85U_{вых.в}$, трехфазном симметричном питании блока (кривая *1*) и однофазном питании (кривая *2*).

неполнофазного режима. При необходимости определяют напряжения надежной работы блока аналогично испытаниям по п. 5.

7. Проверка действия защиты от обрыва основной обмотки управления магнитного усилителя при симметричном режиме питания блока и нагрузке 80 Ом по схеме рис. 5-61.

Подвижные контакты автотрансформаторов *T1*, *T2*, *T3* (рис. 5-61) устанавливают на нулевую отметку. Закорачивают силовые обмотки магнитного усилителя, для чего устанавливают временные перемычки *A1—X1*, *A2—X2*, *B1—У1*, *B2—У2*; *C1—Z1*, *C2—Z2* (рис. 5-64). При подъеме напряжения трех фаз с нуля определяют напряжение выхода, при котором срабатывает реле *K2*. Резистором *R7* устанавливают значение этого напряжения 250 В. Отключают автомат *SF1* (рис. 5-61) и снимают перемычки, перечисленные выше.

На блок подают номинальное напряжение по схеме рис. 5-61, нажимают на якорь реле *K2*, напряжение и ток выхода должны резко снизиться. Отключают автомат *SF1* (рис. 5-61).

Включают автомат *SF1*. Устанавливают номинальное напряжение входа. Отключением рубильника, заранее введенного в цепь управления, разрывают цепи управления. Должно сработать реле *K2*, напряжение выхода блока должно снизиться до допустимых пределов. Напряжение выхода контролируют по вольтметру *PV*, установленному на дверце шкафа. В случае отказа реле *K2* отключают вручную автомат *SF1* в момент подхода напряжения выхода блока к 255 В. После успешного испытания отключают автомат *SF1*, восстанавливают цепь управления магнитного усилителя.

8. Проверка защиты от перегрузок и коротких замыканий. Собирают цепь, показанную на рис. 5-61 штриховыми линиями. При номинальном трехфазном напряжении на входе включают автомат *SF2*. Время отключения автомата *Q1* блока измеряют электросекундомером типа ПВ-53Л. Опыт к. з. с измерением времени отключения повторяют через 10 мин для проверки стабильности теплового элемента автомата *Q1*.

9. Необходимо измерить сопротивление $R_{пр}$ (Ом на фазу) проводов, соединяющих источник питания (трансформатор напряжения или трансформатор собственных нужд) с блоком БПНС-2. Вычисляется падение напряжения в соединительных проводах, которое должно быть

$$\Delta U = \sqrt{3}\, I_{ф,max} R_{пр} \leqslant 0{,}1 U_н,$$

где $I_{ф,max}$ — ток на входе блока, соответствующий максимальной нагрузке на его выходе при работе релейной защиты и отключении выключателей. Потерю напряжения в соединительных проводах можно определить экспериментально как разность между напряжениями на входе блока при отключенном автомате *Q1* блока и при включенном *Q1* и максимальной нагрузке блока.

10. При наличии сглаживающего фильтра *Z* проверяют коэффициент пульсаций напряжения на выходе фильтра. К выходу фильтра подключают нагрузку 80 Ом. При номинальном напряжении на сопротивлении нагрузки коэффициент пульсаций должен быть

$$k_п = \frac{U_п}{2U_н} 100 \leqslant 3\%,$$

где $U_п$ — размах переменной составляющей напряжения выхода на экране осциллографа.

11. Проверка действия защиты (автоматики) при питании ее оперативным током по постоянной (предусмотренной проектом) схеме от испытуемого блока (блоков) питания, при включении на входы блоков напряжения от постороннего источника с имитацией расчетных режимов работы блоков (см. § 5-13, ниже), а также при питании блоков номинальным напряжением от трансформатора напряжения или трансформатора собственных нужд.

12. Особенности параллельной работы нескольких блоков БПНС-2 и загрузка трансформаторов напряжения. При включении параллельно двух и более блоков БПНС-2 можно регулировкой резисторов *R3*, *R4* (рис. 5-64) изменять степень загрузки каждого блока (увеличение *R3* и *R4* ведет к уменьшению загрузки блока). При наличии блоков БПНС-2, питающихся от трансформаторов собственных нужд и трансформаторов напряжения, целесообразно в нормальном режиме уменьшить нагрузку блоков, питающихся от трансформаторов напряжения, за счет увеличения нагрузки блоков, питающихся от трансформаторов собственных нужд.

Измеряется пофазно ток нагрузки трансформатора напряжения при включенных блоках питания в нормальном режиме. Для трансформатора напряжения НКФ-110 нагрузка должна быть не более 500 В·А на фазу в классе точности 1 и не более 1000 В·А на фазу в классе точности 3.

Схемы включения блоков питания

1. Блок БПНС-2 подключают к цепям трансформатора напряжения или трансформатора собственных нужд (ТСН) шин ВН подстанции.

2. Если блок БПНС-2 подключен, как в первом случае, а со стороны ВН имеются выносные или встроенные в выключатель трансформаторы тока, то к ним подключают блоки БПТ-1002, а выходы блоков БПНС-2 и БПТ-1002 соединяют параллельно.

3. Блок БПНС-2 подключают к цепям трансформатора напряжения или ТСН стороны СН или НН силового трансформатора и блоки БПТ-1002 подключают к трансформаторам тока, встроенным в выводы ВН силового трансформатора.

4. При наличии на подстанции силового трансформатора с расщепленными обмотками блоки БПНС-2 подключают к ТСН каждой расщепленной обмотки.

5. При наличии на подстанции трех трансформаторов собственных нужд к каждому из них подключают один блок БПНС-2. Блоки БПТ-1002 могут отсутствовать.

6. Блоки БПН-1002 во всех перечисленных случаях могут быть использованы для питания менее ответственных устройств, например сигнализации, с целью разгрузки блоков БПНС-2.

7. В случае отсутствия блока БПНС-2 вместо него иногда включают блок БПН-1002, питаемый от двух однофазных стабилизаторов напряжения. В этой схеме при несимметричных повреждениях в сети возможны значительные колебания напряжения на выходе блока. Такая схема не может считаться удовлетворительной.

8. Выходы всех блоков питания объединяют на общих шинах.

9. Для включения блоков питания БПТ-1002 необходимо выделять отдельный комплект трансформаторов тока.

10. При наличии на подстанции защит, содержащих полупроводниковые приборы, электронные лампы, магнитоэлектрические или полупроводниковые реле, питание оперативных цепей этих защит осуществляется от совместно работающих блоков БПНС-2 и БПТ-1002 через сглаживающие фильтры, встроенные в блоки БПНС-2 (рис. 5-64). В указанном фильтре резистор $R_ш$ и диод *VD* необходимы для стабилизации напряжения при переходных процессах.

Поверочный расчет обеспеченности питания оперативного выпрямленного тока

1. Максимальная м. д. с. блока F_{max} не должна превышать значение $F_{доп}$, допустимое по условию ограничения перенапряжений на первичной обмотке блока,

$$F_{max} = \frac{(1 - \Delta f) I_{к,max} k_{сх,бл} w_i}{n_т} \leqslant F_{доп}, \qquad (5\text{-}1)$$

где Δf — погрешность трансформаторов тока, определяемая экспериментально по схеме рис. 5-58 при нагрузке блока $R_{нагр}$ и токе $2I_{вх,н.р}$ (см. § 5-12); $I_{к,max}$—максимальный ток к. з. в месте установки трансформаторов тока; $k_{сх,бл}$ — коэффициент схемы включения блока; $n_т$ — коэффициент трансформации трансформаторов тока; $F_{доп}$=24 750 А для блока БПТ 1002 или $F_{доп}$=40 000 А для блока БПЗ-402;

$$\Delta f = \frac{I'_{вх} - I_{вх}}{I'_{вх}},$$

где $I'_{вх}$, $I_{вх}$ — токи, измеряемые по схеме рис. 5-58.

2. При использовании только блоков тока без блоков напряжения первичный ток надежной работы блока $I_{1н,р}$ должен быть меньше, чем ток двухфазного к. з. в минимальном режиме $I^{(2)}_{к,min}$ в расчетной точке сети (в конце самой длинной отходящей линии или за трансформатором, которые входят в зону защиты, питаемой от блока):

$$k_{отс} I_{1н,р} \leqslant I^{(2)}_{к,min}, \qquad (5\text{-}2)$$

где $k_{отс}=1{,}2$ — коэффициент отстройки. Ток надежной работы блока $I_{1н,р}$ определяется опытным путем (см. § 5-12).

Принимается $k_{сх,бл}=1$, т. е. рассматривается такое сочетание замкнувшихся фаз первичной цепи, при котором обтекается током к. з. один из трансформаторов тока, питающих блок.

Проверяют условие

$$I_{1н,р} \leqslant I^{(2)}_{с.з,min} \qquad (5\text{-}3)$$

где $I_{с.з,min}$ — наименьший первичный ток срабатывания защиты при двухфазном к. з. (защита включена на оперативное напряжение блока питания).

3. При использовании комбинированного блока питания, состоящего из токовых блоков БПТ-1002 и блоков напряжения БПН-1002 или БПНС-2, расчетным видом повреждения для проверки обеспеченности питания оперативных цепей является трехфазное к. з. в минимальном режиме в расчетной точке, при котором напряжение на входе блока напряжения равно нулю. Расчетная точка выбирается в начале наиболее ответственного присоединения, при действии защит которого нагрузка на блоки БПТ-1002 является максимальной, т. е. рассматривается к. з. на шинах НН (СН) подстанции.

Ток надежной работы блока тока $I_{1н,р}$ и напряжение надежной работы блока напряжения $U_{вх,н,р}$ (см. § 5-12—5-15) должны удовлетворять соотношению

$$I_{1н,р} \leqslant I^{(3)}_{к,min}\left(1-\frac{U_{вх,н,р}}{U_н}\right), \qquad (5\text{-}4)$$

где $I^{(3)}_{к,min}$ — ток трехфазного к. з., протекающий в минимальном режиме через трансформаторы тока, питающие блок БПТ-1002; $U_н$ — номинальное напряжение питания блока напряжения. Напряжение $U_{вх,н,р}$ и ток $I_{1н,р}$ определяют опытным путем (§ 5-12 и 5-13).

4. Если условия (5-2) и (5-3) выполнены с большим запасом, целесообразно уменьшить количество включенных в цепь трансформаторов тока первичных витков w_1 блока БПТ-1002, чтобы трансформаторы тока и блок работали в более легких режимах.

5. При использовании блока БПНС-2, подключенного к источнику на шинах ВН подстанции, при отсутствии блоков БПТ-1002 остаточное напряжение на входе блока при трехфазном к. з. на стороне НН или СН трансформатора в минимальном режиме должно быть больше напряжения надежной работы блока

$$\frac{U_{ост,min}}{n_н} \geqslant k_{отс} U_{вх,н,р}, \qquad (5\text{-}5)$$

где $n_н$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения или ТСН; $k_{отс}=1{,}1$ — коэффициент отстройки.

При необходимости проверки до начала наладочных работ обеспеченности питания выпрямленного оперативного тока от блока БПНС-2 вместо выражения (5-5) используют следующее выражение:

$$0{,}9x_{тр,min} \geqslant x_{с(min)}, \qquad (5\text{-}6)$$

где $x_{тр,min}$ — минимальное значение реактивного сопротивления к. з. понижающего трансформатора с регулированием под нагрузкой (РПН); $x_{с(min)}$ — сопротивление энергосистемы в минимальном режиме, приведенное к стороне ВН защищаемого трансформатора.

В расчетах токов к. з. за трансформатором с РПН, выполняемых для проверки обеспеченности питания оперативного тока и поверочных расчетов уставок релейных защит, необходимо учитывать не средние значения сопротивлений к. з. трансформаторов, а сопротивления, соответствующие крайним положениям РПН (в соответствующих режимах), так как максимальное значение сопротивления к. з. трансформатора с РПН отличается от минимального в 1,5—2 раза (§ 5-27); указанные сопротивления определяют по данным завода-изготовителя или опытным путем при воздействии трехфазным напряжением 380 В на сторону ВН и установленной трехфазной закоротке на стороне НН (затем закоротку переносят на сторону СН для трехобмоточных трансформаторов).

Опыт к. з. обычно совмещают с проверкой вторичных цепей трансформаторов тока (§ 5-27).

Обеспеченность питания оперативных цепей только от блока БПНС-2 без блоков тока определяется практической невозможностью трехфазных к. з. на стороне ВН в баке трансформатора (в масле), что подтверждено опытом эксплуатации, а также определяется тем, что оборудование ВН, кроме трансформатора, при отсутствии выключателей ВН и выносных трансформаторов тока ВН не входит в зону защит, которые установлены на подстанции; к. з. стороны ВН такой упрощенной подстанции отключаются защитами питающей линии, а зона защит трансформатора со стороны обмоток ВН ограничивается трансформаторами тока, встроенными в трансформатор.

Во многих случаях питание оперативного выпрямленного тока может быть обеспечено только при наличии одного или нескольких блоков БПНС-2, подключенных к трансформаторам напряжения или ТСН со стороны ВН подстанции.

5-14. БЛОКИ ПИТАНИЯ И ЗАРЯДА БПЗ-401, БПЗ-402 И БЛОКИ КОНДЕНСАТОРОВ БК-400

Технические данные блоков БПЗ-401 и БПЗ-402

Принципиальные электрические схемы блоков показаны на рис. 5-68 и 5-69. Параметры блоков соответствуют табл. 5-23. Ферро-

резонанс наступает при токе $I_{фр}=I_{уст}\pm10$ % (м. д. с. 1020±100 А). Уставки по току феррорезонанса — см. табл. 5.23.

Потребляемая мощность в табл. 5-23 определяется: при номинальном первичном напряжении в блоке БПЗ-401; при первичном токе 1,25 $I_{уст}$ в блоке БПЗ-402.

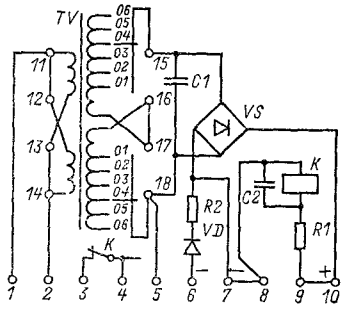


Рис. 5-68. Принципиальная схема блока БПЗ-401.

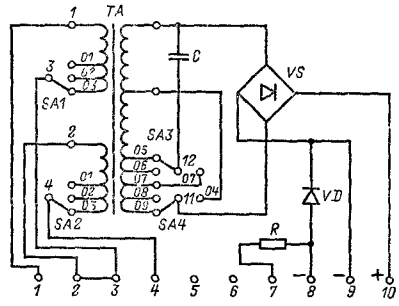


Рис. 5-69. Принципиальная схема блока БПЗ-402.

Выходное напряжение блоков БПЗ-401 (при номинальном входном напряжении) и БПЗ-402 (при токе на входе 1,25 $I_{уст}$):

при отсутствии нагрузки на выходе не более 130 В на уставке $U_{вых,н}=110$ В и не более 260 В на уставке $U_{вых,н}=220$ В;

при минимально допустимом сопротивлении нагрузки (табл. 5-23) не менее 95 В на уставке $U_{вых,н}=110$ В и не менее 190 В на уставке $U_{вых,н}=220$ В.

Блок БПЗ-401 длительно выдерживает при отсутствии нагрузки включение на напряжение, равное 1,1 $U_{вх,н}$.

Блок БПЗ-402 длительно выдерживает:

при холостом ходе до наступления феррорезонанса токи, не превышающие $I_{фр}$, а в режиме феррорезонанса ток, создающий м. д. с. 550 А;

при длительно допустимом сопротивлении нагрузки (табл. 5-23) м. д. с. 550 А.

Поляризованное реле *К* типа РП-7 (рис. 5-68) блока БПЗ-401 имеет разрывную мощность размыкающего контакта в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой (*постоянная времени* не более 0,005 с) не менее 30 Вт при напряжении до 250 В и токе до 1,5 А.

Таблица 5-23

Основные технические данные блоков БПЗ-401 и БПЗ-402

Параметры	БПЗ-401	БПЗ-402
Уставка по току начала феррорезонанса, А	—	4,65; 6,0; 8,5; 9,3; 12; 17
Номинальное входное напряжение, В	100, 110, 127, 220	—
Номинальная частота, Гц	50, 60	50
Номинальное выходное напряжение, В	110, 220	110, 220
Номинальное напряжение заряда конденсатора, В	400±5 %	400±5 %
Время заряда конденсатора емкостью 200 мкФ до напряжения 0,8 установившегося, мс, не более	70	70
Длительно допустимое сопротивление нагрузки (режим блока питания), Ом, при уставке по выходному напряжению:		
110 В	150	130
220 В	600	520
Минимально допустимое сопротивление нагрузки, Ом, при уставке по выходному напряжению:		
110 В	50	50
220 В	200	200
Пятисекундный первичный ток термической стойкости при минимально допустимом сопротивлении нагрузки, А	—	75
Потребляемая мощность, В·А, не более:		
режим блока заряда — на выходе заряженная емкость в установившемся режиме при отсутствии нагрузки;	20	550
режим блока питания при отсутствии нагрузки на выходе·		
уставка по выходному напряжению — 110 В	5	550
уставка по выходному напряжению 220 В	20	550
при длительно допустимой нагрузке	200	550
при максимально допустимой нагрузке	400	550
Максимальная емкость заряженных конденсаторов, мкФ	2000	2000

Примечание. Нагрузка, сопротивление которой является минимально допустимым, подключается к блоку на время, не превышающее 5 с.

Блок БПЗ-401 состоит из промежуточного трансформатора напряжения *TV* с выпрямительным мостом *VS* на выходе. Реле *K* предназначено для сигнализации наличия зарядного напряжения. Конденсатор *C1* защищает диоды от перенапряжений, конденсатор *C2* — для устранения вибрации подвижной системы реле *K*.

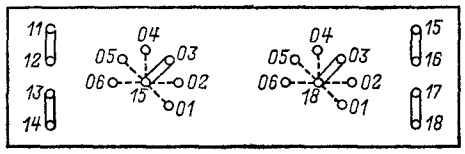


Рис. 5-70. Положение перемычек между зажимами на плите трансформатора *TV* блока БПЗ-401 для включения на входные напряжения: 100 В (*15—06, 18—06*); 105 В (*15—05, 18—05*); 110 В (*15—04, 18—04*); 115 В (*15—03, 18—03*); 121 В (*15—02, 18—02*), 127 В (*15—01, 18—01*). Установлены перемычки *15—16, 17—18* для номинального выходного напряжения 110 В.

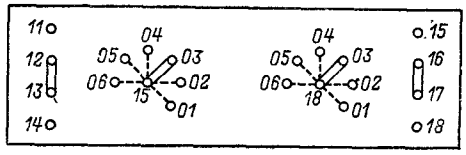


Рис. 5-71. Положение перемычек между зажимами на плите трансформатора *TV* блока БПЗ-401 для включения на входные напряжения: 200 В (*15—06, 18—06*); 210 В (*15—05, 18—05*); 220 В (*15—04, 18—04*); 230 В (*15—03, 18—03*); 242 В (*15—02, 18—02*); 254 В (*15—01, 18—01*). Установлена перемычка *16—17* для номинального выходного напряжения 220 В.

Через диод *VD* и резистор *R2* можно подключать батареи конденсаторов для медленного заряда. Параллельное или последовательное соединение секций обмоток трансформатора *TV* позволяет включать блок на напряжение от 100 до 254 В и получать на выходе напряжение 110 или 220 В (рис. 5-70 и 5-71).

Блок БПЗ-402 состоит из промежуточного насыщающегося трансформатора тока *TA* с выпрямительным мостом *VS* на выходе и имеет феррорезонансную стабилизацию вторичного напряжения. Через резистор *R* можно подключать батареи конденсаторов для медленного заряда. В зависимости от режимов работы блока осуществляют переключения в цепях первичной и вторичной обмоток трансформатора *TA* перемычками на цоколе и плите трансформатора (рис. 5-72 и 5-73).

Переключателями *SA1, SA2* (рис. 5-73) устанавливают ток феррорезонанса в соответствии с табл. 5-24.

Положения переключателя *SA3 07—12, 06—12, 05—12* используют для подрегулировки тока феррорезонанса.

Переключателем *SA4* в положении *04—11* устанавливают напряжение на выходе блока в режиме блока питания 110 В, в положении *07—11* устанавливают напряжение на выходе 220 В.

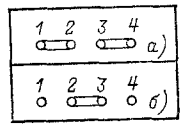


Рис. 5-72. Положение перемычек на цоколе блока БПЗ-402. Уставки по току наступления феррорезонанса.

а — 9,3; 12; 17 А; *б* — 4,65; 6; 8,5 А.

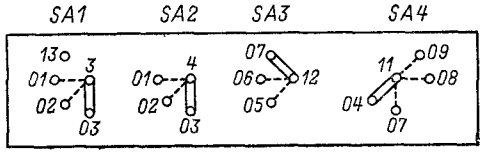


Рис. 5-73. Обозначение зажимов и перемычек на плите трансформатора ТА блока БПЗ-402.

Положения переключателя *SA4 07—11, 08—11, 09—11* используют для подрегулировки напряжения заряда.

С целью предотвращения выхода из строя диодов блоков БПЗ-401, БПЗ-402 и БКЗ-400 рекомендуется постоянное включение цепей выхода блоков БПЗ через резисторы медленного заряда.

Таблица 5-24

Положение переключателей *SA1, SA2* на рис. 5-73 и токи феррорезонанса блока БПЗ-402

Положение переключателя		Количество включенных витков первичной обмотки трансформатора *TA*	Ток феррорезонанса (см. рис. 5-72)
SA1	*SA2*		
3—01	*4—01*	120	8,5 или 17 А
3—02	*4—02*	170	6 или 12 А
3—03	*4—03*	220	4,65 или 9,3 А

При уставке напряжения на выходе 110 В блоки БПЗ-401 и БПЗ-402 не могут выполнять функции блоков заряда.

Технические характеристики устройств БПЗ-401, БПЗ-402 гарантируются при использовании их только в качестве блока питания или только в качестве блока заряда. Одновременное использование БПЗ-401 и БПЗ-402 в качестве зарядного устройства и блока питания возможно при малой нагрузке блока питания, так как напряжение оперативных це-

пей и напряжение заряда конденсатора взаимосвязаны. Следует предусмотреть специальные меры — задержку при возврате выходных реле защиты, включение удерживающих обмоток выходных реле в цепь отключения и удерживающих обмоток выходных реле в цепь включения и другие меры для обеспечения надежной работы защиты при снижении оперативного напряжения во время заряда или разряда конденсаторов.

Наладка блока БПЗ-401

1. Выполняется внешний и внутренний осмотр блока (§ 5-1), измеряется сопротивление изоляции мегаомметром 1000 В при закороченных диодах, конденсаторах, вынутом поляризованном реле. Сопротивление изоляции между токоведущими частями и корпусом блока должно быть не менее 10 МОм.

2. Проверяется реле *К* типа РП-7, для этого питание подают на зажимы *1—2* блока (рис. 5-68), при этом: напряжение срабатывания реле *К* должно быть не выше 0,7 номинального первичного; коэффициент возврата реле не менее 0,25; зазор между контактами реле не менее 0,4 мм.

3. Выпрямленное напряжение блока *UG* проверяется по схеме рис. 5-74 при отсутствии цепей, изображенных штриховыми линиями. Перемычки со стороны входа блока устанавливают в соответствии с номинальным напряжением питания блока на подстанции и ожидаемым уровнем напряжения питания. Перемычки со стороны выхода блока устанавливают в соответствии с предусмотренным проектом номинальным выпрямленным напряжением (рис. 5-70 и 5-71). Блок проверяют на

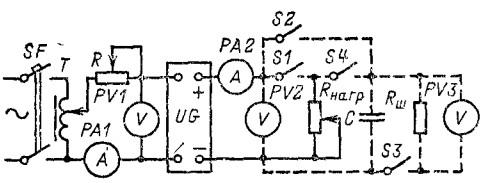


Рис. 5-74. Схема испытаний блока БПЗ-401 (БПЗ-402).

PA1, *PV1* — амперметр и вольтметр электромагнитные; *PV2* — вольтметр магнитоэлектрический; *PV3* — прибор Ц-4312 или Ц-4314; *R* — реостат 30 Ом, 10 А; *T* — автотрансформатор РНО-250-2; $R_{нагр}$ — сопротивление нагрузки (если уставка напряжения выхода 110 В — устанавливают 50 Ом, если уставка 220 В — устанавливают 200 Ом); *C* — блок конденсаторов БК-400; $R_ш$ — резистор 30 кОм.

уставках напряжения на входе, выходе; для этого подают на вход напряжение, номинальное для выбранных ответвлений первичной обмотки трансформатора *TV*. Выходное напряжение при холостом ходе (рубильники *S1*, *S2* отключены) и под нагрузкой (рубильник *S1* включен) должно соответствовать техническим данным (см. выше).

4. Опробуется действие защиты при питании ее оперативным током от блока (см. § 5-13).

Наладка блока БПЗ-402

1. Выполняется внешний и внутренний осмотр блока (§ 5-1). Измеряется сопротивление изоляции токоведущих частей относительно корпуса при закороченном выходе. Сопротивление изоляции должно быть не ниже 10 МОм.

2. Блок БПЗ-402 на уставках по току феррорезонанса 9,3; 12 и 17 А можно включить в цепь трансформаторов тока, отдаваемая мощность которых при двукратном номинальном токе составляет не менее 500 В·А; на уставках 4,65; 6,0 и 8,5 А — в цепь трансформаторов тока типов ТВ-35, ТВД-35 или трансформаторов с аналогичными вольт-амперными характеристиками (см. табл. 5-25).

Таблица 5-25

Выбор параметров блока БПЗ-402

Номинальный ток присоединения, А	Коэффициент трансформации трансформаторов тока	Количество витков первичной обмотки блока
150	150/5	120
200	200/5	170
300	300/5	220

Выбор количества витков первичной обмотки блока БПЗ-402 в общем случае выполняют путем сравнения вольт-амперных характеристик холостого хода блока и трансформатора тока (как для блока БПТ-1002, см. § 5-12). Характеристики холостого хода блока БПЗ-402 даны на рис. 5-75. Кроме того, необходимо проверить, что максимальная м. д. с. блока не превышает допустимой по условию ограничения перенапряжений (см. § 5-13).

3. По схеме рис. 5-74 при отсутствии цепей, изображенных штриховыми линиями (рубильник *S1* отключен), снимают характеристики холостого хода блока $U_{вх}=f(I_{вх})$ и $U_{вых}=f(I_{вх})$ при рабочих уставках w_1 и $U_{вых.н}$. Определяют ток феррорезонанса по резкому возрастанию напряжения и ток надежной ра-

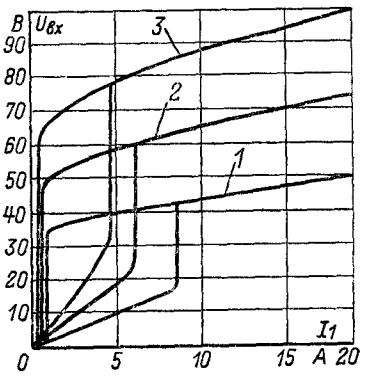


Рис. 5-75. Зависимость напряжения на входе блока БПЗ-402 от первичного тока без нагрузки на выходе.

1 — $w_1=120$ витков; *2* — $w_1=170$ витков; *3* — $w_1=220$ витков.

боты блока при холостом ходе. Характеристику снимают при повышении и понижении напряжения. Если ток феррорезонанса не соответствует установленному количеству витков w_1 и схеме соединения трансформатора *ТА*, перемычку *SA3* (рис. 5-73) переставляют в положение *12—06* или *12—05*. Напряжение на

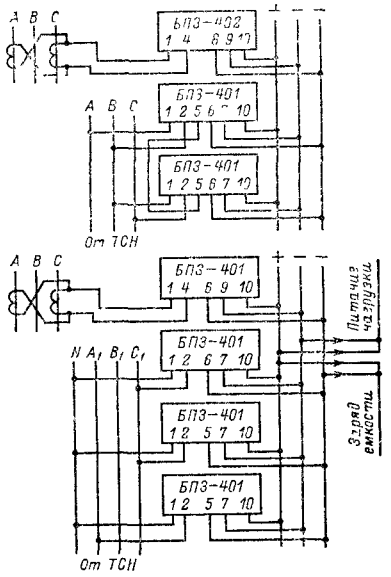


Рис. 5-76. Схемы включения блоков БПЗ-401 и БПЗ-402.

выходе при $I_{вх}=1{,}25I_{уст}$ должно соответствовать техническим данным (см. выше).

4. Характеристику $U_{вых}=f(I_{вх})$ снимают при сопротивлении на выходе блока, соответствующем максимальной расчетной мощности нагрузки. В схеме, аналогичной схеме рис. 5-58, определяют ток $I_{ин,р}$ при указанной нагрузке (рубильник *S1* на рис. 5-74 включен). Напряжение на выходе блока под нагрузкой по значению должно соответствовать техническим данным (см. выше).

5. Действие защиты опробуют при прогрузке блока первичным током (§ 5-12).

6. Блоки питания БПЗ-401 включают на линейное напряжение, если оно не превышает 220 В, или на фазное напряжение при линейном напряжении питающей сети 380 В. Блоки БПЗ-402 включают в цепи трансформаторов тока на стороне ВН силового трансформатора. Схемы включения блоков питания БПЗ-401 и БПЗ-402 даны на рис. 5-76.

Технические данные и наладка блоков конденсаторов серии БК-400

1. Схемы блоков конденсаторов даны на рис. 5-77. Номинальное напряжение конденсаторов 400 В. Номинальная емкость блоков конденсаторов БК-401 — 40, БК-402 — 80, БК-403 — 200 мкФ. Заряжают конденсаторы от зарядного устройства.

2. Блоки конденсаторов должны помещаться вблизи привода выключателя или релейной панели, которые используют энергию разряда. Сопротивление изоляции между жилами кабеля, соединяющего блоки конденсаторов с зарядным устройством и приводом (панелью реле), должно быть не менее 5—7 МОм.

3. Измерение сопротивления изоляции блоков конденсаторов относительно корпуса (при закороченных диодах и конденсаторах) производится мегаомметром 1000 В, проверка изоляции между обкладками конденсаторов — мегаомметром 500 В. По мере заряда конденсаторов показания мегаомметра возрастают. Сопротивление изоляции между обкладками должно быть 5—10 МОм. После замера изоляции конденсатор разряжают закорачиванием его через резистор 5 кОм мощностью около 10 Вт. Неразряженный конденсатор может стать причиной несчастного случая. При разрядке конденсаторов накоротко возможно повреждение изоляции конденсаторов, диодов.

При необходимости определяют емкость конденсаторов методом вольтметра — амперметра при напряжении переменного тока 100 В, 50 Гц по формуле, мкФ,

$$C = \frac{I}{314U}\,10^{-6},$$

где I — ток, А; U — напряжение на конденсаторе, В.

4. Проверка напряжения заряда конденсатора от блока БПЗ-401 или БПЗ-402. В схеме рис. 5-74 отключают рубильники *S1*, *S3*, включают рубильник *S2*, на вход блока БПЗ-401 подают напряжение, которое является номинальным для выбранного ответвления и схемы включения блока. Если заряжают конденсаторы от блока БПЗ 402, на вход блока в схеме рис. 5-74 подают ток, равный $1{,}25\,I_{фр}$. Напря-

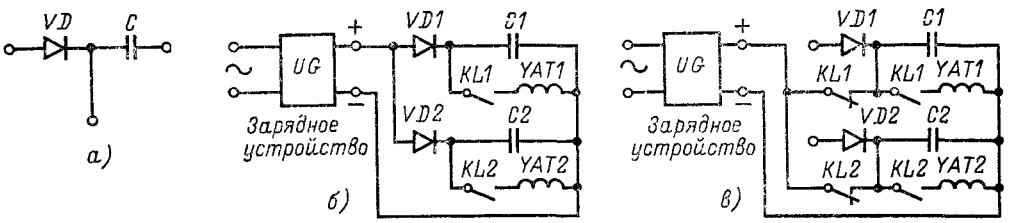


Рис. 5-77. Схемы блоков конденсаторов БК-400.

а — принципиальная схема; *б* — схема с диодным разделением цепей; *в* — схема с контактным разделением цепей; *KL1* и *KL2* — выходные реле защиты; *YAT1*, *YAT2* — электромагниты отключения выключателей.

жение заряда должно быть 400±20 В. Вольтметр *PV2* используют на максимальном пределе. Затем отключают автомат *SF*, включают рубильник *S3* для разряда конденсаторов блока БК-400.

В схеме блока БПЗ-402 перемычку *SA4* (рис. 5-73) устанавливают в любое положение для получения напряжения заряда, наиболее близкого к норме.

5. Определение потребления зарядного устройства по схеме рис. 5-74 (рубильники *S1* и *S3* отключены, *S2* включен) при напряжении $U_{вх, н}$ (БПЗ-401) или токе 1,25 $I_{уст}$ (БПЗ-402). Данные измерений должны соответствовать табл. 5-23.

6. Определение минимального напряжения на входе (БПЗ-401) или минимального тока на входе (БПЗ-402), при которых четко срабатывает реле или электромагнит, питаемый энергией разряда (рубильник *S2* отключен, *S4* включен), выполняют по схеме рис. 5-74.

7. Проверка совместной работы блоков конденсаторов и зарядных устройств в схеме защиты или управления выполняется действием на отключение (включение) выключателя или на включение короткозамыкателя (отключение отделителя).

После каждого испытания разряжают конденсаторы блока БК-400.

5-15. БЛОКИ ПИТАНИЯ СЕРИИ БП-11

Технические данные

Принципиальные схемы блоков даны на рис. 5-78 и 5-79. Основные параметры блоков приведены в табл. 5-26.

Токи $I_{уст}$ наступления феррорезонанса блока БПТ-11 приведены в табл. 5-26 при отсутствии нагрузки на выходе. Отклонения тока феррорезонанса от указанных значений могут быть в пределах ±10 %.

Выходные напряжения блоков в различных режимах работы приведены в табл. 5-27. Для блока БПТ-11 выходные напряжения приведены при токе на входе, равном 1,2 $I_{уст}$, и последовательном соединении первичных обмоток.

Блок БПТ-11 длительно выдерживает на входе ток 9,5 А на уставке «5» при последовательном соединении первичных обмоток, при этом:

а) потребление блока при холостом ходе не превышает 95 В·А;

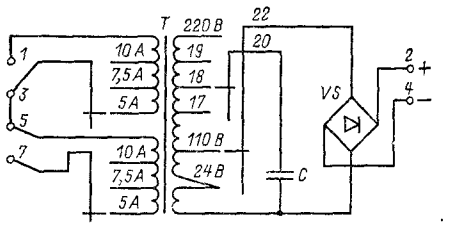


Рис. 5-78. Принципиальная схема блока питания БПТ-11.

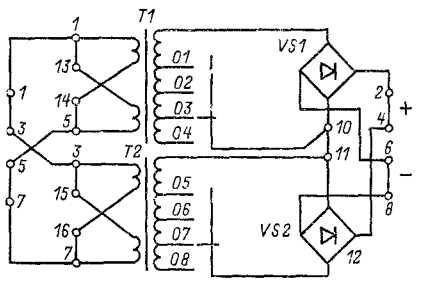


Рис. 5-79. Принципиальная схема блоков питания БПН-11/1 и БПН-11/2.

б) при наличии нагрузки ток на выходе не должен превышать 0,1 А для уставки $U_{вых, н}$ = 220 В; 0,2 А для $U_{вых, н}$ = 110 В; 0,35 А для $U_{вых, н}$ = 24 В.

Блок БПТ-11 выдерживает на входе ток 75 А в течение 5 с на уставке «5» при последовательном соединении первичных обмоток и сопротивлении нагрузки на выходе 800 Ом для уставки $U_{вых, н}$ = 220 В, 200 Ом для $U_{вых, н}$ = 110 В; 10 Ом для $U_{вых, н}$ = 24 В.

Таблица 5-26

Основные параметры блоков питания серии БП

Параметры	Нормы для блоков типа		
	БПН-11/1	БПН-11/2	БПТ-11
Уставки на ток наступления феррорезонанса, А	—	—	5; 7,5; 10* 2,5; 3,75; 5**
Номинальное входное напряжение, В	100, 110, 127, 220	100, 110, 127, 220	—
Номинальная частота, Гц	50, 60	50, 60	50
Номинальное выходное напряжение, В	110	24	220, 110, 24
Потребляемая мощность одного трансформатора при отсутствии нагрузки на выходе не более, В·А, при номинальных входных напряжениях:	—	—	95
100, 110, 220 В	9	9	—
127 В	12	12	—

* При включении одной первичной обмотки.
** При последовательном включении двух первичных обмоток.

Таблица 5-27

Нормируемые выходные напряжения блоков серии БП-11 в различных режимах работы

Тип блока	Схема включения блоков БПН-11/1 и БПН-11/2	Сопротивление нагрузки, Ом	Напряжение на входе по отношению к номинальному	Выходное напряжение при уставке, В		
				110	24	220
БПН-11/1	Параллельная	∞	1,1	Не более 140	—	—
		200	0,85	Не менее 80		
БПН-11/2		∞	1,1	—	Не более 31	—
		10	0,85		Не менее 17,5	
БПН-11/1	Трехфазная	∞	1,1	Не более 125	—	—
		1300	1,1	Не более 120		
		350	0,85	Не менее 100		
БПН-11/2		∞	1,1	—	Не более 32	—
		500	1,1		Не более 30	
		50	0,85		Не менее 24	
БПТ-11	—	∞	—	Не более 118	—	—
		600		Не менее 92		
		∞	—	—	Не более 27	—
		30			Не менее 19	
		∞	—	—	—	Не более 234
		2400				Не менее 186

Вторичная обмотка насыщающегося трансформатора *Т* блока БПТ-11 имеет ответвления на напряжения 24, 110 и 220 В. На первичной обмотке предусмотрены ответвления, соответствующие уставкам по току начала феррорезонанса (рис. 5-78); кроме того, на вторичной обмотке предусмотрены ответвления для компенсации изменения тока начала феррорезонанса в случае изменения емкости конденсатора *С* на ±10 % номинального значения (рис. 5-80).

Схемы включения блоков БПТ-11 приведены на рис. 5-81, характеристики блоков — на рис. 5-82 и 5-83.

Первичные обмотки согласующих трансформаторов *Т1* и *Т2* блоков питания БПН-11/1 и БПН-11/2 состоят из двух секций. Соединяя секции параллельно или последовательно, можно включать блок питания на номинальные входные напряжения 110 (100, 127) и 220 В; соответствующие положения перемычек показаны на рис. 5-84, *а, б*. На рис. 5-84, *в* показаны перемычки для включения блока на входное трехфазное симметричное напряжение 110 В. Схемы включения блоков БПН-11 приведены на рис. 5-85.

В табл. 5-27 даны напряжения блоков БПН-11/1 и БПН-11/2 для параллельной схемы включения элементов блока (рис. 5-85, *б*)

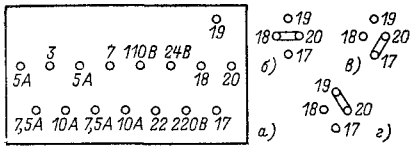


Рис. 5-80. Компенсация изменения тока начала феррорезонанса в блоке БПТ-11.

а — маркировка зажимов плиты трансформатора *Т*; *б* — положение перемычек при токе феррорезонанса, близком к току уставки; *в* — то же при токе, превышающем уставку более чем на 10 %; *г* — то же при токе, меньшем уставки более чем на 10 %.

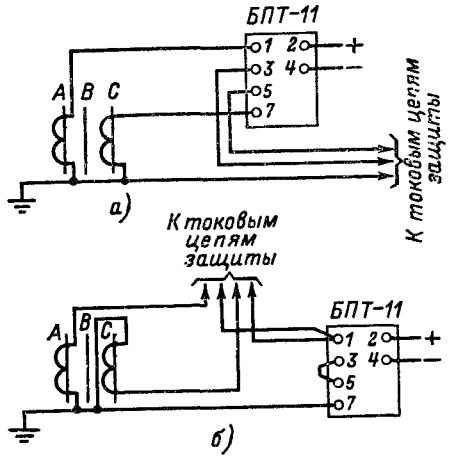


Рис. 5-81. Схемы включения блоков питания БПТ-11.

а — на фазные токи, *б* — на разность токов фаз.

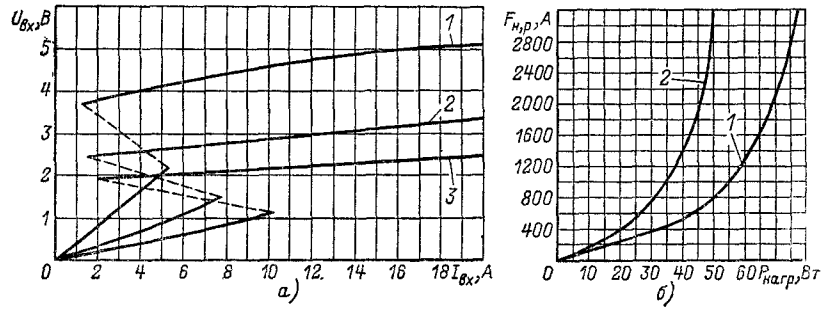


Рис. 5-82. Характеристики блока БПТ-11.

а — вольт-амперная характеристика холостого хода блока при количестве витков: *1* — w_1=45 витков; *2* — w_1=30 витков; *3* — w_1=23 витка; *б* — зависимость м. д. с. надежной работы от мощности нагрузки блока при $U_{вых}$=0,8$U_{вых,н}$ при уставках: *1* — $U_{вых,н}$=24 В; *2* — $U_{вых,н}$=110 В.

и трехфазной схемы включения (рис. 5-85, *г*).

Блоки БПН-11/1 и БПН-11/2 выполнены на номинальные выходные напряжения 110 и 24 В соответственно; блоки длительно выдер-

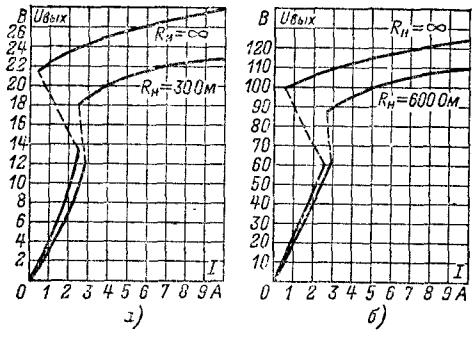


Рис. 5-83. Зависимость выходного напряжения блока БПТ-11 от первичного тока (w_1=2×45 витков последовательно).

а — $U_{вых,н}$=24 В; *б* — $U_{вых,н}$=110 В.

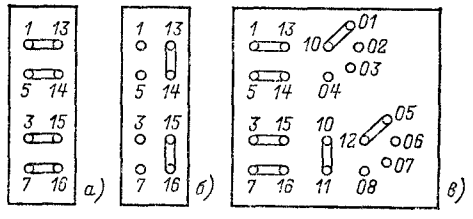


Рис. 5-84. Положение перемычек на плите трансформаторов блоков БПН-11/1 и БПН-11/2 при включении блоков на входное напряжение.

а — на 100, 110, 127 В; *б* — на 220 В; *в* — на трехфазное напряжение 110 В.

живают напряжение на входе 1,1 $U_{вх,н}$, при этом длительно допустимый ток на выходе не должен превышать: 0,15 А для блока БПН-11/1 и 0,5 А для блока БПН-11/2. При последова-

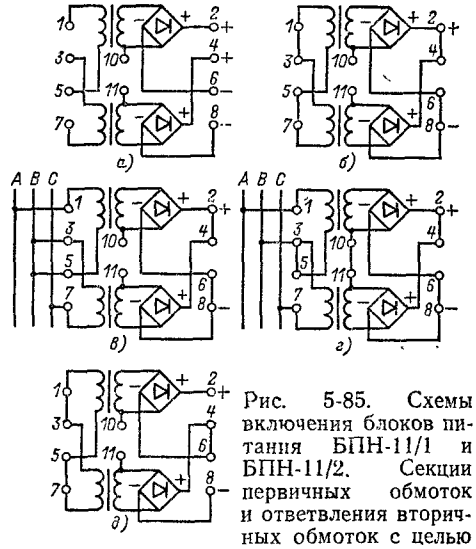


Рис. 5-85. Схемы включения блоков питания БПН-11/1 и БПН-11/2. Секции первичных обмоток и ответвления вторичных обмоток с целью упрощения не показаны.

а — с раздельным включением элементов; *б* — с параллельным включением элементов на стороне переменного и выпрямленного напряжения; *в* — с включением на два линейных напряжения; *г* — с включением по трехфазной выпрямительной схеме; *д* — с последовательным включением элементов для получения выходного напряжения 48 или 220 В.

тельном соединении выпрямителей (рис. 5-85, *д*) допустимые токи уменьшаются в 2 раза.

Наладка блока БПТ-11

1. Выполняется внешний и внутренний осмотр блока (§ 5-1). Измеряется сопротивление изоляции цепей относительно корпуса мегаомметром 1000 В при закороченных диодах и конденсаторе. Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

2. Уставку $I_{уст}$ (табл. 5-26) выбирают по условию

$$I_{уст} < I_{с.з,min},$$

где $I_{с.з,min}$ — наименьший ток срабатывания защиты, питаемой оперативным током от блока БПТ-11.

3. По схеме рис. 5-74 (рубильник *S1* отключен) при отсутствии цепей, изображенных штриховыми линиями, на выбранных уставках $I_{уст}$, $U_{вых.н}$ снимают характеристику холостого хода блока $U_{вх} = f(I_{вх})$ и $U_{вых} = f(I_{вх})$. Определяют ток феррорезонанса по резкому возрастанию напряжения. При необходимости корректируют ток феррорезонанса (рис. 5-80). Полученную характеристику сравнивают с заводской (рис. 5-82, *а*). Определяют ток надежной работы блока при холостом ходе (см. табл. 5-26).

4. Характеристику $U_{вых} = f(I_{вх})$ снимают при сопротивлении на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки (в схеме рис. 5-74 рубильник *S1* включен), определяют ток надежной работы блока. Напряжение на выходе блока должно соответствовать данным табл. 5-27.

5. Действие защиты опробуют при испытании первичным или вторичным током.

Наладка блока БПН-11

1. Выполняется внешний и внутренний осмотр блока (§ 5-1). Измеряют сопротивление изоляции мегаомметром 1000 В при закороченном выходе блока; оно должно быть не менее 10 МОм.

2. Выпрямленное напряжение блока проверяется при заданных уставках $U_{вых.н}$ и $U_{вх.н}$ и заданной схеме питания (однофазной или трехфазной). В первом случае используют схему, аналогичную схеме рис. 5-74; цепи, изображенные штриховыми линиями, отсутствуют. Во втором случае используют схему, аналогичную схеме рис. 5-61.

Определяют напряжение надежной работы блока при холостом ходе и максимальной возможной в схеме защиты нагрузке выхода (см. § 5-12). Напряжения на выходе должны соответствовать данным табл. 5-27.

3. Действие защиты опробуется при питании ее оперативным током от блока.

5-16. РЕЛЕ ПОНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ РЧ-1 И РЕЛЕ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ РЧ-2

Технические данные

Принципиальная схема реле РЧ-1 приведена на рис. 5-86, схема реле РЧ-2 — на рис. 5-87. В зависимости от источника оперативного тока необходимо устанавливать перемычки X5 и X6 между зажимами, как указано на цоколе реле, т. е.: *9—10* при номинальном напряжении постоянного оперативного тока 220 В; *10—11* при номинальном напряжении оперативного постоянного тока 110 В; *10—11—12* при оперативном переменном токе, номинальное напряжение которого 100, 127 или 220 В, питание реле РЧ через устройство ВУ-3 по рис. 5-88.

Принципиальная схема вспомогательного устройства типа ВУ-3 приведена на рис. 5-88, *б*. Подбор витков дросселя выполняют на заводе-изготовителе таким образом, чтобы резонансная частота цепи *LC* для включения реле РЧ-1 равнялась 47,5 Гц при напряжении на выходе ВУ-3 35—40 В, а для питания реле РЧ-2 — 52,5 Гц.

Основные технические данные реле РЧ-1 и РЧ-2 приведены в табл. 5-28 и 5-29. Номинальное напряжение контролируемой сети переменного тока 100 В.

Реле обеспечивает возможность изменения уставок на частоту срабатывания и возврата ступенями в 1 Гц и плавно в пределах каждой ступени.

Реле РЧ-1 имеет три уставки времени срабатывания 0,15; 0,3 и 0,5 с (в зависимости от емкости включаемых конденсаторов *6С*, *7С*,

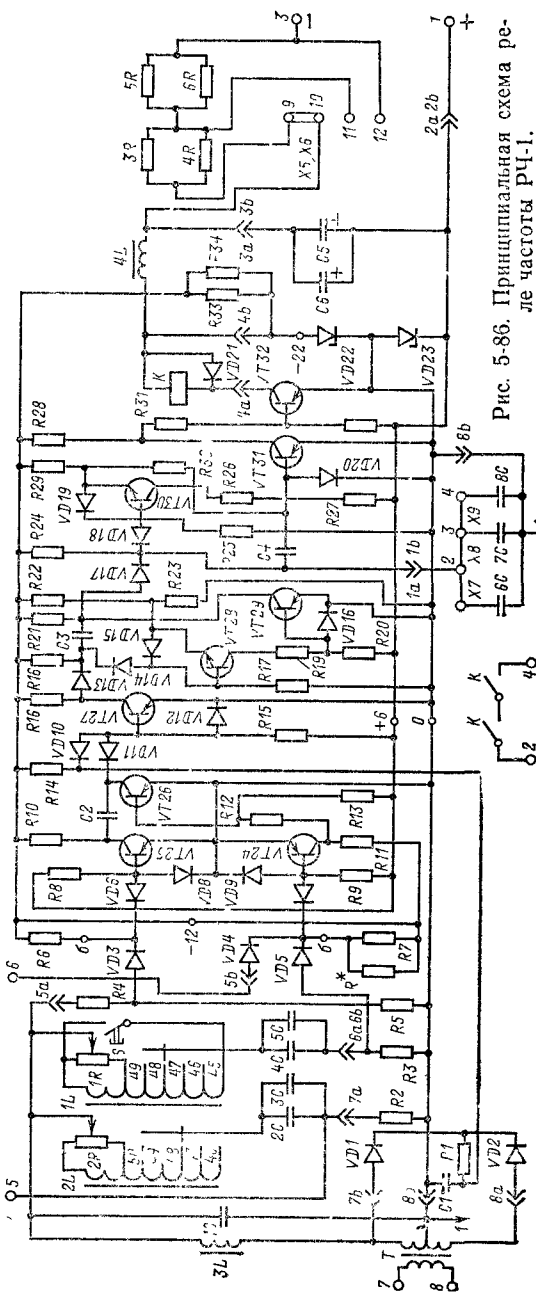


Рис. 5-86. Принципиальная схема реле частоты РЧ-1.

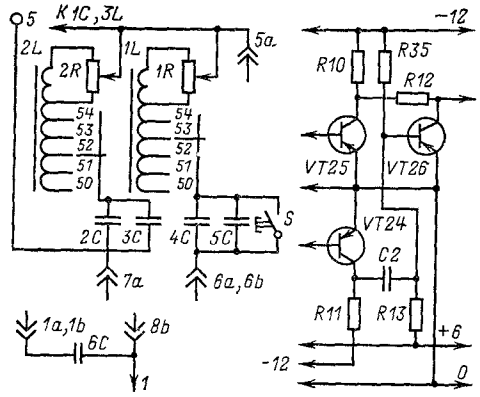


Рис 5-87. Принципиальная схема реле частоты РЧ-2 (в частях, отличающихся от РЧ-1).

Потребляемая мощность реле и устройств при номинальных напряжениях: измерительной цепью не более 5 В·А; цепью питания оперативного постоянного тока не более 20 Вт (при $U_н$ = 220 В) или 10 Вт (при $U_н$ = 110 В); цепью оперативного переменного тока ВУ-3 при подключенном к ВУ-3 реле РЧ-1 (РЧ-2) не более 15 В·А; той же схемой, т. е. ВУ-3 с реле РЧ, но при подключении параллельно входу ВУ-3 измерительной цепи реле РЧ не более 15 В·А.

Отключающая способность двух последовательно соединенных контактов выходного реле *К* при напряжении не выше 250 В: в цепи постоянного тока (с постоянной времени цепи не более 0,005 с) не менее 60 Вт; в цепи переменного тока (при коэффициенте мощности цепи не менее 0,5) не менее 300 В·А. Предельный ток отключения не менее 2 А, включения — не менее 5 А.

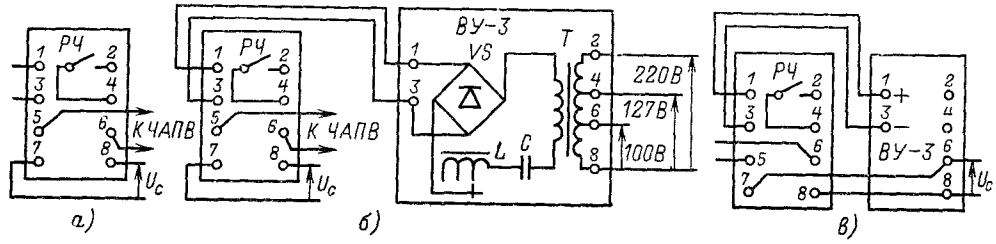


Рис. 5-88. Схемы включения реле РЧ-1 (РЧ-2) и устройства ВУ-3.

а — при питании оперативным постоянным током; *б* — при питании оперативным переменным током; *в* — при наличии только одного переменного напряжения контролируемой сети; U_c — напряжение контролируемой сети.

8С — рис. 5-86). Время срабатывания реле РЧ-2 не более 0,1 с. Время возврата реле РЧ-1 и РЧ-2 не более 0,15 с.

Разность между частотой срабатывания реле и частотой возврата не более 0,05 Гц на любой уставке (при отключенной от зажимов *5—6* внешней цепи возврата на рис. 5-86).

При изменении температуры окружающего воздуха от —40 до +40 °С, при номинальных значениях напряжений контролируемой сети и оперативного тока частота срабатывания реле изменяется на 0,35 Гц.

Таблица 5-28

Номинальные данные реле РЧ-1 и РЧ-2

Тип реле	Номинальная частота сети, Гц	Уставки частоты срабатывания f_1, Гц	Уставки частоты возврата f_2, Гц	Номинальное напряжение оперативного тока, В	
				постоянного	переменного
РЧ-1	50 60	50—45 60—55	46—51 56—61	220, 110	100, 127, 220
РЧ-2	50 60	50—55 60—65	55—50 65—60		

Таблица 5-29

Отклонение частоты срабатывания реле РЧ-1 и РЧ-2 от уставки при одновременном изменении напряжений контролируемой сети и вспомогательных цепей реле

Тип реле	Род тока питания вспомогательных цепей реле	Колебания напряжения относительно номинального		Отклонение частоты срабатывания не более, Гц
		контролируемой сети	оперативного тока	
РЧ-1	Постоянный	0,4—1,3 0,2—1,3	0,8—1,1	0,2 0,3
	Переменный	0,4—1,3 0,2—1,3	0,4—1,3	0,2 0,3
РЧ-2	Постоянный	0,6—1,5 0,45—1,5 0,2—1,5	0,8—1,1	0,2 0,3 0,4
	Переменный	0,6—1,5 0,45—1,5 0,2—1,5	0,4—1,3	0,2 0,3 0,4

Примечание. Частота срабатывания реле типа РЧ-1 с уменьшением напряжения контролируемой сети увеличивается, а реле типа РЧ-2 — уменьшается.

Цепи переменного тока реле частоты и устройства ВУ-3 выдерживают без повреждения в течение 10 с напряжение 1,5 $U_н$.

Цепи постоянного тока реле и цепи переменного тока реле и устройства ВУ-3 выдерживают длительно напряжение 1,1 $U_н$.

Указания по проверке и регулировке реле

1. Выполняется внешний осмотр реле в соответствии с § 5-1.

2. Проверка состояния изоляции. Временными перемычками соединяют между собой зажимы *1, 3, 2, 4* реле; зажимы *5, 6* и выводы переключателей уставок (рис. 5-86). Перемычками с зажимами «крокодил» шунтируют конденсаторы *2С—3С*; *4С—5С*; *6С—8С*. Вынимают плату полупроводниковых приборов. Мегаомметром 1000 В измеряют сопротивление изоляции относительно земли: цепей напряжения (зажим *7*), цепей постоянного оперативного тока (зажим *1*), вторичных цепей напряжения (переключатель уставок), конденсаторов *6С—8С*. Затем измеряют сопротивление изоляции между цепями: зажим *7* — зажим *1*, зажим *7* — переключатель уставок.

Устанавливают плату полупроводниковых приборов. Измеряют сопротивление изоляции: зажим *7* — земля, зажим *1* — земля, зажим *7* — зажим *1*. Снимают перемычку *2—3*. Проверяют сопротивление изоляции между контактами реле и цепями оперативного тока.

Снимают все временные перемычки.

3. Проверку и регулировку контактной системы выходного промежуточного реле *К* типа РП-220 выполняют в соответствии с § 5-11.

4. Проверка напряжения срабатывания и возврата реле *К* по схеме рис. 5-7, *в*. Плату с полупроводниковыми элементами вынимают из разъема. Напряжение подают непосредственно на обмотку реле, используя провода с зажимами «крокодил». Напряжение срабатывания должно быть 12,5—14 В, напряжение возврата — не менее 1,5 В. Плату устанавливают на место.

5. Проверка цепей питания. При включении реле в соответствии с проектом по одной из схем рис. 5-88 при номинальном напряжении питания напряжение между точками схемы реле должно быть:

8в—2а	4,8—6,4 В
4а—4в	18,7—24,3 В
8в÷—12	11,5—12,5 В

Если используется схема рис. 5-88, *б* или 5-88, *в*, указанные выше напряжения должны иметь место также и при напряжениях на входе ВУ-3, равных 0,4 $U_н$ и 1,3 $U_н$.

Напряжение между точками *8b÷—12* устанавливают путем регулировки резистора *R33*. Внутреннее сопротивление вольтметра, применяемого для измерений, должно быть не менее 50 кОм. В случае значительных отклонений измеренных напряжений от нормы следует проверить исправность резисторов *3R, 4R, 5R, 6R, R33, R34*, диода *VD21*, стабилитронов *VD22, VD23*, конденсаторов *С5, С6* (рис. 5-86).

6. Проверка работоспособности полупроводниковой части схемы (рис. 5-86). На реле частоты подают номинальное напряжение оперативного тока и переменное напряжение 100 В, 50 Гц (зажимы *7—8*). При нажатии кнопки *S* выходное реле *К* должно сработать, напряжение на обмотке реле *К* при этом 19—25 В.

Если реле *К* не срабатывает или напряжение на обмотке *К* ниже указанного, необходимо (при напряжении на входе 100 В, 50 Гц) измерить электронным вольтметром напряжения указанных ниже точек схемы реле (рис. 5-86) относительно нулевой шины, значения которых (с точностью до 20 %) должны быть: *7а*—38 В, *8а*—41 В, *7b*—37,5 В; *5а*—66 В, *6а*—36 В, переключатель уставок в измерительной цепи возврата и в цепи срабатывания 110 В.

7. Настройка реле на рабочие уставки по частоте срабатывания.

а) Проверяют ширину ступени плавного изменения уставок по частоте. На зажимы *7—8* реле подают переменное напряжение 100 В от генератора технической частоты (ГТЧ). Измерительная цепь возврата реле отключена (зажимы *5—6* разомкнуты). Перемычки, определяющие выдержку времени срабатывания, устанавливают в положение минимальной уставки. Переключателями ступенчатого изменения уставок по частоте и потенциометрами плавного изменения уставок устанавливают: для реле РЧ-1 45 Гц — срабатывание и 51 Гц — возврат, для РЧ-2 55 Гц и 50 Гц соответственно. При этом рукоятки потенциометров находятся: для реле РЧ-1 *R1* — в крайнем левом положении, *R2* — в крайнем правом положении; для реле РЧ-2 *R1* — в крайнем правом положении, *R2* — в крайнем левом положении. Реле должно сработать при изменении частоты ГТЧ в соответствии с выполненными уставками срабатывания и возврата (последнее — при перемкнутых зажимах *5—6*). Поворачивают рукоятки потенциометров реле в противоположные положения до упора. Разность между частотой срабатывания (или возврата) реле частоты при крайних положениях потенциометров должна быть не менее 1 Гц.

б) Проверяют пригодность ГТЧ для настройки реле частоты. Измеряют частоту срабатывания реле при прямом и обратном подключении проводов от ГТЧ к зажимам *7* и *8* реле на любой уставке. Если разность измеренных частот срабатывания превышает 0,05 Гц, ГТЧ следует отрегулировать или заменить.

в) Переключателями ступенчатого изменения уставок и потенциометрами устанавливают заданные уставки срабатывания и возврата (последнее — при закороченных зажимах *5—6* реле частоты). С помощью ГТЧ устанавливают частоту, соответствующую заданной уставке. Плавным поворотом соответствующего потенциометра добиваются срабатывания (возврата) реле. Выполняют многократную проверку частоты настройки реле путем медленного изменения частоты ГТЧ. Уставку реле по частоте можно при необходимости подрегулировать шунтами дросселей *1L* (срабатывание), *2L* (возврат). После окон-

чания настройки положение движка резистора *1R (2R)* фиксируют стопорной гайкой и вновь проверяют частоту срабатывания (возврата).

г) Проверяют отклонение частоты срабатывания реле от уставки при сочетаниях крайних значений напряжения контролируемой сети и напряжения оперативного тока, указанных в табл. 5-29, при питании реле оперативным током по одной из схем рис. 5-88 в соответствии с проектом устройства автоматики, в котором используется реле частоты. В случае необходимости регулируют резистор *R**, который с помощью лепестков на обратной стороне платы печатного монтажа может быть припаян параллельно резистору *R6* или *R7*. Напряжение более 1,1 $U_н$ подают кратковременно.

8. Время срабатывания реле РЧ-1 определяют с момента подачи на реле напряжения переменного тока 100 В с частотой, отличной не менее чем на 0,1 Гц от частоты уставки, до момента замыкания цепи на зажимах реле *2—4*. Измерения выполняют на заданной уставке по частоте.

Определение времени срабатывания реле РЧ-2 производят при поданном на реле напряжении частотой на 0,1 Гц ниже частоты срабатывания реле. Параллельно конденсаторам измерительного контура *4C, 5C* подключают дополнительную емкость 2500—3000 пФ, снижающую частоту срабатывания реле на 0,3 Гц. Время между моментом подключения емкости и моментом срабатывания реле является временем работы реле.

Время срабатывания должно быть для реле РЧ-1 на первой уставке не более 0,15, на второй уставке 0,23—0,3, на третьей уставке 0,4—0,5 с; для реле РЧ-2 — не более 0,1 с.

9. Время возврата реле определяют с момента сброса (резко до нуля) напряжения переменного тока до момента разрыва цепи на зажимах *2—4*.

10. Проверка работы контактов реле на нагрузку. Контакты реле включают в схему автоматики, в которой реле используется. Плавным изменением частоты добиваются многократного срабатывания и возврата реле. Следует убедиться в отсутствии сильного искрения на контактах проверяемого реле и в надежной работе других реле, подключенных через контакт проверяемого реле частоты.

11. Проверка поведения реле при подаче и снятии переменного напряжения при включенном напряжении оперативного тока. Устанавливают переменное напряжение 100 В, частота которого на 0,1—0,15 Гц выше (для реле РЧ-1) или ниже (для РЧ-2) уставки срабатывания. Снятие переменного напряжения производят размыканием и закорачиванием цепей напряжения на входе реле (несколько раз каждым способом). Во избежание повреждения ГТЧ замыкают цепи кратковременно, последовательно с ГТЧ включают резистор 1000—1500 Ом. При подаче и снятии переменного напряжения реле не должно срабатывать.

12. Проверка поведения реле при подаче и снятии напряжения оперативного тока при включенном переменном напряжении 100 В, частота которого установлена, как указано в предыдущем пункте. Несколько раз подают и снимают напряжение оперативного тока. Реле не должно срабатывать.

13. Проверка поведения реле при подаче и снятии одновременно переменного напряжения и напряжения переменного оперативного тока (для реле с ВУ-3).

На зажимы *7—8* подают напряжение 100 В (рис. 5-86). Частоту его устанавливают, как и в предыдущем пункте. Номинальное напряжение переменного оперативного тока подводят от постороннего источника. При достаточной мощности ГТЧ напряжение оперативного тока следует подавать от этого генератора. Переменное напряжение и напряжение оперативного тока включают одним рубильником (автоматом). При подаче и снятии напряжения реле не должно срабатывать.

14. Повторный осмотр реле. Проверяют положение перемычек и переключателей уставок.

Реле закрывают кожухом и пломбируют.

15. Действие автоматики, в которой используется реле частоты, опробуют при питании реле частоты от ГТЧ.

5-17. РЕЛЕ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РТЗ-51 И РТЗ-50

Назначение, принцип действия реле РТЗ-51, основные технические данные

Реле тока с повышенной чувствительностью типа РТЗ-51 предназначены для использования в качестве органов, реагирующих на ток нулевой последовательности в схемах защит от замыканий на землю генераторов, электродвигателей и линий в сетях с малыми токами замыкания на землю.

Схема реле (рис. 5-89, *а*) состоит из воспринимающей, преобразующей, сравнивающей частей и исполнительного органа. Воспринимающая часть — трансформатор тока *TA1*, нагруженный на резисторы *R2—R7*, которые служат для дискретной регулировки уставки тока срабатывания. Преобразующая часть представляет собой настроенный на номинальную частоту сети 50 Гц (или 60 Гц) активный фильтр, выполненный на операционном усилителе *A1*. Сравнивающая часть реле состоит из порогового элемента, выполненного на операционном усилителе *A2*, времяизмерительной цепи (*VD5, R15, R16, C8*) и триггера Шмитта, построенного на операционном усилителе *A3*. При поданном на реле напряжении питания, когда воздействующая величина превышает порог срабатывания элемента *A2*, конденсатор *C8* заряжается или разряжается в зависимости от полярности выходного сигнала элемента *A2*; постоянные времени заряда и разряда выбираются такими, чтобы схема срабатывала при определенном значении входного сигнала. Если соотношение интервалов времени, в течение которых входная воздействующая величина больше или меньше установленного порога, превышает заданное значение, конденсатор *C8* заряжается до уровня, достаточного для срабатывания триггера. При этом открывается транзистор *VT1* и срабатывает испол-

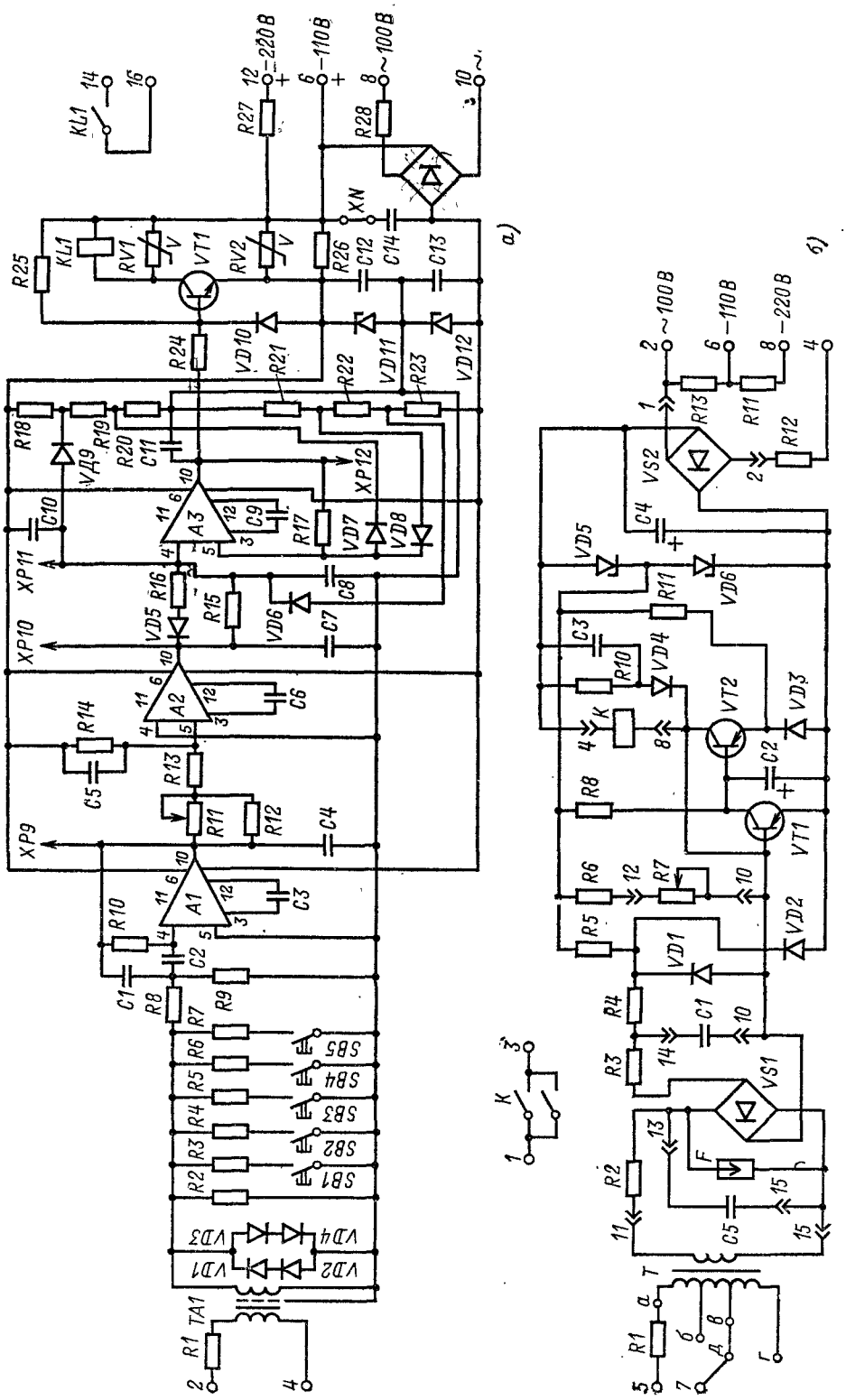


Рис. 5-89. Принципиальная схема реле тока нулевой последовательности.
а — РТЗ-51; *б* — РТЗ-50.

Таблица 5-30

Основные технические данные реле

Параметры	РТЗ-51	РТЗ-50
Пределы уставок, А	0,02—0,12	0,01—0,06
Номинальная частота, Гц	50 или 60	50
Средняя основная погрешность, %	10	10
Разброс тока срабатывания, %	3	4
Коэффициент возврата не ниже	0,93	0,9
Кратность увеличения тока срабатывания относительно измеренного при частоте 50 Гц:		
при 150 Гц	4	2
при 400 Гц	15	6
Время срабатывания при $2I_{ср}$, с	0,06	0,1
Время возврата при сбросе тока на выходе с $(1,1 \div 10)I_{ср}$ до нуля, с	0,05	0,06
Износостойкость, количество циклов:		
механическая	10^4	—
электрическая	10^3	—
Потребляемая мощность питания:		
на постоянном токе, Вт	10	10
на переменном токе, В·А	5	5
Масса реле, кг	1,3	2,5

Таблица 5-31

Дополнительные погрешности тока срабатывания реле

Погрешности	Значение погрешности, %, для реле	
	РТЗ-51	РТЗ-50
От изменения температуры от —40 до +55 °С (относительно тока срабатывания, измеренного при температуре 20±5 °С)	12	—
От изменения температуры от —40 до +40 °С (относительно тока срабатывания, измеренного при температуре 20±5 °С)	—	10
От изменения напряжения питания в диапазоне $(0,8 \div 1,1)U_н$ (относительно тока срабатывания, измеренного при $U_н$)	8	8
От изменения частоты на ±3 Гц (относительно тока срабатывания, измеренного при номинальной частоте)	10	7

нительный орган — реле *KL1*. Для питания операционных усилителей в схеме реле применен параметрический стабилизатор, состоящий из резистора *R26*, стабилитронов *VD11*, *VD12* и обеспечивающий напряжение ±15 В.

В табл. 5-30 и 5-31 приведены технические данные реле РТЗ-51 и РТЗ-50 (рис. 5-89, *б*).

Реле РТЗ-51 и РТЗ-50 длительно выдерживают напряжение 1,1 $U_н$ в цепи питания; в цепи тока выдерживают ток 0,11 А длительно и 60 А в течение 1 с.

Коммутационная способность контактов: реле РТЗ-51, как у реле РВ-01 (§ 5-8), реле РТЗ-50, как у реле РЧ-1 (§ 5-16).

Проверка и регулировка реле РТЗ-51 и РТЗ-50

1. Внешний и внутренний осмотр выполняют в соответствии с § 5-1. Трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП), в цепь которого включено реле, проверяют в полном объеме (см. разд. 4).

2. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром 1000 В. Перемычкой соединяют между собой входные зажимы реле, второй перемычкой соединяют между собой все остальные зажимы. При вынутом блоке полупроводниковых приборов измеряют сопротивление изоляции цепей входа и прочих цепей относительно корпуса и между собой.

Снимают перемычку между цепями контактов реле и цепями оперативного тока («+» и «—» оперативного тока остаются перемкнутыми), измеряют сопротивление изоляции между ними. Вставляют блок полупроводниковых приборов, повторяют измерения сопротивлений изоляции. Во всех случаях сопротивление изоляции должно быть не ниже 10 МОм. Снимают временные перемычки.

3. Проверку и регулировку исполнительного органа — реле *K* типа РП-220 для реле РТЗ-50 производят в соответствии с § 5-11. При вынутом блоке полупроводниковых приборов ток на обмотку *K* подают через контакты разъема по схеме, аналогичной рис. 5-7, *в*, ток в реле измеряют миллиамперметром. Ток срабатывания реле *K* должен быть 8,3± ±0,4 мА, коэффициент возврата не менее 0,2.

Исполнительный орган — реле *KL1* в схеме реле РТЗ-51 должен срабатывать при напряжении не более 45 В.

4. По схеме, аналогичной рис. 5-7, *в*, при поданном на реле номинальном напряжении оперативного тока проверяют ток срабатывания реле РТЗ-50 в начале и конце шкалы на каждом из трех диапазонов уставок, а для реле РТЗ-51 — ток срабатывания на каждой из шести уставок. Погрешности, разбросы, коэффициенты возврата должны соответствовать техническим данным реле.

В схему рис. 5-7, *в* включают миллиамперметр (Ц-4311, Ц-4312 и т. п.) без трансформатора тока. Сопротивление реостата *R*, введенное в цепь при измерениях, должно быть не менее 1,5 кОм; *T2* — трансформатор типа ОСО-0,25 с коэффициентом трансформации 220/36.

При необходимости производят подрегулировку тока срабатывания реле РТЗ-51 под-

строечным резистором *R11*. Положение переключателей *SB1—SB5* на схеме рис. 5-89 соответствует минимальной уставке по току срабатывания. Перемычка *XN* реле РТЗ-51 должна быть замкнута только в случае питания схемы реле от источника переменного напряжения.

Для удобства контроля состояния схемы РТЗ-51 на печатной плате расположены контрольные точки *XP9—XP12*, выполненные в виде контактных площадок.

5. Рабочую уставку срабатывания защиты с реле РТЗ-51, РТЗ-50 по первичному току выполняют в схеме с ТТНП, для чего ток подают в окно магнитопровода ТТНП от нагрузочного устройства (§ 5-25). При напряжениях оперативного тока $U_н$ и 0,8 $U_н$ определяют первичный ток срабатывания защиты и коэффициент возврата по первичному току.

6. Действие защиты опробуют на сигнал (или на отключение).

5-18. УСТРОЙСТВО СИГНАЛИЗАЦИИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ УСЗ-2/2

Технические данные

Принципиальная схема УСЗ-2/2 дана на рис. 5-90.

Ток срабатывания устройства для каждой частоты по табл. 5-32 при номинальном напряжении питания и температуре окружающей среды +20 °С, при сопротивлении проводов между трансформатором тока нулевой последовательности и устройством не более 1 Ом соответствует значениям, приведенным в табл. 5-32, с допустимым отклонением ±30 % (для диапазона частот от 150 до 650 Гц).

Устройство фиксирует однофазные замыкания длительностью не менее 40 мс при пятикратном токе срабатывания.

Номинальное напряжение питания цепей постоянного тока устройства $U_н$ = 110 В (от аккумуляторной батареи или блока питания). Потребление мощности в цепи постоянного тока при $U_н$ = 110 В в нормальном режиме не превышает 2,5 Вт. При изменении напряжения питания на ±20 % номинального значения изменение тока срабатывания не выходит за пределы ±25 % относительно значений, измеренных при $U_н$ = 110 В на частотах 150—650 Гц.

При изменении температуры окружающего воздуха от —20 до +40 °С изменение тока срабатывания устройств на частоте 250 Гц не выходит за пределы +20÷—25 % относительно значений, измеренных при температуре +20 °С и $U_н$ = 110 В.

Таблица 5-32

Значения токов первичной цепи ТТНП типа ТЗЛ, соответствующих срабатыванию устройства УСЗ-2/2, подключенного ко вторичной обмотке ТЗЛ

Уставка, А	Ток срабатывания, А, при частоте						
	50 Гц	150 Гц	250 Гц	350 Гц	550 Гц	650 Гц	2000 Гц
25	⩾5	1,74	0,95	0,61	0,48	0,57	⩾2
50	⩾10	2,8	1,4	0,85	0,73	0,98	⩾3,2
100	⩾20	5,1	2,5	1,35	1,47	2,05	⩾6,5
250	⩾50	10,4	4,85	2,44	3,4	4,95	⩾16

Примечания: 1. Обозначение уставки 25, 50, 100 или 250 А указывает, что данная уставка соответствует суммарному емкостному току сети 25, 50, 100 или 250 А соответственно.

2. Если сопротивление проводов, соединяющих УСЗ-2/2 с ТТНП, более 0,5 Ом, указанные провода подключают к зажимам *7—13*; если сопротивление проводов менее 0,5 Ом, провода подключают к зажимам *7—3* УСЗ-2/2.

Устройство при напряжении питания 110 В термически стойко:

а) при токе 43 А в течение 1 с, 30 А в течение 2 с, что примерно соответствует расчетному синусоидальному току в первичной обмотке ТЗЛ, нагруженного устройством УСЗ-2/2, равному 20 кА, в течение 1 с при суммарном сопротивлении соединительных проводов и добавочного резистора, равном 0,7 Ом и выше; 15 кА в течение 1 с при суммарном сопротивлении 0,5 Ом; 10 кА в течение 2 с при суммарном сопротивлении 0,5 Ом;

б) длительно при первичном токе ТТНП $3I_0$ = 30 А.

Коммутационная способность контактов исполнительного органа — реле *К* типа РП-220 приведена в табл. 5-17. Контакты реле *К* способны пропустить ток 10 А в течение 10 с.

Указания по проверке УСЗ-2/2

1. Внешний и внутренний осмотр реле выполняют в соответствии с § 5-1.

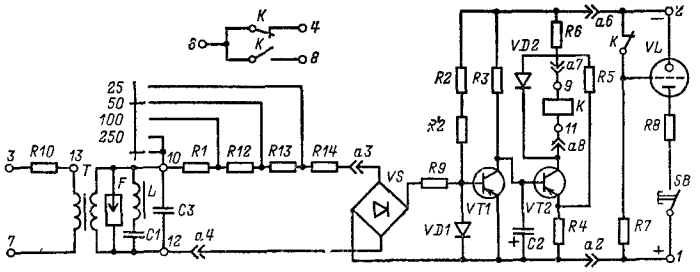


Рис. 5-90. Принципиальная схема устройства УСЗ-2/2.

2. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром 1000 В. Временными перемычками попарно соединяют между собой зажимы реле *1—2, 3—7*, а также перемычкой — зажимы *2—4—6—8*. При вынутом блоке полупроводниковых приборов измеряют сопротивление изоляции цепей переменного тока (зажим *3*) и цепей постоянного тока (зажим *1*) относительно корпуса и между собой. Снимают перемычку *2—6* между контактами реле и цепями оперативного тока, измеряют сопротивление изоляции между ними. Вставляют блок полупроводниковых приборов, повторяют измерения сопротивления изоляции. Во всех случаях

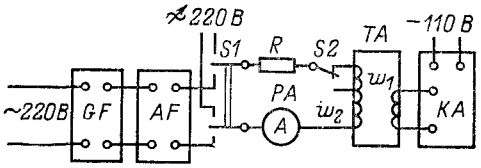


Рис. 5-91. Схема проверки устройства УСЗ-2/2.

GF — звуковой генератор; *AF* — усилитель; *TA* — трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП); *KA* — устройство УСЗ-2/2; *PA* — амперметр электромагнитный; w_1=5 витков; w_2=15 витков.

сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм. Снимают все временные перемычки.

3. Проверку и регулировку исполнительного органа — реле *K* типа РП-220 производят в соответствии с § 5-11. При вынутом блоке полупроводниковых приборов ток на обмотку *K* подают через контакты *7* и *8* разъема. Ток срабатывания реле *K* должен быть 9—10 мА, коэффициент возврата не менее 0,2.

Проверку реле *K* ведут по схеме, аналогичной рис. 5-7, *в*; в цепь обмотки *K* включают последовательно миллиамперметр.

4. ТТНП, в цепь которого включено УСЗ-2/2, проверяют в полном объеме (разд. 4).

5. При проверке защиты с реле УСЗ-2/2 первичным током по схеме рис. 5-91 при включенном напряжении питания $U_н$ = 110 В снимают зависимость тока срабатывания, протекающего по первичной цепи ТТНП, от частоты на уставке 25 А и на рабочей уставке. Отклонение замеров от данных табл. 5-32 должно быть в пределах допусков, указанных выше. При этом вторичные цепи ТТНП подключают к зажимам *3—7* УСЗ-2/2, если проверка ведется в лабораторных условиях.

После срабатывания реле *K* тиратрон *VL* должен зажечься, гореть после возврата реле *K* и погаснуть после квитирования кнопкой *SB*, находящейся в кожухе устройства.

При недостаточной мощности генератора (усилителя) допускается проверять ток срабатывания не при всех значениях частоты, указанных в табл. 5-32.

6. Проверка влияния колебаний напряжения питания на первичный ток срабатывания. Для исправного реле значения токов срабатывания $3I_0$ при напряжении питания $0{,}8\,U_н$ = =88 В и $1{,}2\,U_н$=132 В на уставке 25 А отличаются от токов срабатывания, приведенных в табл. 5-32, измеренных при номинальном напряжении питания и соответствующих значениях частот, не более чем на ±25 %. Рубильником *S1* в схеме рис. 5-91 можно подключить первичную цепь ТТНП к сети 50 Гц или источнику токов повышенной частоты; для расширения пределов измерения амперметра *PA* рубильник *S2* переводят в нужное положение.

7. Действие защиты с реле УСЗ-2/2 опробуют на отключение выключателя или на сигнал. При этом УСЗ-2/2 подключают, как указано в примечании 2 к табл. 5-32.

Для получения необходимой чувствительности устройства УСЗ-2/2 при использовании транзисторов с различными значениями коэффициента усиления необходимо индивидуально подбирать сопротивление резистора *R'2* (рис. 5-90) в пределах 50—300 кОм; эту операцию производят на уставке 25 А, пропуская по первичной цепи ТТНП ток частотой 150 Гц с последующей проверкой токами на частотах 350 и 650 Гц по схеме рис. 5-91.

5-19. ЗАЩИТА ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ ЗЗП-1

Технические данные

Принципиальная схема защиты ЗЗП-1 приведена на рис. 5-92.

Ток срабатывания $I_{с.з}$ при температуре окружающей среды +20 °С и номинальных значениях переменного $3U_0$ и постоянного $U_н$ напряжения и угле максимальной чувствительности между напряжением и током на входе устройства находится в пределах 0,07 А± ±30 % на уставке *1*; 0,5 А±30 % на уставке *2*; 2 А±30 % на уставке *3*.

Шкала уставок действительна при включении ЗЗП-1 с трансформатором тока нулевой последовательности типа ТЗЛ.

При изменении температуры окружающей среды от —40 до +40 °С ток срабатывания защиты отличается от тока срабатывания при +20 °С не более чем в 2 раза, а переменное напряжение срабатывания защиты при двукратных токах срабатывания на всех уставках, при угле максимальной чувствительности находится в пределах 20—40 В; номинальное значение переменного напряжения 100 В.

Зона срабатывания защиты при $3U_0$ = = 100 В, номинальном постоянном напряжении $U_н$ = 26 В на уставке *1* при токе $3I_0 \geqslant 0{,}2$ А, на уставках *2* и *3* при двукратных токах срабатывания находится в пределах $180°^{+20°}_{-25°}$.

Угол максимальной чувствительности защиты $\varphi_{м.ч}$ при тех же условиях равен на уставке *1* $90°^{+40°}_{-10°}$; на уставках *2* и *3* $90°^{+20°}_{-30°}$.

Степень отстройки схемы защиты от третьей гармоники тока нулевой последовательности на уставке *2* при токе $3I_0 = 0{,}1 \div$ $\div 1$ А должна быть не менее 3; она определяется как отношение напряжения на первичной обмотке трансформатора *T3* фазочувствительного усилителя при частоте 50 Гц к напряжению при частоте третьей гармоники.

Время срабатывания защиты при $3U_0$= = 100 В, номинальном напряжении постоянного тока, двукратном токе срабатывания, при уг-

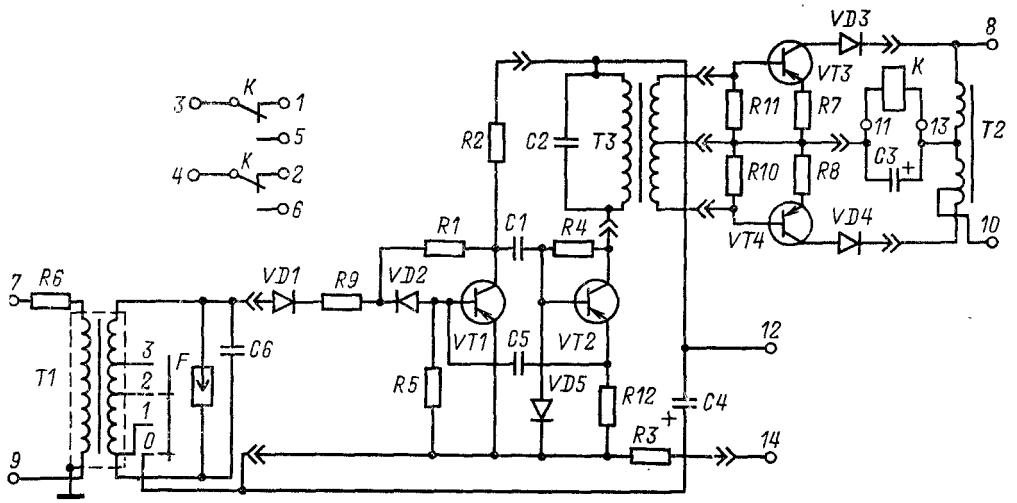


Рис. 5-92. Принципиальная схема защиты ЗЗП-1.

ле между током $3I_0$ и напряжением $3U_0$, равном 90°, не более 0,045 с.

Номинальное напряжение питания цепей постоянного тока $U_н$=26 В. Питание цепей постоянного тока может производиться от блока питания, например типа БПН-11, включенного по схеме с трехфазным напряжением без сглаживания, или от аккумуляторной батареи напряжением 24 В.

При изменении напряжения постоянного тока на ±20 % номинального ток срабатывания защиты изменяется не более чем на ±20 % тока срабатывания, измеренного при $U_н$=26 В.

Потребление мощности в цепи постоянного тока при $U_н$=26 В, $3U_0$=$3I_0$=0 не более 0,15 Вт.

Потребление мощности в цепи напряжения нулевой последовательности при $3U_0$= =100 В и $3I_0$=0 не более 3 В·А.

Потребление мощности, измеренное на зажимах цепи тока ЗЗП-1 при токе $3I_0$=2 А на уставке *3* не более 0,01 В·А.

Защита не срабатывает при $3U_0$=50 В, $3I_0$=0 и питании цепей постоянного тока от блока питания, включенного по схеме двухфазного выпрямления с напряжением на выходе блока, равным $0{,}65U_н$ (наихудшие условия для защиты, установленной на неповрежденном присоединении с питанием от блока питания при двойном замыкании на землю).

Защита термически стойка:

а) при токе 42 А в течение 1 с, 30 А в течение 2 с, что примерно соответствует расчетному синусоидальному току в первичной обмотке ТЗЛ, нагруженного защитой ЗЗП-1, равному 20 кА, в течение 1 с при сопротивлении соединительных проводов 0,2 Ом и выше; 15 кА в течение 1 с при сопротивлении соединительных проводов, равном нулю; 10 кА в течение 2 с при сопротивлении соединительных проводов, равном нулю;

б) длительно при первичном токе ТТНП $3I_0$=20 А и напряжении постоянного тока $1{,}2U_н$=31,2 В или при $3U_0$=100 В и напряжении постоянного тока 31,2 В.

Коммутационная способность контактов исполнительного органа — реле *К* типа РП-220 приведена в табл. 5-17. Контакты реле *К* способны пропустить ток 10 А в течение 10 с.

Указания по проверке и настройке защиты ЗЗП-1

1. Внешний и внутренний осмотр выполняют в соответствии с § 5-1.

2. Сопротивление изоляции измеряют мегаомметром 1000 В. Временными перемычками попарно соединяют между собой зажимы *7—9*, *12—14*, перемычкой соединяют группу зажимов *8—10—11—13*, другой перемычкой соединяют группу зажимов *1—2—3—4—5—6*. При вынутом блоке полупроводниковых приборов измеряют сопротивление изоляции между цепями и цепей относительно корпуса. Вставляют блок полупроводниковых приборов, повторяют измерения сопротивления изоляции. Во всех случаях сопротивление изоляции должно быть не ниже 10 МОм. Снимают временные перемычки.

3. Проверка и регулировка исполнительного органа — реле *К* типа РП-220 в соответствии с § 5-11. При вынутом съемном блоке и отключенном конденсаторе *С3* по схеме рис. 5-7, *в* подают напряжение на обмотку реле *К* через зажимы *11*, *13*. Напряжение срабатывания реле $U_{ср}$ должно быть 16,8±0,8 В, коэффициент возврата не менее 0,2. Время срабатывания не более 0,025 с при $2U_{ср}$.

4. Определение напряжения на обмотке реле *К* при подаче напряжения в цепи напряжения нулевой последовательности. Плавно поднимают напряжение $3U_0$ от 0 до 100 В при отсутствии тока в первичной цепи ТТНП и снятом напряжении питания. Постоянная составляющая напряжения на зажимах *11—13* не должна превышать ±2 В. При бо́льших значениях следует проверить триоды *VT3* и *VT4*, диоды *VD3* и *VD4*. Не допускается подавать напряжение более 115 В во избежание повреждения триодов.

5. Проверка характеристик защиты ЗЗП-1 совместно с ТТНП по схеме рис. 5-93 при напряжении питания $U_н$=26 В (в ячейке или в лаборатории). Предварительно необходимо проверить ТТНП в полном объеме (разд. 4).

а) С целью исключения возможного остаточного намагничивания сердечника ТТНП плавно увеличивают первичный ток ТТНП до 9 А и затем плавно снижают ток до нуля (повторяют 2—3 раза).

б) Прогревают защиту подачей номинального напряжения питания в течение 15 мин.

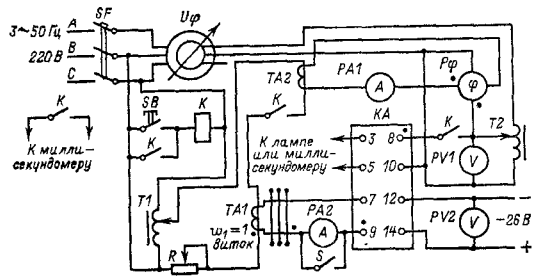


Рис. 5-93. Схема проверки защиты ЗЗП-1.

K — реле РП-25; *T1*, *T2* — автотрансформаторы РНО-250-2; *TA1* — трансформатор тока нулевой последовательности; *TA2* — трансформатор тока И-54; *PV2* — магнитоэлектрический вольтметр; *PA2* — миллиамперметр; *KA* — защита ЗЗП-1; *Uф* — фазорегулятор.

в) Проверяют зону действия, определяют угол максимальной чувствительности и однополярные зажимы ЗЗП-1 при напряжении $3U_0$=100 В, при токе $3I_0$=0,2 А для уставки *1*, при токе $3I_0$=1 А для уставки *2*, при токе $3I_0$=4 А для уставки *3*. Фазорегулятором изменяют угол сдвига между током и напряжением от 0 до 360°, затем от 360° до 0 (при обратном вращении фазорегулятора). Измеряют углы φ_1 и φ_2, при которых реле *K* замыкает контакт. Вычисляют угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ как полусумму углов φ_1 и φ_2 (§ 5-7) для каждой уставки по току $3I_0$. Угол $\varphi_{м.ч}$ и зона срабатывания должны соответствовать техническим данным защиты, приведенным выше. В этом случае цепи тока и напряжения ЗЗП-1 включены согласованно с обмотками фазометра, исходя из чего определяют однополярные зажимы защиты.

г) При $\varphi_{м.ч}$ и значениях $3U_0$, равного 100, 80, 60, 40 и 33 В, для каждой уставки дважды определяют ток $3I_0$ срабатывания защиты: при замкнутом и разомкнутом рубильнике *S*.

В последнем случае записывают вторичный ток I_2, соответствующий моменту срабатывания реле *K* (рис. 5-93).

д) При $\varphi_{м.ч}$ и токе 0,2 А для уставки *1*, двукратном токе срабатывания для уставок *2* и *3* определяют напряжение срабатывания $3U_0$.

6. На уставке *2* измерение тока срабатывания защиты при $3U_0$=100 В, $\varphi_{м.ч}$ и напряжениях постоянного тока $0{,}8U_н$=20,8 В и $1{,}2U_н$=31,2 В.

7. Измерение времени срабатывания защиты при $\varphi_{м.ч}$, $3U_0$=100 В, $U_н$=26 В и токе 0,2 А для уставки *1*, двукратном токе срабатывания для уставок *2*, *3*. Должно быть $t_{ср} \leqslant$ ⩽0,045 с.

8. Проверка реле напряжения РН-53/60Д в соответствии с § 5-2. Настройка устройства ВУ-1 на частоту резонанса 50±2,5 Гц при токе 250 мА по схеме рис. 5-66, *а* изменением воздушного зазора дросселя *L*. При постоянном по значению напряжении на выходе звукового генератора (или ГТЧ) резонансу соответствует максимум тока в цепи фильтра. В режиме резонанса напряжение на фильтре

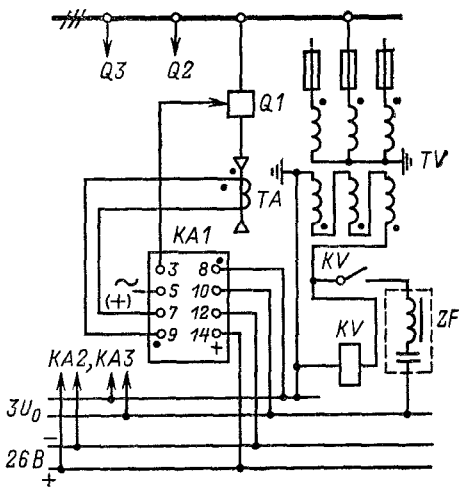


Рис. 5-94. Схема включения комплектов защиты ЗЗП-1.

Q1 — выключатель; *TV* — трансформатор напряжения; *TA* — ТТНП, *KV* — реле РН-53/60Д; *ZF* — устройство ВУ-1; *KA* — защита ЗЗП-1.

LC не более 15 В. Длительно допустимый ток ВУ-1 равен 100 мА.

9. Защиту включают по схеме рис. 5-94. Через одно устройство ВУ-1 питают не более 10 комплектов ЗЗП-1. Реле напряжения РН-53/60Д создает задержку подачи напряжения на защиту, достаточную для предотвращения повреждения триодов *VT3*, *VT4* (рис. 5-92) волновыми перенапряжениями в момент возникновения замыкания на землю в защищаемой сети. Если сопротивление цепей тока превышает 0,3 Ом, шунтируют резистор *R6* схемы ЗЗП-1 проводом сечением не менее 0,35 мм^2.

10. Действие защиты ЗЗП-1 опробуют на отключение, на сигнал.

11. Проверяют направленность защиты (§ 5-26).

12. Проверяют помехозащищенность ТТНП, цепей тока и комплектов защиты. Устанавливают уставку *1*, подают напряжение питания $U_н$=26 В и напряжение 100 В, 50 Гц на вход $3U_0$ от постороннего источника с фазорегулятором. При максимальной нагрузке защищаемого присоединения измеряют напряжение на обмотке реле *K* (зажимы *11*, *13*) вольтметром с внутренним сопротивлением не менее 5 кОм/В. Измеряемое напряжение должно быть не более 5 В при изменении фазы напряжения $3U_0$ от 0 до 360°. Поочередным отключением внешних цепей ЗЗП-1 находят источник помехи.

На уставке *2* наведенное напряжение не должно превышать 3 В. Требования к монтажу защиты ЗЗП-1 и способы снижения влияния помех изложены в § 5-25.

5-20. РЕЛЕ ГАЗОВОЕ РГЧЗ-66

Технические данные

Общий вид реле показан на рис. 5-95. Реле имеет три элемента. Верхний — сигнальный, выполненный в виде чашки *1*, срабатывает при понижении уровня масла, обусловленном заполнением реле газом или воздухом в объеме примерно 400 см^3, а также при утечке масла.

Нижних отключающих элемента два: первый выполнен в виде чашки *2* и срабатывает практически при полном исчезновении масла из реле, а второй скоростной элемент выполнен в виде пластины *3* и срабатывает при возникновении потока масла от трансформатора к расширителю с определенной скоростью. Скоростной элемент имеет три сменные пластины, калиброванные по скорости потока масла, с уставками 0,6; 0,9 и 1,2 м/с, которые поставляются вместе с реле, причем пластина для уставки 0,6 м/с установлена внутри реле.

Время срабатывания скоростного элемента при скорости потока масла 1,25 уставки не превышает 0,1 с (допустимое время 0,2 с).

Контакты реле рассчитаны на замыкание и размыкание цепи переменного и постоянного тока до 0,2 А при напряжении 220 В.

Проверка реле

1. При внешнем осмотре реле проверяются целостность корпуса, плотность крепления: крана на крышке реле, проходных втулок, пробки в нижней части корпуса — по отсутствию течи масла. Проверяют целостность смотровых стекол и проходных изоляторов, наличие и состояние прокладок между фланцами реле и трубопроводом, наличие прокладки под крышкой газового реле, под крышкой коробки зажимов. Убеждаются в том, что прокладки не снижают сечения трубопровода.

2. При внутреннем осмотре выемной части реле тщательно проверяется надежность крепления всех элементов: чашек, пластины скоростного элемента, упоров, ограничивающих ход чашек, экранов, контактных пластин токоподводов и их крепления к выводам и контактам, пластин (предотвращающих повреждение чашек при вибрации реле), надежность заделки концов спиральной пружины в держателях для исключения самопроизвольного выскакивания, наличие пружинящих шайб у всех винтов и гаек. Проверяют: параллельность пластин неподвижных контактов и расположение их в одной плоскости, соблюдение расстояния между подвижными и неподвижными контактами 2—2,5 мм; надежность запрессовки оси чашки вместе со стойкой вдоль оси; люфты всех осей реле, продольные люфты не должны превышать 0,5 мм, а поперечные люфты должны практически отсутствовать, легкость хода и отсутствие заедания движущихся частей реле; эту проверку производят нажатием рукой на соответствующие элементы реле; при проверке срабатывания только пластины придерживают чашку рукой в верхнем положении, а затем нажатием рукой на пластину проверяют ее свободный ход, замыкание и размыкание контактов. Причиной, препятствующей свободному перемещению пластины до замыкания подвижного контакта с неподвижным, может быть недостаточный зазор между рычагом и дном чашки. В этом случае следует несколько выгнуть рычаг вверх. При нажатии рукой на чашку нижнего элемента проверяют легкость хода чашки, но при этом будет отклоняться и пластина. Легкость хода верхней чашки также проверяют нажатием на нее рукой вниз и вверх. При проверке элементов реле от руки одновременно проверяется совместный ход контактов (2 мм), при этом подвижные контакты должны скользить по середине пластины неподвижных контактов. После осмотра необходимо тщательно промыть выемную часть чистым трансформаторным маслом.

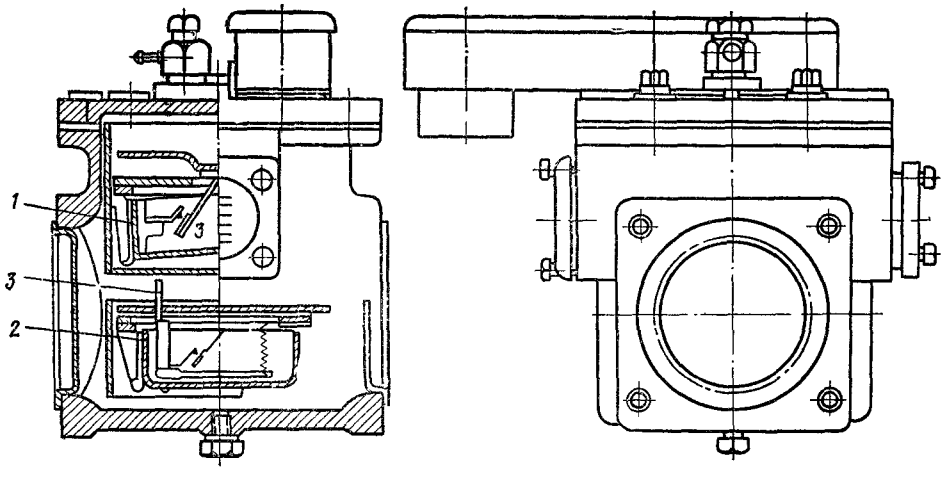


Рис. 5-95. Реле газовое РГЧЗ-66.

Таблица 5-33

Уставки отключающего элемента газового реле РГЧЗ-66

Мощность трансформатора	Вид охлаждения	Уставка отключающего элемента реле, м/с
До 40 МВ·А включительно	М и Д	0,6
Свыше 40 МВ·А	Д	0,9
Независимо от мощности	Ц и ДЦ	1,2

Примечание. М — естественное масляное; Д — масляное с естественной циркуляцией масла; Ц — масляно-водяное с принудительной циркуляцией масла; ДЦ — масляное с дутьем и принудительной циркуляцией масла.

3. Выемную часть реле вместе с крышкой устанавливают на горизонтальной плоскости. Затем заполняют нижнюю чашку реле трансформаторным маслом и с помощью пружинного граммометра (со шкалой до 0,5 Н), конец которого подводят под край дна чашки с той стороны, где установлена спиральная пружина, приподнимают чашку до размыкания контактов. *При этом усилие по граммометру* должно быть 0,25—0,3 Н, совместный ход контактов 2—2,5 мм (с начала движения до момента размыкания).

4. Элементы реле проверяют на срабатывание при скоплении определенного объема газа в верхней части реле (сигнальный элемент) и при полном исчезновении масла из реле (отключающий элемент). Эту проверку производят, как правило, в собственном корпусе реле. На боковые фланцы корпуса реле ставят заглушки и в залитый маслом корпус вставляют выемную часть реле. При этом крышку реле устанавливают на прокладку для подъема выемной части реле на толщину этой прокладки. Открывают кран на крышке реле для доступа воздуха, а через нижнюю пробку медленно сливают масло.

На сигнальные контакты включают индикатор срабатывания, сигнализирующий замыкание контактов. Объем воздуха (примерно 400 см^3), при котором срабатывает сигнальный элемент реле, контролируют по шкале смотрового стекла. Затем индикатор срабатывания подключают к контактам отключающего элемента и уровень масла понижают до срабатывания элемента.

5. При настройке отключающих элементов газовых реле необходимо выполнение следующих требований:

а) отключающий элемент должен быть установлен на срабатывание по скорости потока масла в соответствии с табл. 5-33;

б) нижний элемент реле (чашка), срабатывающий при понижении уровня масла (например, течь масла из трансформатора), включают в работу с действием на отключение на всех трансформаторах.

Проверка газовой защиты

1. Производят проверку выполнения требований к монтажу защиты. На трансформаторах, снабженных газовым реле, крышка трансформатора должна иметь подъем по направлению к реле на 1—1,5 %, а маслопровод к расширителю — на 2—4 %. Значение подъема проверяют по уровню.

Провода и контрольные кабели, присоединяемые к газовому реле, должны иметь маслостойкую изоляцию, а трубы, в которых проложены контрольные кабели, должны быть защищены от попадания в них влаги.

2. Проверку изоляции цепей защиты производят в собранной схеме мегаомметром 1000 В. Измерения производят между жилами контрольного кабеля, цепями газовой защиты и корпусом трансформатора.

После проверки изоляции производят испытание электрической прочности изоляции цепей газовой защиты в полностью собранной схеме относительно корпуса трансформатора напряжением 1000 В, частотой 50 Гц, приложенным в течение 1 мин.

3. Действие защиты проверяют на сигнал и отключение поочередным замыканием выводов контактов реле или опробуют реле специальным устройством на срабатывание при $U_н$ и $0{,}8U_н$ источника оперативного тока. При этом схема должна четко работать и защита *должна отключать выключатели* трансформатора и подавать сигнал.

4. Проверка защиты нагнетанием воздуха в реле является заключительным этапом в проверке реле. Собирают полностью схему защиты, на реле подают оперативный ток; через кран в газовое реле медленно подают воздух из баллона или с помощью автомобильного насоса. При этом начинает снижаться уровень масла в реле, и когда он достигнет красной черты, газовая защита должна сработать на сигнал. При дальнейшей медленной подаче воздуха в реле проверяют, чтобы защита не действовала на отключение, а воздух проходил в расширитель. Прохождение воздуха в расширитель определяют по характерному шуму. Затем выпускают воздух из газового реле и вновь подают его (воздух подают интенсивно и резко). Защита должна срабатывать на отключение.

Если защита не срабатывает, необходимо закрыть кран в маслопроводе между реле и расширителем и после подачи воздуха в реле открыть кран, что вызывает срабатывание защиты на отключение.

5. Проверку реле на несрабатывание производят при 5-6-кратном пуске и остановке циркуляционных насосов и вентиляторов системы охлаждения. Проверяют, не срабатывает ли газовая защита от включения насосов и от вибраций, вызванных включением вентиляторов.

Проверяют, не срабатывает ли газовая защита при различных переключениях вентилей в системе маслопроводов.

Б. ПРОВЕРКА И НАЛАДКА УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

5-21. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ, ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА МОНТАЖА, ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ, ПРОВЕРКА ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ

1. Подготовительные работы выполняют в соответствии с разд. 2. Необходимо изучить проект электроустановки, а именно: пояснительную записку, комплект принципиальных и монтажных схем, заводские инструкции по электрооборудованию и чертежи панелей и щитов, кабельные журналы, план размещения электрооборудования и другие материалы. Изучают технологические и электрические параметры и режимы работы электрооборудования.

2. Выполняют анализ проекта. Проверяется соответствие предусмотренных проектом типов устройств защиты, управления, автоматики, сигнализации нормальным и аварийным режимам работы электрооборудования, надежность источников оперативного тока.

На основании задания на уставки составляется карта уставок защит и автоматики, выполняется поверочный расчет уставок.

Проверяются схемы соединения, коэффициенты трансформации, нагрузки трансформаторов тока и напряжения, расстановка элементов заземления, чувствительность защитных устройств трансформаторов напряжения.

Проверяется (предварительно) работа устройств по принципиальным схемам с целью устранения ложных цепей или случаев неправильной работы.

В цепях сигнализации проверяют значения добавочных сопротивлений, максимально возможное количество одновременно подаваемых сигналов.

Монтажные схемы сверяют с принципиальными. Проверяется правильность маркировки шинок, контрольных кабелей, проводов. Для наиболее ответственных устройств составляют принципиальные и монтажные развернутые схемы.

При необходимости вносят исправления в принципиальные и монтажные схемы по согласованию с соответствующей службой заказчика и проектной организацией.

3. Получают от соответствующей службы заказчика или составляют совместно с ней программы испытаний.

4. Проверяют соответствие вторичных устройств и кабеля требованиям ПУЭ, ПТЭ, СНиП, заводским инструкциям, инструкциям по эксплуатации; состояние сборок зажимов, состояние и правильность выполнения заземлений вторичных цепей, состояние уплотнений кожухов и крышек аппаратов, состояние коммутационной аппаратуры, наличие маркировки контрольных кабелей и надписей на рядах зажимов. Выписывают паспортные данные электрооборудования, реле и другой аппаратуры, сравнивают их с данными спецификаций проекта и таблиц уставок.

В результате осмотра составляют дефектную ведомость, которую передают монтажникам для устранения дефектов и недоделок и замены аппаратуры и оборудования, не соответствующих проекту. При выявлении на объекте отличного от проекта оборудования проверяют возможность оставления его, что должно быть согласовано с проектной организацией.

Проверка вторичных цепей выполняется в два этапа: первый — после наладки релейной аппаратуры — проверка релейных панелей, щитов управления и сигнализации, схем приводов выключателей, короткозамыкателей, отделителей, разъединителей; второй — проверка внешних связей между панелями, щитами, приводами. Чтобы исключить появление обходных цепей при прозвонке, создают разрывы на рядах зажимов отсоединением проводов внутри панелей, щитов, приводов.

Проверяются осмотром надежность контактных соединений, наличие шайб и качество пропайки концов многопроволочных проводов.

Исправленные в результате анализа проекта и перечисленных проверок монтажные и принципиальные схемы являются исполнительной документацией; она передается заказчику при сдаче объекта в эксплуатацию.

5. Мегаомметром 1000 В проверяют сопротивление изоляции отдельных электрически не связанных между собой полностью собранных цепей относительно земли и между ними. Для этого предварительно отсоединяют от земли цепи тока и напряжения, а разные фазы цепей тока (напряжения) перемыкают между собой; в схеме постоянного тока перемыкают «+» и «—».

После измерений мегаомметром временные перемычки убирают.

На время проверки из устройств удаляют поляризованные и магнитоэлектрические реле.

Мегаомметром 500 В измеряют сопротивление изоляции между фазами цепей тока панелей при снятых крышках испытательных блоков.

Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм для шинок постоянного и переменного тока (при отсоединенных вторичных цепях) и не менее 1 МОм для каждого присоединения вторичных цепей и цепей электромагнитов или электродвигателей приводов коммутационных аппаратов.

Методика проверки сопротивления изоляции изложена в разд. 3. Катушки электромагнитов, контакторов, реле, вторичную коммутацию панелей (щитов) при пониженном значении сопротивления изоляции необходимо сушить горячим воздухом от воздуходувок или электрическими лампами соответствующей мощности.

При поисках места повреждения изоляции разбивают схему на меньшие участки. Зажимы, прокладки, контакты, ключи с дефектной изоляцией заменяют новыми.

6. Испытание повышенным напряжением вторичных цепей производят после проверки сопротивления изоляции при полностью собранных цепях напряжением 1000 В, частотой 50 Гц, приложенным в течение 1 мин, от специальной установки. В случае отсутствия установки допускается испытывать напряжением мегаомметра 2500 В.

Перед испытанием необходимо:

установить внутри реле и комплектов вынутые ранее поляризованные и магнитоэлектрические реле, платы полупроводниковых приборов;

тщательно осмотреть объекты, на которые будет подано повышенное напряжение (панели, реле, приводы и т. п.); принять необходимые меры по технике безопасности;

отсоединить цепи заземления от устройств и аппаратов, испытательное напряжение которых ниже 1000 В; шунтировать конденсаторы и катушки с большой индуктивностью (обмотки измерительных и силовых трансформаторов, электромагниты) во избежание их повреждения;

закоротить цепи полупроводниковых приборов, обмотки напряжения реле, электроизмерительных приборов, счетчиков, высокоомные сопротивления в схеме, что наиболее просто выполняют установкой в цепях временных перемычек, указанных в предыдущем пункте.

Затем закрыть реле и аппараты крышками и кожухами.

С целью уменьшения количества испытаний рекомендуется объединять испытуемые цепи в одну группу перемычками на рядах зажимов. Испытание производят в соответствии с указаниями разд. 3.

В случае обнаружения и последующего устранения дефектных мест изоляции повторяют испытание повышенным напряжением. До испытания измеряют сопротивление изоляции цепей мегаомметром 1000 В по предыдущему пункту, после испытания повторяют измерение сопротивлений изоляции, но без удаления из схемы поляризованных реле и других элементов, перечисленных в предыдущем пункте.

7. Для проверки взаимодействия реле и коммутационной аппаратуры составляют программу, в которой указывают последовательность и методику проведения отдельных поверочных операций по схеме, порядок их выполнения и какие при этом элементы схемы должны работать.

Проверку ведут в следующем порядке: в схему подают оперативный ток, предварительно проверяют полярность подаваемого напряжения. Затем проверяют взаимодействие реле и аппаратуры включением соответствующих цепей с помощью аппаратов управления или замыканием и размыканием от руки контактов реле в определенной последовательности в соответствии с программой испытаний.

При этом необходимо проверять:

а) правильную последовательность работы элементов схемы от пусковых до выходных отключающих реле;

б) в схемах, имеющих разделение цепей по фазам, правильную последовательность работы реле пофазно; кроме того, отсутствие связи между фазами или предусмотренную схемой взаимосвязь;

в) при наличии реле направления мощности — работу схемы и выдержки времени в зависимости от поведения реле мощности;

г) в защитах, имеющих несколько ступеней времени, правильность взаимодействия элементов защиты на каждой ступени;

д) в схемах защиты, работа которых зависит от вида короткого замыкания, правильность взаимодействия реле в схеме (должна проверяться имитацией всех предусмотренных видов коротких замыканий и перехода одного вида к. з. в другой);

е) правильность действия блокировок;

ж) в схемах, имеющих переключаемые цепи тока и напряжения, правильность переключения;

з) правильность работы схемы при возможных положениях рубильников, отключающих устройств (накладок), испытательных блоков, ключей, переключателей, изменяющих схему устройства, выдержку времени;

и) отсутствие обходных цепей в схемах, в том числе при отсутствии и наличии питания оперативным током устройств, взаимодействующих с проверяемым устройством;

к) наличие выходных сигналов и действие проверяемого устройства от сигналов других устройств;

л) действие защиты и автоматики на отключение, включение коммутационных аппаратов и выдержки времени при этом;

м) правильность действия схемы сигнализации и указательных реле.

Проверку ведут при напряжениях оперативного тока $U_н$ и $0{,}8U_н$. Работа аппаратуры должна быть четкой.

В случае применения переменного оперативного тока проверяют работу схемы при питании от постороннего источника в зависимости от примененного способа получения оперативного тока, например, при применении блоков питания имитируют критические случаи питания их.

8. В заключительной стадии осуществляют проверку защиты в полной схеме при подаче тока и напряжения аварийного режима от постороннего источника при полностью собранных цепях (кроме цепей воздействия на коммутационные аппараты первичной схемы), при закрытых реле и устройствах, накладках, рубильниках, блоках, перемычках, установленных в рабочее положение.

Рассматриваемая проверка является комплексным опробованием устройства. При параметрах аварийного режима в зоне и вне зоны действия проверяют срабатывание или бездействие устройства. Большую часть проверок по предыдущему пункту для сложных устройств удобнее выполнять не при замыкании контактов реле от руки, а при комплексном опробовании.

Полную проверку цепей тока выполняют первичным током от постороннего источника. Проверку устройства осуществляют рабочим напряжением и током нагрузки, затем проводят проверку направленности защит.

5-22. ПРОВЕРКА ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

1. Проверяют схемы соединений, заземление и маркировку вторичных цепей. Заземление вторичных цепей выполняют на выводе обмотки фазы B в схеме «звезда» и на выводе $X_д$ фазы B в схеме «разомкнутый треуголь-

ник» (рис. 5-96). В цепи заземления обмотки трансформатора напряжения не должно быть коммутационных или защитных аппаратов Вторичные цепи разных трансформаторов напряжения должны быть полностью отделены друг от друга.

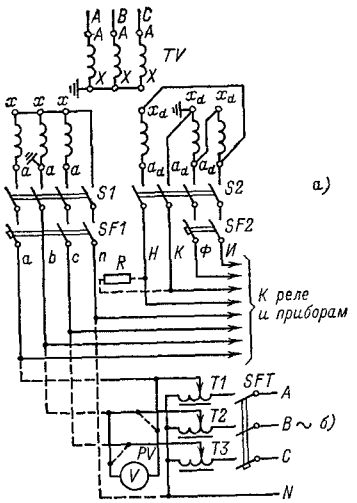


Рис. 5-96. Схема вторичных цепей трансформаторов напряжения.

а — трансформатор напряжения; *б* — испытательная схема; R=25 Ом, 100 Вт (только в схемах трансформаторов (6—35 кВ); *SFT* — автомат защиты испытательной схемы.

Установка пробивных предохранителей и введение в цепи напряжения вспомогательных контактов разъединителей не рекомендуются ввиду резкого снижения надежности цепей. В незаземленных цепях напряжения кроме цепи $3U_0$ (основной цепи схемы «разомкнутый треугольник») могут быть установлены рубильники и автоматы.

В ячейке РУ трансформатора напряжения сети с изолированной нейтралью устанавливают резисторы R=25 Ом мощностью 100 Вт (на рис. 5-96 показаны штрихами) с целью уменьшения перекоса нейтрали и снижения перенапряжений при включении ввода питающего силового трансформатора на ненагруженные шины 3—35 кВ.

Схему цепей проверяют прозвонкой. Из-за сложности и значительной разветвленности цепей напряжения подстанций 110—220 кВ рекомендуется после прозвонки проверять цепи подачей напряжения от постороннего регулируемого трехфазного источника. Такая проверка позволяет устранить ошибки до включения рабочего напряжения на шины подстанции. Отключают трансформатор напряжения разъединителем с первичной стороны; удаляют предохранители первичных цепей, где они имеются; включают автоматы (вставляют предохранители) и отключают рубильники вторичных цепей. С соблюдением техники безопасности во вторичные цепи напряжения в ячейке РУ или на панели трансформатора напряжения подают регулируемое напряжение прямого чередования фаз подъемом с нуля до номинального напряжения. По окончании проверки цепей схемы «звезда» подают напряжение в цепи схемы «разомкнутый треугольник»:

а) сначала подают трехфазное напряжение в цепи *Н, И, Ф* (рис. 5-96); по окончании измерений снимают напряжение, отключают провода испытательной схемы;

б) затем в цепи *Н, К* подают однофазное напряжение 100 В кратковременно, длительно — не более 30 В (во избежание повреждения реле, имеющих пониженную термическую стойкость).

Во время испытания проверяют чередование фаз, линейные, фазные напряжения, напряжения относительно земли на всех рядах зажимов, аппаратах и в ячейке РУ трансформатора напряжения. При этом можно проверить уставки реле, включенных на цепи напряжения.

Подключение цепей при испытаниях показано на рис. 5-96 штриховыми линиями.

2. Ток к. з. во вторичных цепях определяют расчетным путем. Для расчета берут известные значения активного сопротивления проводов $R_{пр}$ и напряжение к. з. $U_к$ % трансформатора напряжения. Значение $Z_к$, Ом, приведенное к обмотке низкого напряжения, определяют по выражению

$$Z_к = \frac{U_к \% U_2}{100S},$$

где $U_2 = 100/\sqrt{3}$ — номинальное напряжение вторичной фазной обмотки схемы «звезда», В; U_2=100 В — то же схемы «разомкнутый треугольник»; S — мощность, к которой отнесено значение $U_к$ % (обычно это максимальная мощность трансформатора напряжения), В·А; $Z_к$ можно определить также и опытным путем.

Подсчитывают минимальный ток к. з. в наиболее удаленной точке цепей напряжения по выражению

$$I_к = \frac{U_н}{k_1 \sqrt{Z_к^2 + (k_2 R_{пр})^2}},$$

где $U_н$=100 В — номинальное междуфазное (линейное) напряжение трансформатора напряжения; k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от схемы соединения трансформатора и вида к. з. (см. табл. 5-34); $R_{пр}$ — активное сопротивление одного провода от трансформатора напряжения до точки к. з. Ток при к. з. на выводах вторичных обмоток определяют при $R_{пр}$=0 по этой же формуле.

3. Проверяют правильность выбора расцепителей автоматов (или плавких вставок предохранителей). Номинальный ток расцепителя автомата или плавкой вставки предохранителя должен быть в 1,2—1,5 раза больше наибольшего тока длительной нагрузки в его цепи (с учетом возможного увеличения нагрузки при резервировании другого трансформатора напряжения). Отношение минимального тока к. з. в данной схеме к току срабатывания электромагнитного расцепителя должно быть не менее 1,5. Номинальный ток плавкой встав-

Таблица 5-34

Значения коэффициентов k_1 и k_2 в зависимости от схемы соединения трансформатора напряжения и вида короткого замыкания во вторичных цепях

Для схемы трансформатора	Вид короткого замыкания	k_1	k_2
Звезда — звезда	Трехполюсное	$\sqrt{3}$	1
	Двухполюсное	2	1
	Однополюсное	$\sqrt{3}$	2
Разомкнутый треугольник	Трехполюсное	1	$\sqrt{3}$
	Двухполюсное	1	2
Звезда — разомкнутый треугольник	Трехполюсное (замыкание проводов *Н*, *К*, *И*, *Ф*; вычисляют ток в проводах *И*, *Ф*)	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	3
	Двухполюсное	1	2

ки должен быть меньше минимального тока к. з. не менее чем в 3—4 раза.

Ток отключающей способности автомата (предохранителя) должен быть не менее максимального тока к. з. в месте установки этого аппарата (в большинстве случаев на выводах трансформатора напряжения).

Для защиты трансформаторов напряжения применяют автоматы, как правило, типа АП-50-3М (трехполюсный) и АП-50-2М (двухполюсный) с электромагнитным расцепителем, с отключающей способностью $I_{н,max}$ до 5000 А при напряжении до 380 В (технические данные приведены в § 6-15 и 6-17).

Рекомендуется кратность срабатывания электромагнитных расцепителей принимать 3,5 номинального тока. При необходимости просто осуществляется перемотка катушек расцепителей. Рекомендуется применение автоматов с двумя расцепителями одновременно — электромагнитным и тепловым.

Если при токе к. з., равном току срабатывания электромагнитного расцепителя (с учетом разброса), междуфазное напряжение на панелях релейной защиты снижается не более чем до 0,9 номинального, то более удаленные к. з. допустимо отключать с выдержкой времени, т. е. с помощью теплового расцепителя, в случае снижения междуфазного напряжения на панелях релейной защиты ниже 0,9 номинального для ликвидации удаленных повреждений рекомендуется установить в протяженных цепях неселективные автоматы.

Проверка автоматов в цепях основных обмоток трансформаторов напряжения типа НКФ-110—НКФ-500, соединенных по схеме «звезда», должна производиться с учетом необходимости отстройки от кратковременных бросков емкостного тока, возникающих во вторичных цепях трансформатора напряжения при снятии напряжения с линии; ток замыкается через автотрансформаторы индукционных реле сопротивления и может быть 60—80 А. Рекомендуется увеличение номинального тока расцепителя автомата в цепях основных обмоток трансформатора напряжения; ток срабатывания расцепителя

$$I_{ср} = k_{отс} I_{2с},$$

где $k_{отс} = 1{,}3$ — коэффициент отстройки; $I_{2с}$ — максимальный емкостный ток во вторичных цепях. При кратности срабатывания расцепителя 3,5 номинальный ток расцепителя принимают

$$I_{н,расц} = \frac{k_{отс} I_{2с}}{3{,}5}.$$

При наладке проверяют эффективность отстройки автоматического выключателя от бросков емкостного тока. В цепях схемы «разомкнутый треугольник» устанавливают автомат на номинальный ток 2,5 А.

4. Проверяют цепи напряжения включением трансформатора на рабочее напряжение. Измеряют все линейные, фазные напряжения, напряжения всех проводов относительно земли непосредственно после автоматов в ячейке РУ. Измеряют напряжение небаланса $3U_0$ (между проводами *Н*, *К*), которое должно быть 1—3 В. Это значение, а также симметрия линейных и фазных напряжений схем «звезда» и «треугольник», прямое чередование фаз подтверждают правильность включения обмоток трансформатора напряжения. Измерения повторяют на всех шинках, рядах зажимов, к которым подключают цепи напряжения. Там же проверяют чередование фаз, сначала подключив ВАФ-85М к цепям напряжения *А*, *В*, *С* схемы «звезда», затем фазу *В* прибора подключают к цепи заземления. Таким образом проверяют наименование фаз. В цепях схемы «треугольник» ВАФ-85М подключают к проводам *Н*, *Ф*, *И*, затем фазу *А* прибора подключают к земле. Измерениями различают провода *Н*, *К* схемы «разомкнутый треугольник»: напряжение между проводом *Н* и землей равно напряжению небаланса $3U_0$; напряжение между проводом *К* и землей примерно равно нулю. Поочередно подключают к цепям напряжения аппаратуру панелей, щитов, ячеек. Пользуясь изложенным методом, можно определить наименование фазы на каждом выводе каждого реле. Таким образом проверяют маркировку цепей напряжения.

Правильность схемы «разомкнутый треугольник» проверяют снятием векторных диаграмм напряжений относительно напряжений схемы «звезда».

Если ранее выполнена проверка цепей напряжения от постороннего источника, объем проверок по настоящему пункту сокращается.

5. Фазировку трансформаторов напряжения производят при возможности питания цепей напряжения от двух и более трансформаторов напряжения или при необходимости фазировки различных синхронных источников по вторичным цепям напряжения.

Необходимые условия фазировки: наличие смонтированных постоянных заземлений одних и тех же фаз вторичных цепей фазируемых трансформаторов напряжения; питание от одного источника. Фазируют при помощи вольт-

метра, рассчитанного на двойное линейное напряжение, и фазоуказателя.

Фазировку производят на щитах, панелях, входных зажимах или между рядами зажимов разных ячеек РУ фазируемых трансформаторов напряжения.

Цепи напряжения фазируют по обе стороны переключающих устройств — ключей, рубильников, контактов реле-повторителей. Фазоуказателем проверяют чередование и наименование фаз каждого трансформатора напряжения, вольтметром отыскивают одноименные фазы. Напряжение между одноименными фазами должно быть равно нулю, между разноименными — линейному напряжению.

6. Нагрузки трансформатора напряжения определяют в максимальном режиме. Измеряют токи фаз *A*, *B*, *C*, нулевого провода, напряжения фаз.

Мощность нагрузки одной фазы трансформатора, В·А.

$$S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

Для трехфазных трансформаторов мощности фаз суммируют. Найденную таким образом мощность трехфазного или однофазного трансформатора сравнивают с номинальной его мощностью в классе 0,5 или 1 в зависимости от назначения трансформатора напряжения.

7. Определяют потери напряжения во вторичных цепях. Согласно ПУЭ для обеспечения необходимой точности работы измерительной и релейной аппаратуры потери напряжения во вторичных цепях от трансформатора напряжения не должны превышать: до счетчиков 0,5, до щитовых приборов 1,5, до реле защиты 3 %.

Для проверки необходимо, особенно если трансформаторы напряжения находятся на значительном удалении, произвести измерения напряжения на зажимах счетчиков и щитов, где установлены приборы и реле. Одновременно производят измерения на зажимах ячейки РУ трансформатора напряжения. До измерений и после них вольтметры, которыми исследовалось напряжение разных объектов, сверяют между собой вблизи точки шкалы 100 В. Потери напряжения не должны превышать до счетчика 0,5, до щитовых приборов 1,5, до реле 3 В (линейного напряжения).

5-23. ПРОВЕРКА ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

В условиях строящихся объектов главное внимание уделяют проверкам смонтированных цепей тока при строгом соблюдении правил техники безопасности.

1. Проверяют схемы соединений и маркировку вторичных цепей. Каждая группа электрически соединенных вторичных обмоток трансформаторов независимо от их количества должна быть заземлена только в одной точке — на панели защиты или на ближайшем к трансформаторам тока ряду зажимов, доступ к которым в условиях эксплуатации не связан с приближением к токоведущим частям, находящимся под высоким напряжением.

Проверку схемы соединений, измерение сопротивления изоляции и испытание повышенным напряжением выполняют в соответствии с § 5-21.

2. Проверку замкнутого состояния цепей тока выполняют мостом типа ММВ по схеме рис. 5-97, *а* следующим образом: на одной из панелей или в ряду зажимов ячейки РУ вывинчивают штеккеры зажимов *A*, *B*, *C*, *N* цепей тока. Подключают мост ММВ в рассечку провода *N*, одним штеккером поочередно замыкают провода фаз *A*, *B*, *C*, при этом каждый раз измеряют сопротивление цепи фаза — нулевой провод. Результаты измерений по фазам сравнивают между собой с учетом различия между фазами по протяженности цепей и количеству включенных аппаратов. Метод позволяет выявить разомкнутые цепи и ненадежные контакты в цепях. При необходимости уточнения местоположения ненадежного контакта измеряют сопротивления соответствующих частей цепи. После устранения дефектов и повторной проверки винтовых соединений повторяют указанные выше измерения.

Замыкают проверенные цепи, устанавливая штеккеры на место.

3. Цепи тока испытывают пофазно номинальным током, подавая поочередно напряжение к проводам фаз *A*, *B*, *C* по схеме рис. 5-97, *б*. При этом цепи остальных двух фаз и нулевой провод замкнуты. Цепь каждой фазы проверяют на всех рядах зажимов путем последовательного измерения тока в цепях данной фазы, других фаз и нулевом про-

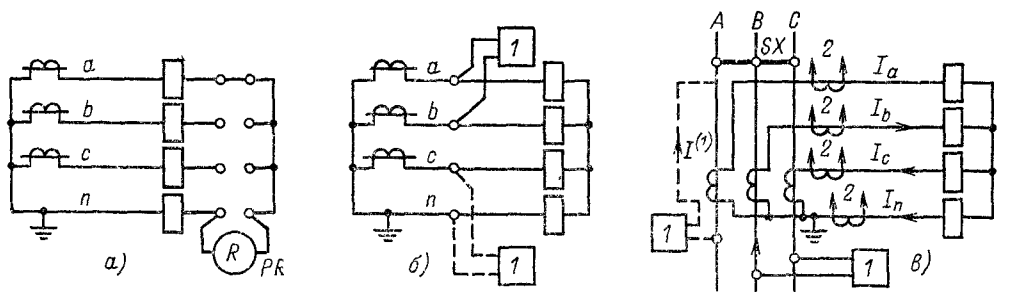


Рис. 5-97. Проверка вторичных цепей трансформаторов тока.

а — пофазными измерениями активных сопротивлений; *б* — прогрузкой вторичным током; *в* — первичным током от постороннего источника; *SX* — временная закоротка; *PR* — мост одинарный типа ММВ, *1* — нагрузочное устройство; *2* — токоизмерительные клещи прибора ВАФ-85М.

воде. При этом можно проверить уставки реле тока.

Проверки токовых цепей, имеющих другие схемы (рис. 5-98), принципиально не отличаются от приведенных выше.

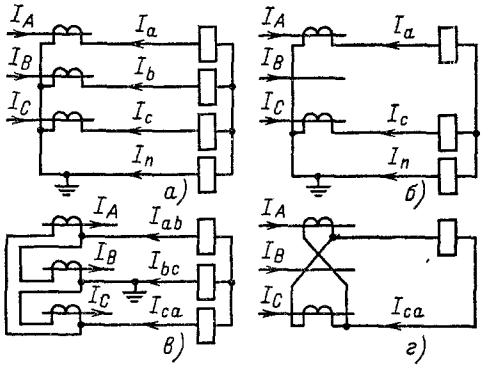


Рис. 5-98. Схемы соединения трансформаторов тока.

а — полная звезда; *б* — неполная звезда; *в* — треугольник, *г* — схема на разность токов фаз.

Известен также метод испытания от трехфазного постороннего источника со снятием векторных диаграмм, при этом проверки и измерения аналогичны приведенным ниже, применяемым при наличии тока нагрузки.

4. Испытание первичным током от постороннего однофазного источника выполняют по схеме рис. 5-97, *г* при токе $I^{(2)}$, равном $0{,}1I_н$—$I_н$.

Если тщательно проведены предыдущие проверки, обрывы цепей и неправильные соединения проводов фаз и нулевого провода исключаются. Возможны следующие случаи при испытании фаз *B*, *C*:

а) вторичные токи фаз $I_b=I_c=I^{(2)}/n_т$, ток в нулевом проводе $I_n=0$ — трансформаторы тока фаз *B*, *C* включены согласно;

б) вторичные токи фаз $I_b=I_c=I^{(2)}/n_т$, ток в нулевом проводе $I_n=2I_b=2I_c$ — трансформатор тока одной фазы включен с обратной полярностью. Испытание при сочетаниях фаз *A*, *B* и *C*, *A* позволяет выявить неверно включенный трансформатор; $I^{(2)}$ — первичный ток при испытании.

5. Схемы соединения вторичных цепей трансформаторов тока проверяют первичным (трехфазным) током нагрузки. Данная проверка является обязательной. На время проверки защиты проверяемого присоединения должны быть резервированы защиты других присоединений. В табл. 5-35 показаны возможные ошибки при монтаже. Измеряют вторичные токи во всех трех фазах и в нулевом проводе.

Анализируя результаты измерений и векторные диаграммы вторичных токов, делают

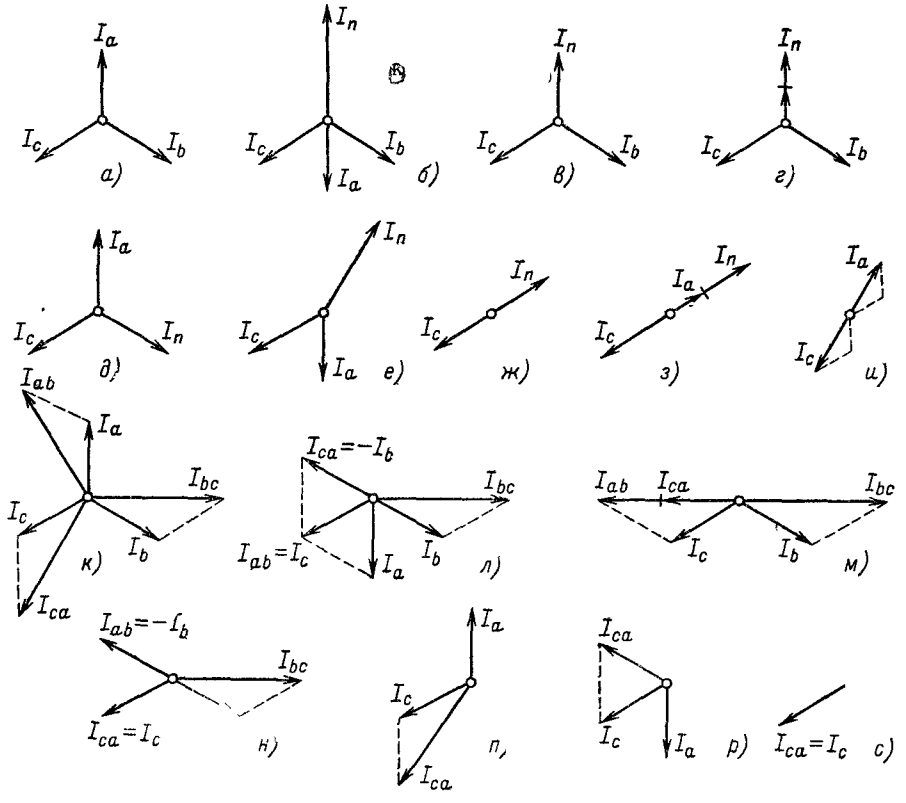


Рис 5-99. Векторные диаграммы вторичных токов при проверке правильности соединений токовых цепей симметричным трехфазным током.

Таблица 5-35

Проверка правильности соединений токовых цепей трехфазным током, симметричным по фазам $I_A = I_B = I_C = I_1$

Схема трансформаторов тока	Результаты измерений	Векторная диаграмма вторичных токов	Заключение
Рис. 5-98, *а*	$I_a = I_b = I_c = I_1/n_т$; $I_n = 0$	Рис. 5-99, *а*	Правильно собрана схема звезды
	$I_a = I_b = I_c = I_1/n_т$; $I_n = 2I_1/n_т$	Рис. 5-99, *б*	Изменена полярность трансформатора тока фазы *А*
	$I_a = 0$; $I_b = I_c = I_n = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *в*	Оборван провод фазы *А*
	$I_b = I_c = I_1/n_т$; $I_a = I_n = \frac{1}{2} I_1/n_т$	Рис. 5-99, *г*	Закорочен трансформатор тока фазы *А*
Рис. 5-98, *б*	$I_a = I_c = I_n = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *д*	Правильно собрана схема неполной звезды
	$I_a = I_c = I_1/n_т$; $I_n = \sqrt{3} I_1/n_т$	Рис. 5-99, *е*	Изменена полярность трансформатора тока фазы *А*
	$I_a = 0$; $I_c = I_n = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *ж*	Оборван провод фазы *А*
	$I_a = I_n = \frac{1}{2} I_1/n_т$; $I_c = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *з*	Закорочен трансформатор тока фазы *А*
	$I_n = 0$; $I_a = I_c = \sqrt{3}/2\ I_1/n_т$	Рис. 5-99, *и*	Оборван нулевой провод
Рис. 5-98, *в*	$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = \sqrt{3}\ I_1/n_т$	Рис. 5-99, *к*	Правильно собрана схема треугольник
	$I_{bc} = \sqrt{3} I_1/n_т$; $I_{ab} = I_{ca} = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *л*	Изменена полярность трансформатора тока фазы *А*
	$I_{bc} = \sqrt{3} I_1/n_т$; $I_{ab} = I_{ca} = (\sqrt{3}/2) \times I_1/n_т$	Рис. 5-99, *м*	Закорочен трансформатор тока фазы *А*
	$I_{ab} = 0$; $I_{bc} = I_{ca} = 1{,}5 I_1/n_т$	—	Оборван провод *ab*
	$I_{ab} = I_{ca} = I_1/n_т$; $I_{bc} = \sqrt{3} I_1/n_т$	Рис. 5-99, *н*	Оборван провод фазы *А* схемы треугольник
Рис. 5-98, *г*	$I_{ca} = \sqrt{3} I_1/n_т$	Рис. 5-99, *п*	Правильно собрана схема на разность токов
	$I_{ca} = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *р*	Изменена полярность трансформатора тока фазы *А*
	$I_{ca} = 0$	—	Закорочен трансформатор тока или оборвана цепь вторичной нагрузки (реле)
	$I_{ca} = I_1/n_т$	Рис. 5-99, *с*	Оборвана цепь трансформатора тока фазы *А*

заключение о правильности схемы и исправности трансформаторов тока (рис. 5-99).

6. Проверка целостности нулевого провода при симметричной нагрузке в схеме «полной звезды» может быть произведена измерением тока небаланса в нулевом проводе.

Один из методов определения целостности нулевого провода состоит в следующем. Во время снятия векторных диаграмм, когда на ВАФ-85М подано напряжение трех фаз 110—220 В, клещами прибора охватывают нулевой

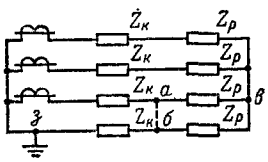


Рис. 5-100. Проверка целости нулевого провода вторичных цепей трансформаторов тока.

$Z_к$ — сопротивление жилы кабеля; $Z_р$ — сопротивление реле.

провод, прибор переводят в режим измерения «фаза» на пределе «1А» по току и, вращая лимб прибора на 360°, по движению стрелки индикатора определяют наличие тока небаланса в нулевом проводе. В случае обрыва нулевого провода стрелка индикатора не отклоняется от нуля. Проверка целостности нулевого провода может быть выполнена также по схеме рис. 5-100. В цепях тока устанавливают временную перемычку *а—б*. Если $Z_к < Z_р$, ток по цепям *а—б*, *в—б*, *з—б* может быть четко измерен прибором ВАФ-85М, применяемым в качестве амперметра на пределе «1А» ($Z_к$ — сопротивление жилы кабеля, $Z_р$ — сопротивление реле). Для увеличения тока по цепям *з—б*, *б—в* последовательно с $Z_р$ в цепь *а—в* включают реостат 5—10 Ом.

5-24. ФАЗИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И СНЯТИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

1. Фазировку кабеля низкого напряжения в сети с заземленной нейтралью производят включением кабеля под напряжение с одной стороны, а на другом конце кабеля измеряют напряжения между одноименными фазами фазируемого кабеля и шинами переменного тока, отключенными от кабеля рубильником. Если напряжение между одноименными фазами кабеля и шин равно нулю, а между разноименными фазами равно линейному, фазировка считается законченной. Для фазировки двух силовых трансформаторов на низком напряжении в сети с изолированной нейтралью необходимо до подачи напряжения предварительно соединить проводником одну фазу первого трансформатора с предполагаемой одноименной фазой второго трансформатора и, включив напряжение, фазировать между собой две оставшиеся разобщенными фазы источников.

Фазировку источников высокого напряжения рекомендуется выполнять по вторичным цепям напряжения (см. § 5-22). Сначала на две секции (системы) шин РУ подают напряжение от одного источника питания и фазируют вторичные цепи трансформаторов напряжения этих секций. Затем на каждую секцию подают напряжение от «своего» источника питания и повторяют фазировку по вторичным цепям. Результаты первой и второй фазировки должны совпадать. В случае несовпадения результатов следует снять векторные диаграммы напряжений вновь подключаемого источника относительно напряжений ранее включенного источника и определить ошибку в ошиновке или подключении кабеля высокого напряжения.

По возможности следует избегать фазировок индикаторами высокого напряжения из-за ненадежности свечения индикаторов, невозможности отыскания ошибок построением векторных диаграмм и повышенной опасности многочисленных ответственных манипуляций индикаторами с подключенным к ним кабелем высокого напряжения.

Для фазировки несинхронных источников достаточно совпадения чередования фаз.

2. Снятие векторных диаграмм токов и напряжений является одним из способов проверки под напряжением: правильности соединения вторичных обмоток трансформаторов; правильности подключения обмоток ваттметров, счетчиков и реле защиты.

Поскольку каждому режиму первичной цепи соответствуют совершенно определенные векторные диаграммы во вторичных цепях, с помощью диаграмм производят анализ режимов работы реле. Снятие векторных диаграмм представляет собой по существу определение фазовых углов между векторами токов (напряжений) и напряжений (токов). При использовании ВАФ-85М в качестве фазоизмерителя лимб прибора и стрелка индикатора должны вращаться в одну сторону при подходе к нулю для отсчета по лимбу искомого угла между исследуемым током (напряжением) и напряжением, приложенным к зажимам *A* и *B* прибора, если на зажимы *A*, *B* и *C* прибора подано симметричное трехфазное напряжение с прямым чередованием фаз.

С целью выявления ошибочно закороченных плеч дифференциальной защиты (трансформатора, шин, линии) рекомендуется снимать векторные диаграммы токов в дифференциальной цепи защиты, поочередно подавая в нее ток от каждого плеча и сумму токов всей дифзащиты без исследуемого плеча.

5-25. ПРОВЕРКА МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

1. Для кабельных линий с трансформаторами тока типов ТЗЛ, ТЗР и ТНП кабельная воронка в месте ее крепления должна быть изолирована от земли, а заземляющий ее изолированный провод пропущен через окно трансформатора тока и подсоединен к устройству заземления (рис. 5-101). Металлическая оболочка кабеля (броня, экран) должна быть изолирована от земли на расстоянии от воронки до выхода из окна ТТНП.

Для защит от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью с реле типа ЗЗП-1, УСЗ-2/2, РТЗ-50, а также для защиты с ТНП, имеющих подмагничивание от цепей напряжения, вторичные цепи тока от транс-

форматора тока до реле должны быть выполнены отдельным кабелем для исключения наводок от цепей переменного тока. При большой протяженности соединительные провода экранируют; экран должен охватывать оба провода токовой цепи; его заземляют в одной точке.

При установке ТТНП защиты ЗЗП-1 на кабеле, не имеющем стального экрана, необходимо экранировать кабель в месте установки ТТНП для снижения напряжения небаланса на выходе ТТНП. Экранирование выполняют обертыванием кабеля полосой листовой

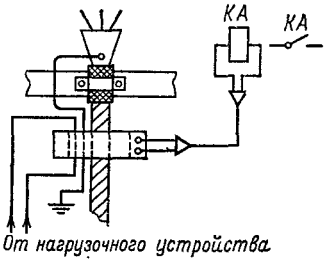


Рис. 5-101. Установка трансформатора тока нулевой последовательности и схема проверки действия защиты от замыканий на землю.

стали в месте установки ТТНП, длина экрана по обе стороны от ТТНП должна быть не менее 150 мм. Заземляют экран, как указано выше.

2. При наличии нескольких параллельно проложенных кабелей на каждом из них устанавливают трансформатор тока ТЗЛ или ТЗР. Вторичные обмотки нескольких ТТНП соединяют последовательно. Достаточная чувствительность защиты обеспечивается при наличии не более трех ТТНП. При большом количестве параллельных силовых кабелей применяют трансформатор тока типа ТНП с подмагничиванием, который охватывает все кабели.

Наименьший возможный ток срабатывания защиты с реле РТЗ-50 2 А при одном трансформаторе тока типа ТЗЛ (ток срабатывания защиты с реле РТ-40/0,2 или РУ21 и трансформатором тока ТЗЛ или ТЗР — не менее 20—50 А, что в большинстве случаев не обеспечивает срабатывание сигнализации замыканий на землю или отключение повреждения).

3. Защиту, включенную на трехтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности, проверяют при подаче тока от постороннего источника по схеме рис. 5-102. Измеряют ток I каждой фазы и вторичный ток I_2.

5-26. ПРОВЕРКА НАПРАВЛЕННОСТИ ЗАЩИТ

Общие рекомендации. Проверку направленности защиты производят при рабочем токе после предварительной оценки правильности включения реле в схеме в соответствии с указаниями, приведенными в § 5-21—5-25.

Проверка направленности — это окончательная проверка правильности подключения к реле цепей тока и напряжения имитацией режимов к. з. нагрузкой первичной цепи (иногда испытанием цепи от постороннего источника) без нарушения схем вторичных цепей. Для этого устанавливают временные перемычки в цепях, вывинчивают штеккеры из зажимов, манипулируют крышками испытательных блоков, не изменяя при этих операциях постоянных монтажных соединений.

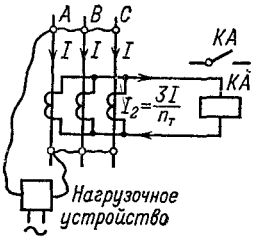


Рис. 5-102. Схема проверки максимальной токовой защиты от замыкания на землю с трехтрансформаторным фильтром токов нулевой последовательности.

Для проверки направленности защиту выводят из работы. Проверку направленности защиты можно выполнить при любом направлении мощности. При определении направленности необходимо знать направление активной и реактивной мощности в первичной цепи защищаемого присоединения, так как при ошибочной полярности трансформаторов тока можно по формально правильной векторной диаграмме получить превратное представление о режиме первичной цепи, направленности защиты.

Наиболее четко фиксируется направление мощности в режиме одностороннего питания.

Направление мощности уточняют по показаниям щитовых приборов, по данным диспетчерской службы.

Рекомендуется следующая последовательность операций при проверке направленности защиты:

1. К зажимам A, B, C прибора ВАФ-85М подключают цепи напряжения U_a, U_b, U_c основной обмотки трансформатора напряжения, выбранные в качестве опорных для системы координат. Снимают векторную диаграмму токов защищаемого присоединения в цепях тока исследуемой защиты. Векторная диаграмма должна соответствовать известному направлению мощности в первичной цепи.

2. Определяют поведение реле мощности (при снятых крышках реле) при поочередной циклической смене фаз тока (или фаз напряжения) в реле путем установки по очереди штепсельных крышек № 1, 2, 3 испытательных блоков (по рис. 5-103 и 5-104) цепей тока (или напряжения) или — при отсутствии блоков — путем установки соответствующих временных перемычек на входных зажимах панели.

При необходимости предварительно устанавливают штепсельную крышку испытательного блока или перемычки на входных зажимах панели для имитации несимметричных режимов в цепях трансформатора напряжения по схеме «разомкнутый треугольник».

Для статических реле измеряют ток на выходе схемы сравнения. При необходимости предварительно штатными перемычками в ре-

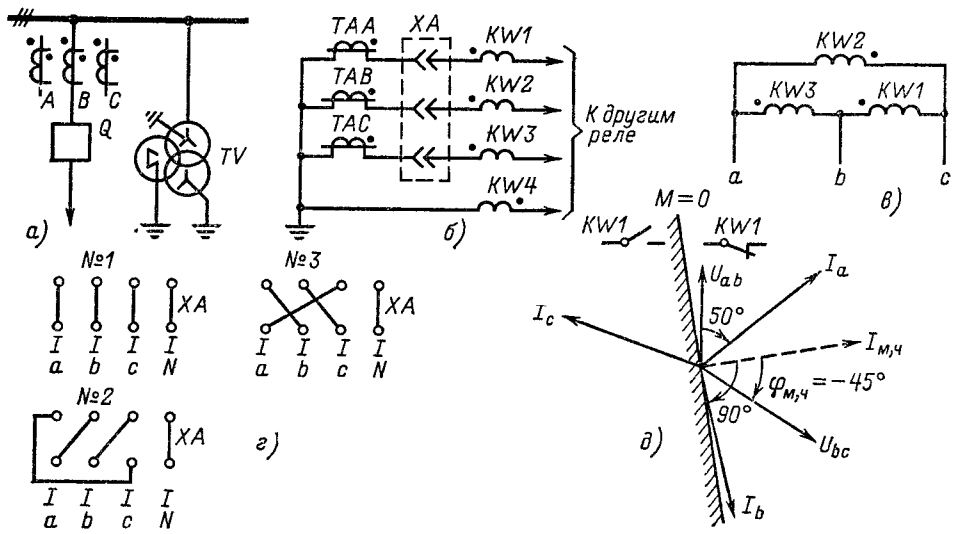


Рис. 5-103. Определение направленности защиты от междуфазных коротких замыканий.

а — поясняющая схема; *б* — схема цепей тока; *в* — схема цепей напряжения; *г* — крышки испытательного блока; *д* — векторная диаграмма; *ХА* — испытательный блок цепей тока.

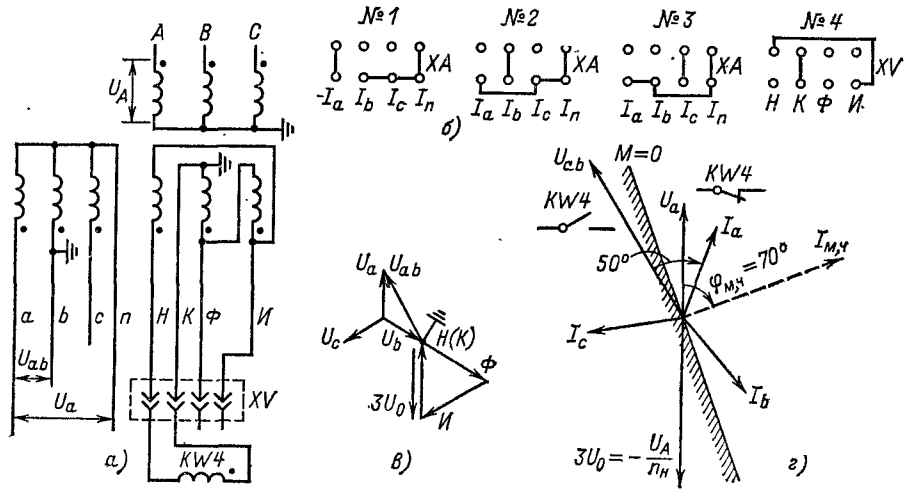


Рис. 5-104. Определение направленности защиты от замыканий на землю.

а — схема цепей напряжения; *б* — крышки испытательного блока *ХА* в схеме рис. 5-103, *а* и блока *XV*; *в* — потенциальная диаграмма напряжений трансформатора напряжения; *г* — векторная диаграмма; *ХА* — испытательный блок цепей тока; *XV* — то же цепей напряжения.

ле превращают реле сопротивления в реле мощности или изменяют уставки реле.

3. Выполняют построение векторной диаграммы.

4. Анализируют поведение реле с учетом принятой схемы включения и угла максимальной чувствительности реле.

Проверка направленности защиты от междуфазных коротких замыканий. Проверка может быть выполнена рабочим током и напряжением, так как режим симметричной нагрузки для реле мощности принципиально не отличается от режима трехфазного к. з. Ток, близкий по направлению к току трехфазного к. з. в зоне защиты, всегда можно получить циклической перестановкой фаз тока или напряжения.

Проверку производят по схеме рис. 5-103, выполняя последовательность операций 1, 2, 3, 4 (см. выше «Общие рекомендации»). Поведение реле анализируют с учетом того, что реле мощности *KW1*, *KW2*, *KW3* (рис. 5-103) имеют угол максимальной чувствительности $\varphi_{м,ч}=-45°$ и включены по 90-градусной схеме.

Определение направленности реле *KW1* по векторной диаграмме выполняют следующим образом:

1. Строят вектор напряжения $\vec{U}_{bc}$, на которое включено реле *KW1*, под углом 120° к вектору $\vec{U}_{ab}$ (рис. 5-103, *д*).

2. Под углом $\varphi_{м,ч}=-45°$ к вектору $\vec{U}_{bc}$ проводят вектор $\vec{I}_{м,ч}$ — направление тока максимальной чувствительности.

3. Строят векторы токов $I_a=4{,}3$ А, фаза $\varphi_a=50°$, отстающий по отношению к напряжению $\vec{U}_{ab}$; $I_b=4{,}3$ А; $\varphi_b=170°$ отстающий; $I_c=4{,}3$ А; $\varphi_c=70°$ опережающий.

При вставленной рабочей крышке № 1 блока *XA* на реле *KW1* подан ток I_a, при штепсельной крышке № 2 — ток I_b, при крышке № 3 — ток I_c. Поведение реле: при токах I_a, I_b контакты замкнуты, при токе I_c момент на реле заклинивающий (в сторону размыкания контактов).

4. Под углом 90° к вектору $\vec{I}_{м,ч}$ проводят линию нулевых моментов реле *KW1* (линия $M=0$ для реле *KW1* на рис. 5-103, *д*). Рабочая зона реле *KW1* располагается в той полуплоскости, где находится вектор $\vec{I}_{м,ч}$.

5. Анализ. Векторы токов $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$ попадают в рабочую зону, вектор тока $\vec{I}_c$ попадает в нерабочую зону. Следовательно, от токов I_a, I_b реле должно срабатывать, при токе I_c не должно срабатывать.

6. Вывод. Если поведение реле совпадает с данными анализа векторной диаграммы, реле *KW1* включено правильно. Аналогично проверяют направленность реле *KW2*, *KW3*.

Проверка направленности защиты нулевой последовательности от замыканий на землю в сети с заземленной нейтралью. Проверку выполняют путем имитации режима однофазного к. з. на землю при наличии тока нагрузки первичной цепи (для реле *KW4* по схеме рис. 5-104).

Предварительно определяют положение вектора напряжения $\vec{U}_{И-К}$ на векторной диаграмме рис. 5-104, *в* (измеряют прибором ВАФ-85М). Данный вектор на диаграмме имеет обозначение $3U_0$, так как он совпадает по направлению с напряжением $3U_0$ схемы «разомкнутый треугольник» при замыкании на землю фазы *А* первичной цепи. Напряжение $U_{И-К}$ получается путем исключения напряжения фазы *А* ($U_{Н-И}$) из суммы напряжений $U_{Н-И}+U_{И-Ф}+U_{Ф-Н}$ схемы «разомкнутый треугольник».

Временной перемычкой в ряду зажимов или установкой штепсельной крышки № 4 в блок *XV* (рис. 5-104, *б*) к реле мощности *KW4* присоединяют провод *И* вместо провода *Н*, т. е. подают напряжение $3U_0$ для имитации замыкания фазы *А* на землю. (Испытательный провод *И* должен быть подключен по постоянной схеме к ряду зажимов панели защиты или — после ряда зажимов — на отдельную цепь испытательного блока *XV* цепей напряжения).

Проверку производят по схеме рис. 5-104, *а* (схема цепей тока на рис. 5-103, *б*), выполняя операции 1, 2, 3, 4 (см. выше «Общие рекомендации»).

Поведение реле *KW4* анализируют с учетом того, что реле имеет угол максимальной чувствительности $\varphi_{м,ч}=70°$. Определение направленности реле *KW4* по векторной диаграмме выполняют следующим образом.

1. Строят вектор напряжения $\vec{U}_a$, отстающий от $\vec{U}_{ab}$ на 30°. Далее, как показано на рис. 5-104, *г*, строят вектор $3\vec{U}_0=-\vec{U}_A/n_{нД}$ напряжения испытательного провода *И*, на это напряжение включено реле *KW4*.

2. На рис. 5-104, *г* строят векторы токов фаз $\vec{I}_a=4{,}3$ А; $\varphi_a=50°$; $\vec{I}_b$, $\vec{I}_c$ (те же векторы, что и в предыдущем примере).

3. Вектор тока максимальной чувствительности $\vec{I}_{м,ч}$ строят под углом $\varphi_{м,ч}=70°$ по отношению к вектору $\vec{U}_a$.

При вставленной штепсельной крышке № 1 по рис. 5-104, *б* в блок *XA* на реле *KW4* подается ток I_a, при штепсельной крышке № 2 — ток I_b, при крышке № 3 — ток I_c. Поведение реле: при токе I_a контакты замкнуты, при токах I_b, I_c момент на реле заклинивающий (в сторону размыкания контакта).

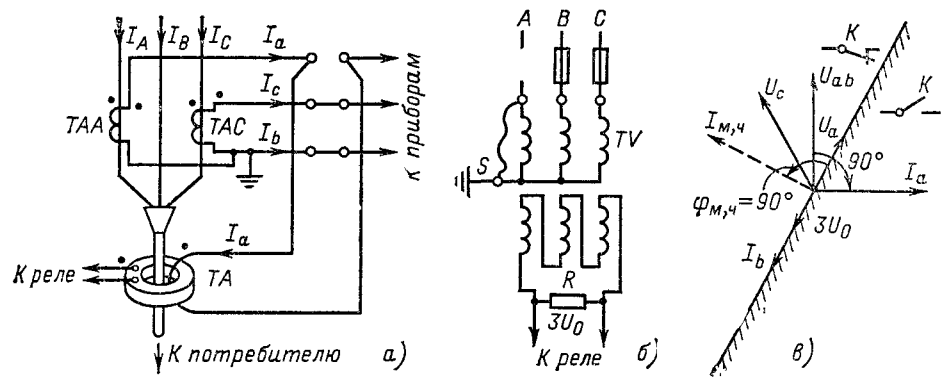


Рис. 5-105. Определение направленности защиты ЗЗП-1.

а — цепи трансформаторов тока; *б* — трансформатор напряжения; *в* — векторная диаграмма; *S* — закоротка (подключение защиты ЗЗП-1 к цепям тока и напряжения показано на рис. 5-94).

4. Под углом 90° к вектору $I_{м.ч}$ проводят линию нулевых моментов реле *KW4* (линия $M=0$ для реле *KW4* на рис. 5-104, *г*). Рабочая зона реле *KW4* располагается в той полуплоскости, где находится вектор $I_{м.ч}$.

5. Анализ. Вектор тока I_a попадает в рабочую зону, векторы токов I_b, I_c попадают в нерабочую зону. Следовательно, от тока I_a реле должно срабатывать, при токах I_b, I_c не должно срабатывать.

6. Вывод. Если поведение реле совпадает с данными анализа векторной диаграммы, реле *KW4* включено правильно.

Проверка направленности защиты ЗЗП-1. Выполняется в следующем порядке.

1. Снимают накладку в цепи отключения выключателя от защиты ЗЗП-1. При отключенной защищаемой линии с соблюдением правил техники безопасности выполняют следующее:

а) через окно ТТНП пропускают изолированный проводник в виде одного или нескольких витков в зависимости от соотношений ожидаемого вторичного тока нагрузки измерительных трансформаторов тока и тока срабатывания защиты ЗЗП-1 при напряжении $3U_0=33$ В (§ 5-20); подключают проводник к разъемному зажиму фазы *A* цепей тока измерений в ячейке РУ защищаемого присоединения, строго соблюдая полярность (рис. 5-105, *а*);

б) отключают трансформатор напряжения разъединителем от шин РУ. Отключают автомат цепей напряжения. Вынимают предохранитель фазы *A* первичной цепи (рис. 5-105, *б*). Перемыкают вывод *A* трансформатора напряжения *TV* с его нулевым выводом. Включают разъединитель трансформатора напряжения. Включают автомат цепей напряжения.

2. Прибором ВАФ-85, опорное напряжение к которому подводится от трансформатора напряжения другой секции (или через понижающий трансформатор — от трансформатора собственных нужд), измеряют значение и фазу напряжения $3U_0$ (рис. 5-105, *в*). Начало измерительной цепи напряжения прибора подключают к цепи вывода a_d трансформатора напряжения, конец — к цепи x_d. Отключают резистор *R* (рис. 5-105, *б*), предназначенный для снижения перенапряжений на ненагруженной секции РУ. Снова определяют вектор $3\vec{U}_0$. Если велико искажение вектора $3\vec{U}_0$, дальнейшие измерения выполняют при отключенном резисторе *R*.

3. В окно ТТНП пропускают провод с током фазы *A* трансформатора тока (из разъемного зажима вынимают штеккер), прибором ВАФ-85М определяют значение и фазу тока I_a. При этом начало клещей прибора должно быть обращено к трансформаторам тока. Отмечают срабатывание или бездействие ЗЗП-1. Далее такие же измерения повторяют для токов I_b, I_c, поочередно подключая провод (с соблюдением полярности) к соответствующим разъемным зажимам. После окончания каждого измерения вставляют штеккер в разъемный зажим.

Напряжение $3U_0=33$ В может оказаться недостаточным для срабатывания реле *KA* защиты ЗЗП-1 (рис. 5-94). В этом случае к зажимам *11*, *13* ЗЗП-1 подключают вольтметр. Показание вольтметра 12—20 В считают срабатыванием защиты. При необходимости увеличить напряжение $3U_0$ временной перемычкой (с зажимами типа «крокодил») исключают из схемы устройство ВУ-1.

Таблица 5-36

Данные измерений при определении направленности защиты ЗЗП-1

Ток	Фаза тока	Реле *KA* защиты ЗЗП-1
$I_a=2{,}8$ А	*L* 90°	Не сработало
$I_b=2{,}8$ А	*C* 150°	» »
$I_c=2{,}8$ А	*C* 30°	Сработало

4. По результатам измерений заполняют табл. 5-36.

Записывают показания ваттметров линии (при наличии последних), вычисляют фазу тока нагрузки в градусах

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{P}{Q}.$$

5. По данным табл. 5-36 строят векторную диаграмму (рис. 5-105, *в*). В приводимом примере прибор ВАФ-85М подключен к цепям трансформатора напряжения соседней секции 10 кВ.

Построение диаграммы и анализ работы реле выполняют так же, как для реле мощности нулевой последовательности (см. выше), т. е.:

а) строят вектор $\vec{U}_{ab}$;

б) строят вектор $\vec{U}_a$, опережающий $\vec{U}_{ab}$ на 30°, вектор $3\vec{U}_0=-\vec{U}_a/3$. Под углом, равным углу максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}=-90°$, к вектору $\vec{U}_a$ проводят вектор тока максимальной чувствительности $\vec{I}_{м.ч}$ ($I_{м.ч}$ — ток, при котором чувствительность направленной защиты является максимальной). Под углом 90° к вектору $\vec{I}_{м.ч}$ строят линию нулевых моментов. Рабочая зона реле ЗЗП-1 располагается в той полуплоскости, где находится вектор $\vec{I}_{м.ч}$. Строят векторы токов $\vec{I}_a$, $\vec{I}_b$, $\vec{I}_c$.

6. Анализ. Вектор тока I_c попадает в зону работы реле, реле работает. При токе I_a реле *K* защиты ЗЗП-1 не работает. При подаче тока I_b реле не работает, так как вектор I_b совпадает с линией нулевых моментов, напряжение на реле *K* недостаточно для срабатывания.

Вывод. Защита ЗЗП-1 включена правильно.

7. С соблюдением правил техники безопасности восстанавливают нормальную схему трансформатора напряжения. Из окна ТТНП удаляют проводник или оставляют его постоянно для испытаний защиты.

8. Если резистор *R* (рис. 5-105, *б*) искажает напряжения $3U_0$ более чем на 10 % и фазу более чем на 5°, решают вопрос о замене резистора *R* аналогичной по назначению трехфазной батареей конденсаторов; емкостный ток фазы батареи при номинальном напряжении 0,3 А.

5-27. ПРОВЕРКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

Общие указания. Цепи тока дифференциальных защит предварительно проверяют в соответствии с указаниями, приведенными в § 5-23 (кроме испытания первичным током).

Проверку токовых цепей дифференциальных защит производят, как правило, током нагрузки первичной цепи при рабочем напряжении. С целью ускорения сдачи оборудования в эксплуатацию, сокращения продолжительности испытаний при рабочем напряжении и предотвращения аварийных ситуаций необходима возможно более полная проверка защиты до включения под нагрузку. Предварительную проверку токовых цепей выполняют током короткого замыкания от постороннего трехфазного или однофазного источника, от мощности которого зависят результаты и методы проверки.

При наличии мощного постороннего источника ток к. з. соизмерим с номинальным током испытуемой цепи, а требуемое напряжение постороннего источника (в пределах от 0,4 до 6—10 кВ) зависит от мощности испытуемого электрооборудования. При этом измеряют достоверно при имитации к. з. вне зоны защиты значения и фазы токов не только в плечах дифференциальной защиты, но и в дифференциальной цепи, токи и напряжения в исполнительных органах дифференциальных реле. Измерения ведут по обычной методике прибором ВАФ-85М, данные измерений близки к результатам, получаемым при проверке током нагрузки. Зачастую не требуется последующей проверки током нагрузки. Однако во многих случаях для осуществления проверки током к. з. от мощного источника (например, от силового трансформатора) требуется прокладка временной кабельной линии, что не всегда осуществимо.

Быстро и с малыми трудозатратами выполняют проверку током к. з. от постороннего источника малой мощности; для проверки требуется трехфазное напряжение 380 В, а ток к. з. не превышает при этом нескольких десятков ампер, т. е. составляет 5—10 % номинального тока испытуемой цепи. При этом в большинстве случаев для увеличения чувствительности прибора ВАФ-85М в рассечку разъемного зажима проверяемой цепи включают провод, которым наматывают 10—15 витков на клещи прибора (с соблюдением полярности). Испытанием малым током возможно исследовать векторные соотношения токов плеч дифференциальной защиты, но невозможно определить состояние дифференциальных цепей и правильность выравнивания м. д. с. дифференциальных реле при имитации к. з. вне зоны защиты. Поэтому указанная проверка лишь частично заменяет проверку под нагрузкой.

Проверку токовых цепей дифференциальной защиты током к. з. от постороннего источника выполняют в следующем строго обязательном порядке.

1. При имитации к. з вне зоны защиты:

а) проверяют обтекание током цепей путем измерения значений токов в фазных, нулевых и дифференциальных проводах; указанную проверку выполняют первой по порядку и с возможно большей скоростью с целью сокращения продолжительности предполагаемого разомкнутого состояния вторичных цепей трансформаторов тока;

б) измеряют токи (напряжения) небаланса исполнительных органов дифференциальных реле;

в) снимают векторные диаграммы токов в фазных, нулевых проводах плеч защиты.

2. Имитацию к. з. в зоне защиты рекомендуется выполнять поочередным снятием крышки испытательного блока каждого плеча дифференциальной защиты, а при отсутствии испытательных блоков — закорачиванием, отсоединением и заземлением только одного плеча защиты на разъемных зажимах цепей тока. Менее желательным является перенос закоротки в зону защиты. Измерения выполняют в том же порядке, как при имитации к. з. вне зоны.

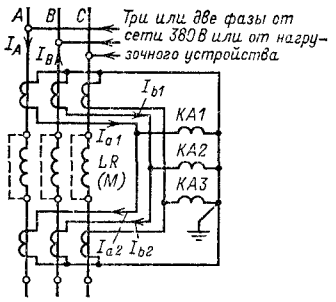


Рис. 5-106. Схема проверки дифференциальной защиты линии (электродвигателя) током к. з. от постороннего источника.

Проверка продольной дифференциальной защиты кабельных линий и электродвигателей. Проверку производят током к. з. по схеме рис. 5-106 при поочередном подключении нагрузочного устройства к фазам защиты *AB, BC, CA*. При испытании фаз *AB* токи в плечах защиты должны быть $I_{a1} = I_{b1} = I_{a2} = I_{b2} = I_A/n_т$, токи небаланса в цепях реле *KA1, KA2* примерно равны нулю. С целью снижения мощности нагрузочного устройства рекомендуется шунтировать пофазно обмотки реактора *LR* линии или обмотки электродвигателей *M*.

С целью снижения тока небаланса в дифференциальной цепи при пусках электродвигателей и внешних к. з. рекомендуется уравнивать активные сопротивления проводов плеч дифференциальной защиты.

Проверка дифференциальной защиты шин и направленной поперечной дифференциальной защиты двух параллельных линий. Проверку током к. з. от постороннего трехфазного (или однофазного) источника защит протяженных объектов, содержащих более одного выключателя, выполняют при отсутствии напряжения на шинах РУ следующим образом.

1. Производят проверку первичным током вторичных цепей трансформаторов тока одного из выключателей РУ, желательно от трехфазного постороннего источника (например,

от трансформатора собственных нужд). При проверке дифференциальной защиты шин таким выключателем является обходной или шиносоединительный. Снимают векторные диаграммы токов в указанных цепях.

2. Соединяют последовательно два выключателя — тот, цепи которого проверены ранее, и любой другой. Испытывают первичную цепь трехфазным (или при сочетаниях фаз *АВ, ВС, СА* однофазным) током по схеме рис. 5-107 со снятием векторных диаграмм и измерением токов небаланса в дифференциальных цепях.

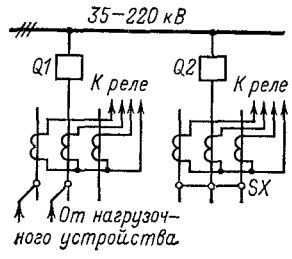


Рис. 5-107. Схема проверки дифференциальной защиты шин или поперечной дифференциальной защиты двух параллельных линий.

3. Переносят закоротку за третий выключатель и проверяют цепи дифференциальной защиты так же, как по предыдущему пункту.

Таким образом проверяют цепи тока всех выключателей РУ.

При последовательном соединении двух выключателей по схеме рис. 5-107 ток дифференциальной цепи защиты шин должен быть примерно равен нулю, а для поперечной дифференциальной защиты двух линий — удвоенному току фазы плеча защиты.

В схеме дифференциальной защиты двойной системы шин шиносоединительный выключатель должен быть снабжен двумя комплектами трансформаторов тока — по одному для дифференциальной защиты каждой системы шин. Цепи тока дифференциальной защиты первой системы шин не должны соединяться в пределах РУ с цепями тока защиты второй системы шин, поэтому должны быть разобщены между собой токовые цепи указанных двух комплектов трансформаторов тока, в том числе их нулевые провода. Соединение токовых цепей защит первой и второй систем шин должно быть выполнено на панели дифференциальной защиты шин после избирательных органов. При соблюдении этих условий можно без ошибок выполнить рассмотренную проверку цепей дифференциальной защиты шин.

Проверку направленности реле мощности направленной поперечной дифференциальной защиты двух линий выполняют при поочередной подаче в дифференциальную цепь тока каждой из двух линий либо путем отключения второй (первой) линии, либо поочередным снятием крышек испытательных блоков плеч защиты — током нагрузки при рабочем напряжении. Проверку ведут в соответствии с указаниями, приведенными в § 5-26. Зону работы реле определяют на векторной диаграмме в каждом случае для того контакта реле, который разрешает отключение линии, током которой проверяют направленность защиты.

Проверка дифференциальной защиты силовых трансформаторов. Осуществляется током к. з. от постороннего источника симметричного трехфазного тока (обычно от трансформатора собственных нужд по временной кабельной линии); уравнительными токами двух трансформаторов, включенных в сеть параллельно, если нагрузка мала или отсутствует; токами нагрузки испытуемого силового трансформатора.

1. Для проверки током к. з. от постороннего источника симметричного трехфазного тока со стороны низкого напряжения на три фазы трансформатора накладывают закоротку вне зоны дифференциальной защиты, а на обмотку высокого напряжения подают напряжение $U_п$ от постороннего источника питания, например трансформатора собственных нужд. Через трансформатор будет проходить ток, А,

$$I_{исп} = I_н \frac{U_п \cdot 100}{U_н U_к \%},$$

где $I_н$, $U_н$ — номинальный ток, А, и напряжение, В, испытуемого трансформатора; $U_к\%$ — напряжение к. з. трансформатора.

Необходимую мощность трансформатора собственных нужд подсчитывают по формуле, В·А,

$$S_{с.н} = P_н \frac{100}{U_к \%} \left(\frac{U_{с.н}}{U_н}\right)^2,$$

где $P_н$ — номинальная мощность испытуемого трансформатора, В·А; $U_{с.н}$ — номинальное напряжение обмоток трансформатора собственных нужд, В.

Воздействием на устройство РПН можно изменять в широких пределах сопротивление к. з. трансформатора и ток к. з. (табл. 5-37 и 5-38).

Проверку дифференциальной защиты трансформатора 220—110/6 или 220—110/10 кВ можно осуществить от источника с номинальным напряжением 6 или 10 кВ [при этом напряжение подается на обмотку 220 (110) кВ трансформатора] или от источника напряжением 380 В (напряжение подается на обмотку 6 или 10 кВ).

Для проверки защит трансформатора уравнительным током двух трансформаторов, включенных параллельно, переключатели ответвлений обмоток трансформаторов устанавливают в разные положения. Между трансформаторами возникает уравнительный ток, который определяется по выражению

$$I_{ур} = \frac{U_1 - U_2}{\frac{U_{к1}\% U_1}{100 I_{н1}} + \frac{U_{к2}\% U_2}{100 I_{н2}}},$$

где U_1 — напряжение стороны 6 (10) кВ первого трансформатора; U_2 — то же второго трансформатора; $U_{к1}\%$ — напряжение короткого замыкания первого трансформатора, %; $U_{к2}\%$ — то же второго трансформатора, %; $I_{н1}$ — номинальный ток первого трансформатора, А; $I_{н2}$ — то же второго трансформатора, А.

Таблица 5-37

Сопротивления к. з. силовых двухобмоточных трансформаторов

Тип трансформатора	$U_к$, %	Сопротивление к. з. со стороны ВН, Ом	Пределы РПН, %	Номинальный ток обмотки ВН, А
ТМН-6300/35	7,5	22,6—13,6	±9	88—103
ТРДНС-25000/35	9,5	13,5—8,7	±9	350—420
ТРДНС-32000/35	11,5	12,7—8,2	±9	440—530
ТРДНС-40000/35	11,5	10,2—6,6	±9	550—600
ТРДНС-63000/35	11,5	6,45—4,2	±9	880—1040
ТМН-2500/110	10,5	763—380	±16	10,5—14
ТМН-6300/110	10,5	299—143	±16	27—37
ТДН-10000/110	10,5	198—81	±16	44—60
ТДН-16000/110	10,5	150—73,5	±16	69—95
ТРДН-25000/110	10,5	117—57	±16	110—150
ТРДН-32000/110	10,5	115,6—57	±16	140—192
ТРДН-40000/110	10,5	91,6—44,7	±16	175—240
ТРДН-63000/110	10,5	60,4—32	±16	267—380
ТРДЦН-63000/110	10,5	60,4—32	±16	267—380
ТРДЦН-80000/110	10,5	46,3—22,8	±16	355—490
ТРДНГ-32000/220	12	492—287	±12	70—90
ТРДЦНГ-63000/220	12,2	252—148	±12	138—180

Таблица 5-38

Сопротивления к. з. силовых трехобмоточных трансформаторов

Тип трансформатора	$U_к$, %		Сопротивление к. з. со стороны ВН, Ом		Пределы РПН, %	Номинальный ток обмотки ВН, А
	ВН—НН	ВН—СН	ВН—НН	ВН—СН		
ТМТН-6300/110	17	10,5	495—255	298,7—149	±16	27—37
ТДТН-10000/110	17	10,5	312—155	194—93	±16	44—60
ТДТН-16000/110	17	10,5	185—96	112—55	±16	65—95
ТДТН-25000/110	17	10,5	116—61	68,5—35	±16	110—150
ТДТН-25000/110-71-У1	12,6	20,5	86—44	134,6—68	±16	110—150
ТДТН-40000/110	17	10,5	75—39	44—21,6	±16	175—240
ТДТН-63000/110	17	10,5	50,5—24,4	27,4—13,7	±16	260—380
ТДТН-80000/110	17	10,5	36,8—19,2	21,6—10,7	±16	355—420

Проверку дифференциальных защит трансформаторов с помощью уравнительных токов выполняют после фазировки трансформаторов и включения их на параллельную работу; допустимость такого включения трансформаторов потребительских подстанций должна быть подтверждена расчетами электродинамической и термической стойкости электрооборудования. Для указанного режима, если необходимо, выполняют специальные уставки устройств релейной защиты питающих линий высокого напряжения, силовых трансформаторов и всех выключателей, обтекаемых уравнительным током.

Переключателями ответвлений фаз первичных обмоток трансформаторов устанавливают значение уравнительного тока, достаточное для снятия векторных диаграмм дифференциальных защит трансформаторов с измерениями токов небаланса.

Снятие векторной диаграммы токов при испытании любым из перечисленных способов выполняют так, как описано ниже.

1. Составляют исполнительную трехлинейную схему токовых цепей трансформатора с указанием маркировки и полярностей для исключения ошибок при снятии векторных диаграмм (рис. 5-108, *а*).

2. Подготовляют многопредельный прибор — вольтамперметр (например, типа Ц-4312), прибор ВАФ-85М и подключают к нему токоизмерительные клещи.

3. Если трансформатор включен в сеть, создают режим нагрузки для снятия векторных диаграмм при токе, возможно более близком к номинальному, но не менее $0{,}2\,I_н$.

4. Немедленно после включения трансформатора в сеть или на напряжение постороннего источника проверяют прибором ВАФ-85М обтекание током фазных, нулевых проводов токовых цепей в плечах дифференциальной защиты, в дифференциальных цепях, в цепях других трансформаторов тока.

5. Напряжение небаланса на обмотке исполнительного органа каждого дифференциального реле измеряют прибором Ц-4312 или другим аналогичным прибором с внутренним сопротивлением не менее 100 Ом. Напряжение

небаланса должно быть не более 0,2 В при номинальной нагрузке.

Ток небаланса измеряют миллиамперметром с внутренним сопротивлением 0,5—1 Ом. Этому требованию соответствует прибор ВАФ-85М на пределе «мА». Измеряемый ток подводится к зажимам «мА» прибора. Ток небаланса в обмотке исполнительного органа каждого дифференциального реле должен быть 2—10 мА (при номинальном токе).

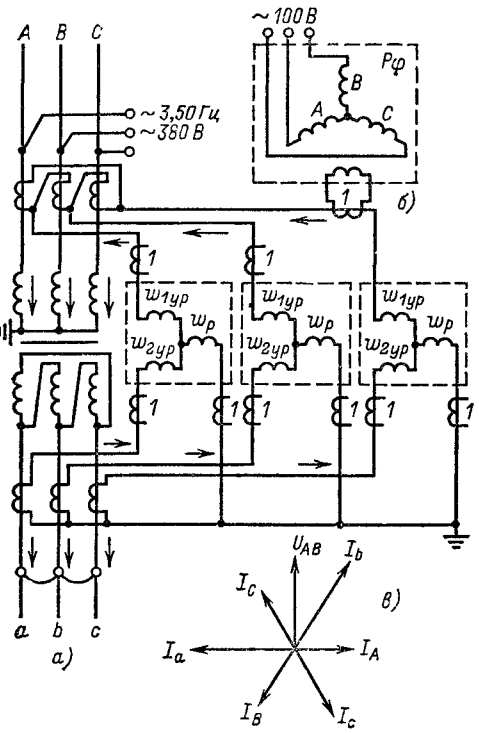


Рис. 5-108. Проверка дифференциальной защиты трансформатора.

а — схема цепей тока защиты; *б* — схема включения прибора ВАФ-85 м; *в* — векторная диаграмма токов дифференциальной защиты трансформатора; *1* — измерения прибором ВАФ-85М.

6. К прибору ВАФ-85М подключают три фазы цепей напряжения, синхронного с напряжением проверяемого трансформатора, проверяют чередование фаз и симметрию напряжений.

7. Измеряют значение и фазу токов в фазных и нулевых проводах токовых цепей в плечах дифференциальной защиты, в дифференциальных цепях. Начало первичной обмотки клещей ВАФ-85М при измерении направляют в сторону трансформаторов тока.

8. При поочередном исключении токов плеч дифференциальной защиты, как указано в начале настоящего параграфа, измеряют токи в дифференциальных реле.

9. Векторную диаграмму строят в необходимом по точности масштабе. На диаграмме проверяют: симметричность векторов тока, совпадение чередования векторов тока с чередованием векторов напряжения, противоположность направления токов в плечах одного реле (рис. 5-108, *в*). За счет погрешностей трансформаторов тока и приборов, несимметрии нагрузки, неравенства коэффициентов трансформации трансформаторов тока вероятны отклонения векторов от расчетных значений, которые анализируют в каждом случае.

Данные измерений заносят в протокол наладки.

5-28. НОВЫЕ РЕЛЕ

Общие замечания. В 11-й пятилетке осваиваются в серийном производстве новые реле преимущественно с применением новой для релестроения элементной базы· интегральных микросхем (например, типа К176), операционных усилителей и исполнительных органов — герконов и промежуточных реле новой конструкции РП-13. Реле содержат также схемы на кремниевых транзисторах новых серий. Выпуск аналогичных по назначению электромеханических реле будет постепенно уменьшаться.

Источниками питания схем реле являются параметрические стабилизаторы напряжения, питаемые напряжением постоянного или переменного тока, или специальные малогабаритные блоки питания и стабилизации от цепей измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Новые реле в среднем занимают на панели площадь в 1,5—2 раза меньшую, чем их электромеханические аналоги, имеют в среднем в 3 раза меньший объем, в 2 раза меньшую массу (см. § 5-17 — сравнение нового реле РТЗ-51 с выпускавшимся ранее аналогичным реле РТЗ-50). Температурный диапазон большинства новых реле —40÷+55 °С (для электромеханических реле —20÷+45 °С). Потребление мощности новых реле от трансформаторов тока, напряжения и по цепям питания в 10—100 раз меньше, чем у электромеханических. Новые реле обладают повышенной точностью, более широкими функциональными возможностями, более высокой помехоустойчивостью. Освоение их в эксплуатации приведет к снижению трудозатрат на обслуживание устройств релейной защиты при повышении надежности.

Реле времени РВ-01 и РВ-03. Реле времени РВ-01 (см. § 5-8) аналогичны по назначению электромеханическим реле серии РВ-100 и реле типов РВ-217, РВ-218, РВ-227, РВ-228, РВ-237, РВ-238, РВ-247, РВ-248. Реле времени РВ-03 аналогичны по назначению электромеханическим реле РВ-215, РВ-225, РВ-235, РВ-245.

Реле РВ-03 управляется снятием напряжения питания. При включении напряжения питания срабатывают три выходных реле схемы РВ-03 без нормируемой выдержки времени. Выпрямленное, но несглаженное пульсирующее напряжение подается на две одинаковые схемы задержки, подготавливая их к пуску. При отключении напряжения питания первое выходное реле возвращается в исходное положение без нормируемой выдержки времени, а второе и третье выходные реле не возвращаются. Времязадающие конденсаторы разряжаются на резисторы, сопротивления которых соответствуют рабочим уставкам реле. При

снижении напряжения на конденсаторах ниже определенного значения срабатывают транзисторные пороговые схемы, обеспечивающие возврат второго и третьего выходных реле с установленными выдержками времени.

Напряжение переменного оперативного тока 100, 127, 220 и 380 В, частота 50 или 60 Гц. Выдержка времени 0,15—3 с, 0,5—10 с, 1—20 с.

Исполнительные контакты: без нормируемой выдержки времени — один переключающий, с первой регулируемой выдержкой времени — один размыкающий, со второй независимо регулируемой выдержкой времени — один размыкающий.

Длительно потребляемая мощность реле не более 3 В·А.

Реле повторного включения РПВ-01 и РПВ-02. Применяются в схемах АПВ и обеспечивают однократное и двукратное действие соответственно. Реле заменяют электромеханические реле РПВ-58, РПВ-69Т и РПВ-258.

Номинальное напряжение оперативного тока 220 или 110 В. Номинальный ток удерживающей обмотки 0,25; 0,5; 1; 2,5 и 4 А. Способ регулировки уставки — дискретный, суммирование интервалов. Потребляемая мощность в длительном режиме при номинальном напряжении питания: в режиме ожидания не более 5,5 Вт, в режиме срабатывания не более 7 Вт. Диапазоны выдержек времени на включение 0,5—10 с (РПВ-01 и первое включение РПВ-02), 5—100 с (РПВ-02 — второе включение). Время повторной готовности после каждого цикла 15—60 с у РПВ-01 и 30—120 с у РПВ-02. Реле построено на базе элементов К176, содержит: операционный усилитель, используемый в качестве генератора колебаний регулируемой частоты; счетчик импульсов высокой частоты (эти два элемента образуют орган измерения выдержки времени); герконы; реле РП-13; светодиоды (индикаторы срабатывания); транзисторы. Выдержки времени изменяются подбором параметров *RC*-цепи генератора. Выходные цепи реле РПВ-01, РПВ-02 гальванически не связаны с основными цепями схемы реле. Внешние цепи реле РПВ-01, РПВ-02 функционально идентичны внешним цепям электромеханических реле повторного включения.

Реле тока РТФ-08 и РТФ-09 обратной последовательности предназначены для защиты различных электроустановок при несимметричных к. з. Реле заменят электромеханические реле РТФ-1 и РТФ-7. Номинальное напряжение оперативного тока 220 и 110 В. Номинальная частота 50 или 60 Гц. Способ регулирования уставок — дискретный. Реле реагируют на составляющую обратной последовательности в токах защищаемого оборудования, выделяемую с помощью активно-емкостного фильтра. Реагирующие органы реле выполнены с использованием операционных усилителей по схеме определения относительной длительности превышения входной величины над опорным напряжением. Реле РТФ-09 содержит два канала различной чувствительности; во входной цепи реагирующего органа чувствительного канала установлен фильтр, подавляющий третью и пятую гармоники с кратностью не менее четырех.

Статические реле направления мощности серии РМ. В реле суммируются интервалы совпадения положительных знаков с интервалами совпадения отрицательных знаков тока и напряжения. Схема реле содержит три транзистора, один операционный усилитель, реле РП-13, герконовое реле РПГ-5.

Реле предназначены для применения в качестве элементов направления мощности в схемах релейной защиты. Номинальное напряжение 100 В, номинальный ток 5 или 1 А. Характеристические углы ($\varphi_{м,ч}$) —30 и —45 или +70°. Мощность срабатывания реле колеблется в зависимости от $\varphi_{м,ч}$ и уставок чувствительности от 5 до 0,5 В·А. Потребляемая мощность в цепи тока не более 1 В·А, в цепи напряжения не более 2 В·А. Потребление в цепи питания при $U_н$=220 В не более 7,5 Вт. Коэффициент возврата не менее 0,85. Чувствительность реле с $\varphi_{м,ч}$=70° к высшим гармоническим составляющим в цепях тока и напряжения снижена не менее чем в 3 раза по сравнению с чувствительностью к основной гармонике.

Реле не срабатывает при подаче и снятии мощности при любых временных сочетаниях в подаче — снятии переменного тока до 30 А и напряжения до 115 В, а также при подаче и снятии оперативного питания при изменении угла между измеряемыми напряжением и током от 10 до 130° при рабочей зоне 180°.

Проверка новых реле. Реле выпускаются с завода настроенными, поэтому проверка реле включает в себя известные проверки некоторых элементов (фильтров, исполнительных органов), проверку работоспособности, проверку на рабочих уставках при напряжениях оперативного тока $U_н$ и 0,8 $U_н$.

Унифицированная система цоколей и оболочек СУРА. Для новых реле разработана унифицированная система цоколей и оболочек СУРА.

В системе СУРА предусмотрены штепсельные исполнения реле для переднего и заднего присоединения проводов. Система построена на базе унифицированного ряда цоколей и кожухов. Цоколи и кожухи имеют четыре габарита по ширине, кратные 65 мм. У всех габаритов цоколей установочный размер по вертикали равен 125 мм, по горизонтали — кратен 11. Цоколь первого габарита предназначен для установки реле, у которого имеются цепи напряжения и токовые. Контактный узел цепей напряжения включает в себя контактный нож, а токовых цепей — резьбовую втулку. На цоколе предусмотрены два ряда отверстий — левый для установки контактных ножей и правый — для резьбовых втулок.

Для реле без токовых цепей оба ряда отверстий предназначены для контактных ножей. Всего в одном ряду имеется 11 отверстий для контактных ножей или 8 отверстий для резьбовых втулок. Цоколь второго габарита имеет два исполнения по количеству контактных отверстий: с одним рядом для контактных ножей и одним рядом для резьбовых втулок, с тремя рядами для контактных ножей. Предусмотренное количество контактных отверстий достаточно для размещения любого реле защиты. В цоколях имеется сетка квадратных отверстий, через которые крепятся составные элементы реле. Все отверстия в цо-

коле закрыты тонкими перемычками, которые пробиваются при необходимости использования какого-либо из отверстий. Все контактные узлы системы СУРА предназначены для бескольцевого присоединения внешних проводов. Замена в контактных узлах цепей напряжения резьбовых втулок контактными ножами позволила увеличить количество выводов в одном вертикальном ряду и дала экономию цветных металлов.

У реле РВ-01, РВ-03, РПВ-01, РТЗ-51 цоколь первого габарита, а кожух второго (по высоте) габарита. Реле РТФ-8, РТФ-9, РПВ-02 собраны на цоколе второго габарита и защищены кожухом второго габарита.

Внедрение системы СУРА позволит значительно сократить количество деталей, применяемых для изготовления реле защиты. Применение штепсельного исполнения позволит уплотнить монтаж аппаратуры.

В оболочках СУРА выпускаются новые промежуточные реле РП-16, РП-17, РП-18 (вместо РП-23, РП-220, РП-250).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5-1. **Федосеев А. М.** Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976—560 с.

5-2. **Реле** защиты/В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов. — М.: Энергия, 1976—464 с.

5-3. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка и А. П. Хечумяна. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.

5-4. **Сборник** руководств по наладочным работам (М-во монт. и спец. строит. работ СССР. Главэлектромонтаж), — М.: Энергия, 1975.—312 с.

5-5. **Сборник** директивных материалов по эксплуатации энергосистем (электротехническая часть). — 2-е изд. — М.: Энергоиздат, 1981.—632 с.

5-6. **Инструкция** по проверке и эксплуатации дифференциальных реле серии ДЗТ (М-во энергетики и электрификации СССР. Главтехуправление по эксплуатации энергосистем. ОРГРЭС). — М.: СПО ОРГРЭС, 1975.—40 с.

5-7. **Инструкция** по проверке и регулировке реле направления мощности серий РБМ и ИМБ (М-во энергетики и электрификации СССР. Главтехуправление по эксплуатации энергосистем. ОРГРЭС). — М.: СПО ОРГРЭС, 1976.—40 с.

5-8. **Расчеты** устройств питания аппаратуры релейной защиты и автоматики подстанций на выпрямленном оперативном токе (М-во энергетики и электрификации СССР. Главнипроект. Энергосетьпроект. Горьковское отделение.) — Горький: Энергосетьпроект, 1977.—64 с.

5-9. **Инструкция** по наладке и проверке реле частоты РЧ-1 (М-во энергетики и электрификации СССР. Главтехуправление по эксплуатации энергосистем. ОРГРЭС). — М.: СПО ОРГРЭС, 1976. — 36 с.

5-10. **Защита** от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1 (описание, наладка и эксплуатация) (М-во энергетики и электрификации СССР. Главтехуправление по эксплуатации энергосистем. ОРГРЭС). — М.: Энергия, 1972.—73 с.

5-11. **Вавин В. Н.** Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. — М.: Энергия, 1977. — 105 с.

5-12. **Дмитриенко А. М., Линт М. Г.** Дифференциальная защита трансформаторов ДЗТ-21. — В кн.: Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения, 1979, вып. 3. с. 7—10.

5-13. **Информэлектро.** Каталоги № 07.30.03—80, 07.30.04—80, 07.30.05—80, 07.32.01—80, 07.32.02—80, 07.32.03—80, 07.32.04—80.

5-14. **Ясвен П. И., Маркелов А. А.** Унифицированная система цоколей и оболочек СУРА. — В кн.: Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения, 1978, вып. 6. с. 1—3.

5-15. **Справочник** по проектированию электроснабжения/Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. — 3-е изд.— М.: Энергоиздат, 1981.—456 с.

5-16. **Статические** реле направления мощности серии РМ/М. С. Лямец, Г. С. Нудельман, В. М. Шевцов и др. — Электрические станции, 1982, № 5, с. 55—80.

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

АППАРАТЫ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

А. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕРКЕ

6-1. ПРОВЕРКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Все электрические аппараты напряжением до 1000 В перед вводом в эксплуатацию должны пройти ревизию механической части, испытание электрической прочности изоляции и параметров срабатывания.

Проверка сопротивления изоляции производится на полностью подготовленном оборудовании. Как правило, испытывают изоляцию целого присоединения, т. е. группы электрически взаимосвязанных аппаратов с проводками.

Измерение сопротивления изоляции аппаратов на напряжение до 1000 В производится с помощью мегаомметра на напряжение 500—1000 В. Сопротивление изоляции аппартов с номинальным напряжением 24 и 48 В измеряется мегаомметром на напряже-

ние 250 В; сопротивление изоляции блоков с полупроводниковыми приборами проверяется мегаомметром на напряжение 100 В, при этом диоды, транзисторы и другие полупроводники должны быть зашунтированы.

Согласно § 1-8-34 ПУЭ сопротивление изоляции одного присоединения вторичных цепей управления, защиты, сигнализации в релейно-контакторных схемах должно быть не менее 0,5 МОм; цепи управления, защиты и возбуждения машин постоянного тока со всеми установленными аппаратами, присоединенными к цепям главного тока, должны иметь сопротивление изоляции не менее 1 МОм.

Аппаратура с цепями бесконтактных схем систем регулирования и управления должна иметь сопротивление изоляции в соответствии с данными заводов-изготовителей.

Если при испытании выявляется неудовлетворительная изоляция, необходимо разобщить испытуемое присоединение на более мелкие группы и замерять сопротивление изоляции отдельно у каждой группы для отыскания элемента схемы с пониженной изоляцией.

Аппаратура с пониженной изоляцией, как правило, заменяется; в случаях увлажнения изоляция улучшается сушкой горячим воздухом или прямым подогревом током (методы измерений сопротивления изоляции и применяемые приборы — см. разд. 3 настоящего справочника).

6-2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТУШЕК ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Измерение производится с целью проверки его соответствия напряжению питающей сети. При вводе в эксплуатацию новой аппаратуры измерение производится выборочно. Сравниваются результаты измерений сопротивления катушек одинаковых аппаратов. Отклонения от номинала обычно не должны превышать ± 10 %.

Измерение сопротивления постоянному току катушек производится также во всех сомнительных случаях: при отсутствии на катушке маркировки, несоответствии обозначенного ее рабочего напряжения проектному и т. п.

6-3. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

Электрическая прочность изоляции аппаратов проверяется повышенным напряжением 1000 В переменного тока промышленной частоты в течение 1 мин. Испытание производится совместно со схемами вторичных цепей. Перед испытанием необходимо отсоединить элементы схемы, не рассчитанные на приложение к ним испытательного напряжения. Отключенные аппараты при необходимости испытывают отдельно.

До приложения к схеме повышенного напряжения необходимо детально изучить испытательную схему, чтобы не подать повышенного напряжения на участки схемы, которые не должны испытываться. Испытание больших разветвленных схем производится частями, по участкам, однако чрезмерно увеличивать число участков не рекомендуется.

Испытание электрической прочности изоляции аппаратов повышенным напряжением и методика проведения испытаний приведены в разд. 3 настоящего справочника. Измерение испытательного напряжения должно производиться вольтметром непосредственно на стороне высокого напряжения или от специальной вольтметровой обмотки испытательного трансформатора.

Аппаратура и монтажные провода схемы считаются выдержавшими испытание, если не произошло пробоя изоляции, перекрытия по поверхности, скользящих разрядов или резкого снижения показаний вольтметра.

При отсутствии испытательного оборудования допускается заменять испытание повышенным напряжением измерением сопротивления изоляции мегаомметром на напряжение 2500 В в течение 1 мин. Испытание мегаомметром 2500 В следует считать успешным в том случае, если испытываемый участок схемы и аппаратура имеют сопротивление изоляции не менее 30—50 МОм, так как при сопротивлении изоляции участка менее указанного мегаомметр не обеспечит необходимого значения испытательного напряжения вследствие малой мощности его генератора. Если при испытании мегаомметром 2500 В результат неудовлетворителен, то испытание 1000 В переменным током обязательно.

6-4. ПРОВЕРКА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ

Измерение геометрических размеров аппартов производится для того, чтобы проконтролировать правильность сочленения аппарата и его привода. Проверяемыми параметрами являются: раствор контактов, начальное и конечное нажатие, провал контактов.

Раствор контактов измеряют при разомкнутых контактах с помощью щупов, шаблонов, а также линейкой или штангенциркулем. Наиболее удобно пользоваться для этой цели специально изготовленными для каждого типа аппарата шаблонами, представляющими собой бруски трапецеидального сечения, изготовленные из изоляционного материала или металла, у которых толщина одного конца соответствует минимально допустимому раствору контакта, а другого — максимальному. Первый конец шаблона должен свободно проходить между контактами, а второй — не проходить совсем или входить в этот зазор с усилием, плотно соприкасаясь с контактными поверхностями.

В случае расхождения значений раствора контактов с требуемыми техническими данными он должен быть отрегулирован. Способы регулирования раствора контактов определяются конструкцией аппарата и указываются в соответствующих инструкциях по их эксплуатации.

Начальное нажатие контактов и провал необходимы для устранения повторных разрывов коммутируемой цепи при вибрации якоря в момент включения аппарата. Чрезмерное начальное нажатие может привести к нечеткому срабатыванию аппарата и застреванию его в промежуточном положении, недостаточ-

ное нажатие — к оплавлению и привариванию контакта.

Начальное нажатие контактов определяют пружинным динамометром при отключенном положении аппарата по усилию, с которым надо оттянуть подвижный контакт до освобождения зажатой между контактом и его упором полоски тонкой бумаги. Пружину динамометра необходимо растягивать в направлении, перпендикулярном начальному касанию контакта. Показание динамометра в момент освобождения бумаги соответствует начальному нажатию контакта

Конечное нажатие характеризует давление контактов при включенном аппарате. Соответствие конечного нажатия контактов табличным данным возможно только для новых контактов (по мере их износа — в контакторах — конечное нажатие будет уменьшаться). Оно также подтверждает правильность сборки аппарата и его сочленения с приводом.

Конечное нажатие контактов измеряется при полностью включенном аппарате динамометром; только в этом случае полоска тонкой бумаги закладывается между контактами, а контакт оттягивается в направлении, перпендикулярном его поверхности в месте касания.

Начальное и конечное нажатие контактов регулируется по наибольшим значениям паспортных данных аппарата с тем, чтобы после износа контакта оно не стало ниже допустимых значений. При правильно отрегулированных нажатиях степень износа контактов определяется значением провала.

Провал главных контактов аппарата необходим для устранения явления «сваривания» контактов и образуется в период между начальным и конечным нажатием контактов при перекате подвижного контакта по неподвижному. Если в результате износа контактов провал окажется меньше допустимого, контакты должны быть заменены новыми.

Провал вспомогательных контактов необходим для устранения явления «отскакивания» контакта вследствие вибрации якоря при включении аппарата. Значение провала вспомогательных контактов контролируется визуально и может быть измерено непосредственно.

6-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ АППАРАТОВ

Значения величин срабатывания электромагнитных аппаратов должно определяться после их окончательной регулировки, замера нажатий, раствора и провала контактов, измерения сопротивления катушек постоянному току в холодном состоянии.

Напряжение срабатывания нормируется для нагретых катушек ($U_г$), а его измерение производится, как правило в холодном состоянии ($U_{хол}$). Поэтому в полученное значение напряжения срабатывания должна быть внесена соответствующая поправка (Δ) $U_г = U_{хол} + \Delta$.

Для обмоток из меди

$$U_г = U_{хол}\left(1 + \frac{235 + \theta_г}{235 + \theta_{хол}}\right);$$

для обмоток из алюминия

$$U_г = U_{хол}\left(1 + \frac{245 + \theta_г}{245 + \theta_{хол}}\right),$$

где $U_г$ — напряжение срабатывания нагретого аппарата; $U_{хол}$ — то же холодного аппарата; $\theta_г$, $\theta_{хол}$ — соответственно температура нагретого и холодного аппарата. Значение $\theta_{хол}$ принимается равным температуре окружающей среды, которая определяется как среднее арифметическое показаний нескольких термометров, расположенных в радиусе 1—2 м от аппарата; $\theta_г$ принимается равной 70 °С, т. е.

$$U_г = U_{хол}\left(1 + \frac{305}{235 + \theta_{хол}}\right).$$

Для аппаратов постоянного тока напряжение (ток) срабатывания определяют дважды при различной полярности на катушке, если не предусмотрена работа аппарата только при одной полярности.

Значение напряжения (тока) срабатывания определяется как среднее арифметическое из результатов трех-четырех измерений.

Время срабатывания аппарата определяется с помощью электрических или электронных секундомеров.

При включении электромагнитных аппаратов переменного тока может возникнуть вибрация магнитопровода, которая выражается в сильном гудении и дополнительном нагреве шихтованного сердечника. В этом случае необходимо проверить наличие неповрежденного короткозамкнутого витка и плотность прилегания якоря к сердечнику магнитопровода. Последнее достигается обеспечением некоторой свободы якоря по отношению к подвижной части аппарата.

Б. КОНТАКТОРЫ

6-6. ПРОВЕРКА КОНТАКТОРОВ

1. **Осмотр контакторов.** Контакторы должны быть очищены от заводской смазки, пыли, грязи и протерты сухой и чистой тряпкой. Проверяется соответствие проекту типа и номинальных данных контактора, целость всех электрических соединений. Подтягиваются ослабленные крепления. Опробывается от руки подвижная система на отсутствие заеданий. Проверяется одновременность замыкания и размыкания главных контактов и правильность действия вспомогательных контактов.

В случае выявления на контактных поверхностях застывших капель меди они зачищаются мелкой стеклянной (но не наждачной)

Таблица 6-1

Основные технические данные контакторов серии МК-1

Тип контактора	Количество главных контактов		Номинальный ток главных контактов, А		Главные контакты			Блокировочные контакты		
	замыкающих	размыкающих	замыкающих	размыкающих	Сила нажатия на мостик, Н	Раствор, мм	Провал, мм	Сила нажатия на мостик, Н	Раствор, мм	Провал, мм
МК1-10	1	—	40	—	4,9—6,86	4—6	2—3	0,69—0,98	5—7	2—3,5
МК1-11	1	1	40	25	4,9—6,86		2—3			
					1,96—2,94		2—4			
МК2-20	2	—	40	—	1,96—6,86		2—3			
МК1-21	2	1	40	25	4,9—6,86		2—3			
					1,96—2,94		2—4			
МК1-22	2	2	25	25	2,94—3,92		2—3			
					1,96—2,94		2—4			
МК1-01	—	1	—	25	1,96—3,92		2—4			
МК1-02	—	2	—	25	1,96—2,94		2—4			
МК1-30	3	—	40	—	4,9—6,86		2—3			

Примечания: 1. Магнитная система контакторов имеет две втягивающие катушки, которые при напряжении цепи управления контактора 24 и 110 В соединяются параллельно, при напряжении 48 и 220 В — последовательно.

2. Собственное время включения контактора 0,05—0,07 с, время отключения 0,04—0,05 с.

3. Потребляемая мощность втягивающих катушек 30 Вт.

бумагой или бархатным напильником. Смазка контактных поверхностей не допускается, так как от дуги она выгорает и продуктами горения загрязняет контактные поверхности, что увеличивает нагрев контактов. При зачистке контактных поверхностей необходимо строго сохранять первоначальную форму (радиус закругления, профиль) контактов для того, чтобы сохранить их необходимое перекатывание. Зачищать надо только капли и наплывы до выравнивания поверхности, но не до выведения раковин.

Контакты должны касаться линейно по всей ширине без просветов, постепенно перекатываясь при замыкании с незначительным скольжением. При эксплуатации это будет способствовать поддержанию их поверхности в хорошем состоянии.

2. **Измерение и регулировка нажатия на контактах.** Проверка растворов, провалов и нажатий главных и вспомогательных контактов производится на мощных и ответственных контакторах; при необходимости осуществляется их регулировка.

Растворы, провалы контактов и давлений на контактах должны соответствовать требованиям табл. 6-1 и 6-2. Раствор *А* и провал *В* главных контактов замеряют шаблоном или нутромером в местах, показанных на рис. 6-1. Для мостиковых вспомогательных контактов эти места даны на рис. 6-2.

Места измерений начального и конечного нажатия главных контактов показаны на рис. 6-3; значения силы нажатий содержатся в табл. 6-1 и 6-2. Начальная сила нажатия на мостик вспомогательного контакта должна быть в пределах 0,58—2,4 Н (большее значение для контакторов больших габаритов), конечная около 3 Н.

Провал контактов определяется путем замера зазора при замкнутых контактах от подвижного контакта до его упора.

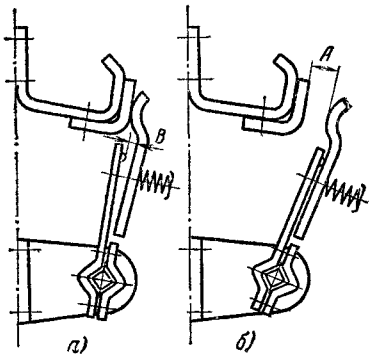


Рис. 6-1. Проверка раствора и провала главных контактов.

а — раствор; *б* — зазор, контролирующий провал.

Регулировка начального нажатия производится изменением начального сжатия (растяжения) встроенной контактной пружины, изменением ее длины за счет изменения числа шайб или регулировочными болтами; в некоторых случаях требуется замена пружины.

Для контакторов с искрогасительными контактами необходимо проверить расстояние между главными контактами в момент касания искрогасительных, для чего якорь магнитной системы контактора от руки медленно подводится к сердечнику до момента соприкосновения искрогасительных контактов. Зазор между главными контактами в этот момент должен быть не менее 1,5 мм.

Таблица 6-2

Основные технические данные контакторов постоянного тока серий КП-7 и КП-207. Номинальный ток 2500 А, номинальное напряжение до 600 В

Тип контактора	Втягивающие катушки		Собственное время, с		Растворы (провалы) контактов, мм			Нажатие на контакт, Н			
								начальное		конечное	
	Напряжение, В	Сопротивление одной катушки, Ом	замыкания	размыкания	главных	дугогасительных	вспомогательных контактов	Главный	Дугогасительный	Главный	Дугогасительный
КП-7	110 220	12,5 50	0,17—0,35	0,08—0,15	19,5—25,5 (5—10)	28,5—36,5 (10,5—15,5)	Не менее 6—8	88,2—118	78,5—118	114—148	126,5—186
КП-207	110 220	4 17	0,25	0,05—0,08							

Примечания: 1. Контакторы могут выполняться со встроенными максимальными реле мгновенного действия, калибруемыми на токи 2500, 3750 и 5000 А.

2. Втягивающие катушки контакторов соединяются между собой последовательно и с экономическим сопротивлением: для КП-7 110 В, 42 Ом; 220 В, 180 Ом; для КП-207 110 В, 30 Ом; 220 В, 105 Ом.

Если это расстояние меньше, то контакты следует заменить или отрегулировать болтовыми соединениями по заводской инструкции.

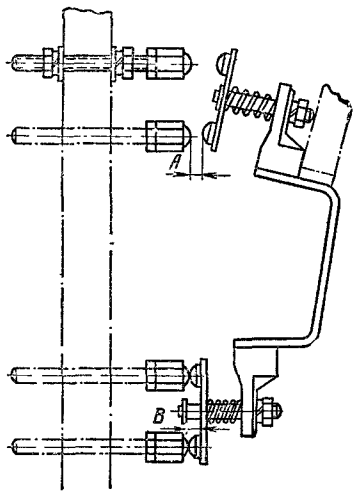


Рис. 6-2. Проверка раствора и провала мостиковых вспомогательных контактов.

А — раствор; *В* — провал.

3 **Проверку напряжения втягивания и отпадания контактов** удобно производить по схемам рис. 6-4. Пакетный выключатель *Q*, шунтирующий вспомогательный контакт контактора *КМ1* при определении напряжения отпадания, должен быть разомкнут. При отсутствии регулировочного автотрансформатора можно воспользоваться трансформаторами 220/36 В, включив их по схеме автотрансформатора (рис. 6-5). При таком включении на катушке контактора напряжение будет равно минимально допустимому рабочему (0,85 $U_н$) сети.

Главной особенностью процесса включения контактора переменного тока является значительное увеличение индуктивности катушки по мере уменьшения воздушного зазо-

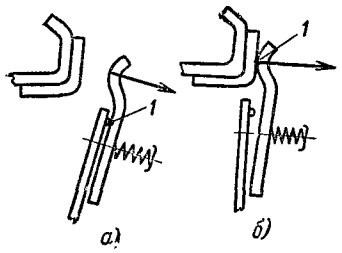


Рис. 6-3. Измерение нажатий главных контактов.

а — начального; *б* — конечного.

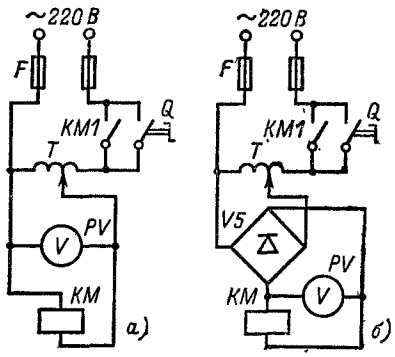


Рис. 6-4. Схемы проверки напряжения втягивания и отпадания контакторов от сетевого напряжения.

а — переменного тока; *б* — постоянного тока.

ра. Общее сопротивление катушки определяется в основном ее индуктивным сопротивлением, и поэтому ток катушки в момент вклю-

чения, когда индуктивное сопротивление мало, в 10—15 раз больше, чем при подтянутом якоре. В отличие от катушек постоянного тока нагрев катушек переменного тока почти не влияет на изменение магнитодвижущей силы и на напряжение втягивания вследствие малого влияния активного сопротивления катушек на ток. Поэтому при испытаниях не вносится поправка на температуру катушек и окружающей среды. По той же причине проверка напряжения втягивания контакторов

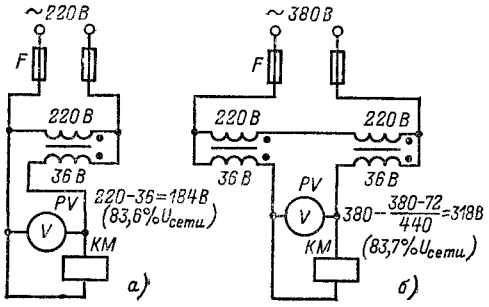


Рис. 6-5. Схема проверки напряжения втягивания контакторов переменного тока с использованием трансформаторов 220/36 В.

а — включение катушки 220 В; *б* — то же 380 В.

переменного тока требует достаточной быстроты выполнения операций во избежание перегрева катушек и регулировочных устройств током включения. Следует помнить также, что при проверке напряжения втягивания от временных маломощных источников оперативного тока возможны в момент включения значительные просадки напряжения и данные о напряжении втягивания оказываются сильно завышенными.

Напряжение втягивания и отпадания контакторов постоянного тока необходимо проверять при нагретой втягивающей катушке до номинально допустимой температуры 70 °С. При измерениях с холодного состояния для уточнения результатов нужно внести поправку на отклонение температуры окружающей среды от 20 °С; каждым ±10 °С соответствует изменение напряжения втягивания на ±2,5—3 % номинального напряжения.

Контакторы должны четко включаться при подаче 85 % номинального напряжения.

Напряжение отпадания контакторов нормами не лимитируется. Оно должно быть замерено и внесено в протокол.

Согласно ПУЭ-76 (§ 1-8-34) проверка напряжения втягивания контакторов не обязательна, а контакторы испытываются многократным включением и отключением пониженным напряжением: на включение 0,9 $U_н$ 5 раз, на отключение 0,8 $U_н$ 10 раз. Это испытание может быть заменено проверкой работы контакторов при комплексном опробовании схем, когда напряжение источника оперативного тока снижается до 80 % номинального. В случае

мальное напряжение втягивания его катушки

4. **Проверка магнитной системы.** При включении катушки контактора переменного тока на номинальное напряжение может появиться сильное гудение контактора, что указывает на неисправность его магнитной системы. Для устранения неисправности магнитной системы необходимо проверить чистоту соприкасающихся поверхностей якоря и сердечника, отсутствие консервирующей смазки, точность пригонки подвижной и неподвижной частей магнита, наличие неповрежденного короткозамкнутого витка, уложенного в прорези сердечника.

Для проверки плотности прилегания якоря к ярму между ними прокладывают листок

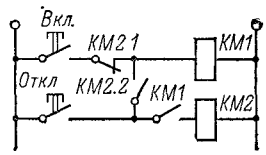


Рис. 6-6. Схема включения контактора с защелкивающимся механизмом.

копировальной и листок тонкой белой бумаги, а контактор замыкают вручную. По величине пятна на белой бумаге судят о качестве прилегания якоря. Если обе половинки магнитной системы соприкасаются только частью менее 60—75 % своей поверхности, а в других местах имеется зазор (более 0,03—0,05 мм), то якорь нуждается в подгонке.

Короткозамкнутый виток изготовляется сплошным (без мест соединения) или на сварке (пайка не допускается) и должен быть плотно зажат в своем пазу. Крепление витка производится подгибанием предназначенных для этого пластин, забиванием в паз узких клиньев или накернированием края паза. Замена материала короткозамкнутого витка, изменение его сечения или средней длины недопустимы, так как в этих случаях виток может настолько перегреться, что перегреет катушку, а контактор начнет гудеть. Нормальная температура нагрева короткозамкнутого витка 200 °С.

5. **Проверка контактора с защелкивающим механизмом.** На рис. 6-6 приведена схема управления контактором с защелкивающим механизмом. При подаче импульса на включение контактора втягивающая катушка *КМ1* получает питание через размыкающий вспомогательный контакт *КМ2.1* защелкивающего механизма, притягивает якорь контактора и защелка опускается; вспомогательный контакт защелки *КМ2.1* размыкает цепь втягивающей катушки, а вспомогательный контакт защелки *КМ2.2*, замыкаясь, подготовляет цепь отключения. При отключении на втягивающую катушку *КМ1* подается напряжение одновременно с катушкой защелки *КМ2*. Втягивающая катушка притягивает якорь контактора и тем самым снимает с защелки усилие, создаваемое якорем во включенном положении, и позволяет катушке *КМ2* легко поднять защелку. После ее поднятия контактом *КМ2.2* контактор отключается и приводит схему в исходное положение.

При осмотре контактора с защелкивающимся механизмом необходимо проверить работу последнего включением контактора вручную. При проверке работы контактора под напряжением проверяется и работа контактов защелки. В случае неудовлетворительного гашения дуги на вспомогательных контактах *КМ2.1* защелки параллельно им подключают конденсатор емкостью 1 мкФ (типа МБГЧ на 250 В для сети 220 В).

6-7. НАИБОЛЕЕ ХАРАКТЕРНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Подгорание, глубокая коррозия контактов по линии их первоначального касания. Причина — недостаточное начальное нажатие контактов, их вибрация в момент замыкания. Устраняется путем увеличения начального нажатия контактов, установкой новой контактной пружины или регулировкой степени сжатия старой.

Затяжное гашение дуги. Этот дефект вызывается несоответствием разрывной мощности контактора характеру и току нагрузки или неправильным включением дугогасящей катушки. Для исправления дефекта производится проверка соответствия контактора нагрузке и правильности включения дугогасительной катушки (по так называемому правилу «левой руки»). Контактор включают и по нему пропускают нормальный рабочий ток. К магнитопроводу дугогасящей катушки подносят компас. Его стрелка устанавливается в направлении магнитного поля, создаваемого катушкой. При расположении ладони левой руки пальцами в направлении прохождения тока так, чтобы северный (зачерненный) конец стрелки компаса был направлен в ладонь, большой палец укажет направление движения дуги. Оно будет правильным в случае, когда дуга выдувается с контактов вверх в камеру.

Повышенный нагрев контактов при длительном режиме работы. Причины: несоответствие контактора режиму работы при выборе по повторно-кратковременному режиму; недостаточное конечное нажатие и вследствие этого увеличение переходного сопротивления контактов; ухудшение контактной поверхности.

Дефект ликвидируют путем зачистки оплавлений контактной поверхности надфилем: увеличением конечного нажатия контактов; заменой контактора в соответствии с характером нагрузки.

Вибрация магнитопровода контакторов переменного тока из-за неисправности магнитной системы. Для устранения дефекта необходимо проверить наличие и целость короткозамкнутого витка; зачистить плоскости прилегания электромагнита; проверить плотность прилегания поверхностей электромагнитов прокладкой из тонкой чистой копировальной бумаги. Поверхность соприкосновения при включении контактора должна быть не менее 60—75 %. В противном случае требуется замена или ремонт магнитопровода контактора.

Неодновременное включение контактов в многополюсных контакторах. Устраняется регулировкой контактов.

Нечеткое включение и самопроизвольное отпадание якоря. Причина — несоответствие катушки рабочему напряжению. Дефект устраняется сменой катушки.

Повышенный нагрев катушек контакторов больших габаритов происходит из-за малого экономического сопротивления или увеличения зазора среднего стержня в контакторах переменного тока. Необходимы подборка соответствующего экономичного сопротивления и подгонка зазора.

В. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

6-8. ПРОВЕРКА И РЕГУЛИРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

Осмотр реле (рис. 6-7). С магнитопровода и сердечника снимается заводская смазка; поверхности прилегания якоря и сердечника протираются чистой тряпкой, смоченной в бензине.

При внешнем осмотре проверяется работа подвижной системы: легкость хода, отсутствие затираний и перекосов. Якорь реле должен легко поворачиваться на острие призмы; поверхности призмы качения якоря должны быть чистыми и гладкими; якорь должен прилегать к сердечнику без зазора; поверхность якоря должна быть ровной, без выступов и кривизны, в противном случае ребра якоря при включении реле могут смять немагнитную прокладку, последняя должна плотно прилегать к якорю и не пружинить.

Проверяется отсутствие затирания подвижной системы при включении якоря от руки; при поджатии якоря к сердечнику витки пружины не должны касаться друг друга, в противном случае необходимо несколько ослабить пружину и одновременно увеличить зазор δ между якорем и сердечником (см. рис. 6-7).

Не допускается зазор между сердечником и ярмом, так как впоследствии при работе это может привести к изменению выдержки времени и быстрому износу сердечника; катушка не должна иметь следов нарушений поверхностной изоляции и вмятин, контактные выводы катушек должны быть жестко закреплены в поверхностном слое изоляции. Деформированные при транспортировке или монтаже контактные стойки необходимо выпрямить; подвижные контакты должны касаться неподвижных одновременно, по центру контактов; при наличии нагара на контактах поверхности касания их должны быть очищены острым лезвием или надфилем; после зачистки контакты протирают чистой ветошью. Смазка не допускается.

Проверка контактной системы. При включении реле вследствие удара якоря об упорный болт возникает небольшая вибрация якоря, при этом замыкающие контакты могут отскакивать и повторно разрывать коммутируемую цепь. Для устранения этого явления не-

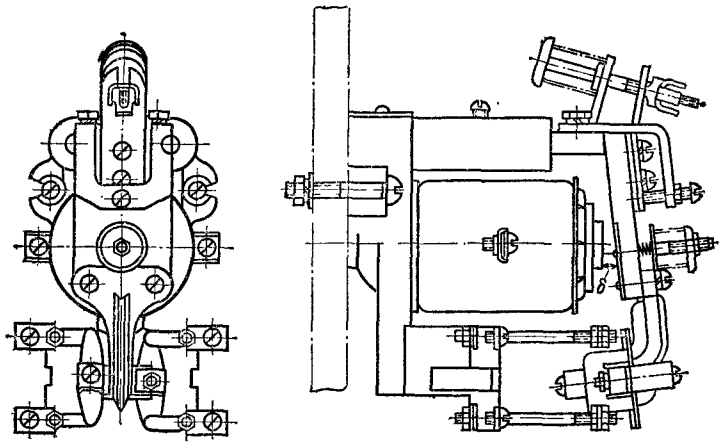


Рис. 6-7. Общий вид реле типа РЭ-811.

обходимо иметь некоторый провал на контактном мостике.

Основные параметры контактного устройства — раствор, провал и нажатие контактов — не должны выходить за пределы допустимых и в условиях наладки подлежат тщательной проверке.

Регулировка провалов у реле, имеющих мостиковые контакты (рис. 6-7), производится изменением высоты неподвижных контактов, а раствор определяется ходом якоря. Регулировка провалов и раствора контактов реле серий РЭВ-570, РЭВ-880, РЭВ-200 и РЭВ-800 производится путем перемещения неподвижных контактов. Для регулировки провала и растворов контактов реле серии РЭВ-570 допускается изменение положения упорного винта, определяющего положение якоря и воздушный зазор между якорем и сердечником, а также подгибанием нажимной скобы.

Регулировка напряжения (тока) срабатывания и возврата. У всех электромагнитных реле постоянного тока серии РЭВ настройка напряжения срабатывания и возврата осуществляется натяжением пружины или изменением воздушного зазора между якорем и сердечником; при этом максимальное первоначальное натяжение пружины лимитируется тем, что при включенном реле ее витки не должны касаться друг друга, а уменьшение воздушного зазора ограничивается минимальными значениями раствора и провала контактов.

Регулирование коэффициента возврата реле производится изменением толщины немагнитной прокладки. Если необходимо иметь более высокий коэффициент возврата, увеличивают толщину немагнитной прокладки. Тонкая, в небольших пределах регулировка коэффициента возврата может быть выполнена изменением натяжения пружины.

Реле напряжения переменного тока, включенные через добавочные сопротивления, настраиваются натяжением возвратной пружины и зазором якоря. Регулирование напряжения возврата производится только изменением натяжения пружины.

Напряжение втягивания у реле с «залипанием» регулируется изменением раствора якоря, так как в этом случае сохраняется сжатие пружины, а следовательно, и настроенная ранее выдержка времени.

После настройки все реле проверяют в схеме на отсутствие вибрации (гудения) и надежность срабатывания при 80 % номинального напряжения.

Регулировка выдержки времени производится с помощью электрического или электронного секундомера по схемам, приведенным на рис. 6-8. Достаточна точность измерения 0,03—0,05 с. Пределы регулирования выдержки даны в табл. 6-3.

Выдержка времени реле регулируется изменением толщины немагнитной прокладки (грубо) и изменением натяжения пружины (тонко). Самые тонкие стандартные прокладки имеют толщину 0,10—0,15 мм. Прокладки толщиной менее 0,1 мм не применяются, так как при частых включениях реле они могут деформироваться, что ведет к изменению выдержки времени и «залипанию» якоря. «Залипание» может произойти и от чрезмерного ослабления пружины, оттягивающей якорь от сердечника. Для предотвращения «залипания» необходимо возвратную пружину затянуть на полтора-два оборота от того состояния, при котором произошло «залипание».

У реле времени серий РЭВ-80, РЭВ-800 и РЭВ-880 регулировка выдержки времени производится как изменением толщины немагнитной прокладки, так и натяжением отжимной пружины на якоре. Возвратная пружина служит только для обеспечения четкого отпадания якоря и необходимого провала размыкающихся контактов. У реле серий РЭВ-800, РЭВ-880 и др. время «заряда» (задержки) в зависимости от исполнения находится в пределах 0,35—1,5 с, поэтому для получения полной выдержки времени и правильного ее измерения необходимо, чтобы катушка перед срабатыванием (отключением, закорачиванием) была под напряжением (обтекалась током) за период,

Таблица 6-3

Пределы регулирования выдержки времени реле управления и защиты

Тип	Номинальное напряжение втягивающей катушки, В	Пределы регулирования выдержки времени, с			Примечание
		при отключении катушки	при закорачивании катушки	время заряда	
РЭВ-811	12, 24, 48, 110, 220	0,25—1	0,4—1,5	0,5	Выдержка времени приведена для холодной катушки при напряжении не ниже 0,63 $U_н$
РЭВ-812		0,8—2,5	0,9—2,8	0,7	
РЭВ-813		2—3,5	2,2—3,8	0,9	
РЭВ-814		3—5	3,8—5,5	0,9	
РЭВ-815		0,25—0,6	0,4—0,9	0,5	
РЭВ-816		0,5—1,5	0,6—1,7	0,7	
РЭВ-817		1,2—2	1,3—2,2	0,9	
РЭВ-818		2—3,5	2,2—3,8	0,9	
РЭВ-881		4,5—8	5—9	1	
РЭВ-882		7—12	8—13	1,5	
РЭВ-883		3—6	4—7	1	
РЭВ-884		5—9	6—10	1,5	
РЭВ-81		0,15—1	0,3—1,3	0,35	Собственное время втягивания при номинальном напряжении около 0,1 с
РЭМ-211	24, 55, 110, 220	0,3—1,5	—	0,6	—
РЭМ-212	95—170	0,3—1	—	0,6	
РЭМ-221	175—320	0,5—3	—	0,8	
РЭМ-222	24, 55, 110, 220	0,5—1,5	—	0,8	Собственное время втягивания при номинальном напряжении при температуре катушки 20±5 °С не более 0,15 с, при рабочей температуре не более 0,2 с
РЭМ-21	95—170	0,25—1	—	0,8	
РЭМ-22	175—320	0,8—2,5	—	0,8	

Примечание. Точность времени срабатывания 10 % при напряжении на катушке не менее 0,6 $U_н$ и температуре 20±5 °С.

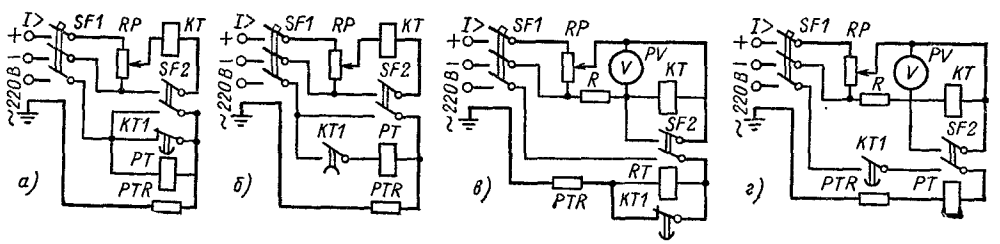


Рис. 6-8. Схемы определения выдержки времени электрическим секундомером.

а — реле с гильзой и размыкающимся контактом; *б* — реле с гильзой и замыкающимся контактом; *в* — реле без гильзы с размыкающимся контактом; *г* — реле без гильзы с замыкающимся контактом; *KT* — реле времени; *RP* — потенциометр; *PT* — электрический секундомер; *PTR* — добавочное сопротивление катушки секундомера; *R* — резистор.

больший времени «заряда» или в крайнем случае равный ему.

Выдержка времени электромагнитных реле при отпадании якоря может регулироваться изменением съемных дополнительных демпферов. Чем больше индуктивность катушки (или гильзы) и чем меньше ее омическое сопротивление, а также натяжение пружины, тем больше выдержка времени.

Проверка времени срабатывания производится при напряжении 0,85 $U_н$. Учитывая, что с нагревом катушки выдержка времени реле

уменьшается, регулировать реле при холодной катушке необходимо на несколько большую выдержку времени, чем заданная уставка.

Проверка реле защиты постоянного тока первичным током производится от сети постоянного или переменного тока или от специально выделяемых генераторов в режиме короткого замыкания.

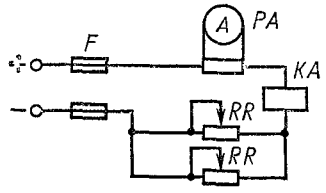


Рис. 6-9. Схема проверки реле постоянного тока с помощью регулировочных реостатов.

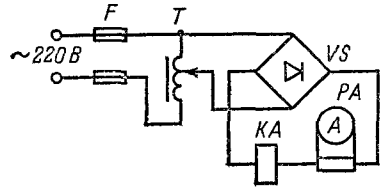


Рис. 6-10. Схема испытания реле постоянного тока при питании от сети переменного тока.

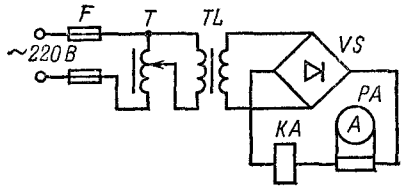


Рис. 6-11. Схема настройки токового реле постоянного тока с помощью нагрузочного трансформатора с выпрямителем.

При уставках реле на ток 5—20 А ток срабатывания регулируют с помощью реостатов, включенных последовательно с катушкой согласно рис. 6-9. Для настройки токовых реле до 10 А удобно использовать полупроводниковые выпрямители (схема приведена на рис. 6-10).

Реле на большие токи (до 200 А) проверяют, применяя нагрузочный трансформатор с выпрямителями ВК-200 по схеме, показанной на рис. 6-11.

Для испытания токовых реле защиты установок, работающих по схеме Г—Д, в качестве испытательного можно использовать рабочий генератор, схема возбуждения которого изменяется так, чтобы обеспечить плавный подъем тока с нуля. Для этих целей параллельная обмотка генератора включается через потенциометр от независимого источника постоянного тока (рис. 6-12).

Когда отсутствуют регуляторы тока, указанные выше, настройку токовых реле можно выполнить с помощью эталонной катушки, например катушки напряжения, имеющей большое и точно известное количество витков. Эталонная катушка устанавливается вместо

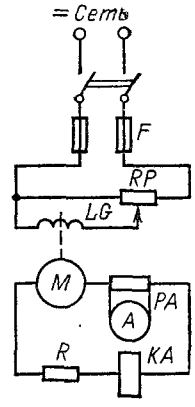


Рис. 6-12. Схема испытания реле постоянного тока на большие токи от рабочего генератора.

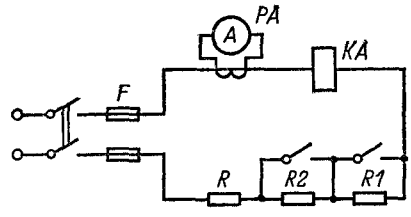


Рис. 6-13. Схема настройки токового реле с помощью резисторов.

токовой, и реле настраивают на новый ток I' исходя из следующего соотношения:

$$I_{уст} = I' \frac{w_э}{w_т},$$

где $I_{уст}$ — требующийся ток уставки реле; $w_э$, $w_т$ — соответственно число витков эталонной и токовой катушек.

Проверка реле переменного тока первичным током в зависимости от тока уставки производится от сети, если ток уставки до 100 А, или от постороннего источника переменного тока, если ток уставки более 100 А.

При проверке токовых реле от рабочей сети ток нагрузки создается с помощью резисторов, включенных последовательно с катушкой реле. В качестве токоограничивающих сопротивлений могут быть использованы реостаты или ящики резисторов. Регулирование тока в схеме осуществляется шунтированием части резисторов (рис. 6-13).

Для проверки максимальных защит на большие токи (сотни и тысячи ампер) применяют нагрузочные трансформаторы. Трансформатор типа НТ-10, изготовляемый ВНИИПЭМ, позволяет получить нагрузочный ток до 10 000 А. Грубая регулировка тока осуществляется изменением коэффициента трансформации, тонкая (плавная) — с помощью регулировочных устройств (рис. 6-14). Вместо специаль-

ного нагрузочного можно использовать котельные или сварочные трансформаторы.

Настройка максимальных реле производится в следующем порядке. Ток нагрузки с помощью регулировочного устройства (реостата, ЛАТР) поднимается до тока уставки. При подгонке тока нагрузки к току уставки испытательная схема кратковременно отключается для остывания испытуемого реле, нагрузочных и регулировочных устройств и включается

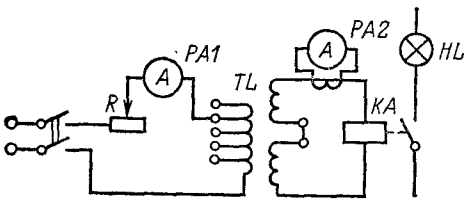


Рис. 6-14. Схема проверки максимальной защиты с помощью нагрузочного трансформатора.

снова. Нагрузочный ток устанавливается равным току уставки и изменением натяжения пружины или положения упора якоря реле доводится до срабатывания. После окончания настройки реле на шкале отмечается риска, указывающая уставку, а положение затягивающей гайки фиксируется шплинтом.

6-9. ПРОВЕРКА И РЕГУЛИРОВКА ТЕПЛОВЫХ РЕЛЕ

Осмотр реле. При внешнем осмотре необходимо проверить:

исправность нагревательных элементов, состояние биметаллических пластин;

четкость работы механизма, связанного с контактами реле, и самих контактов (отсутствие заеданий, задержек, замыканий и размыканий);

условия охлаждения реле; отсутствие вблизи тепловых реле реостатов, нагревательных приборов, включенных вентиляторов и т. п.;

надежность затяжки контактов присоединения тепловых элементов.

Регулировка тепловых реле. Испытание реле током производится по схеме, приведенной на рис. 6-15. Перед подачей напряжения на тепловые элементы регулировочный рычаг реле устанавливают в среднее (нулевое) положение и через реле пропускают номинальный ток защищаемого объекта.

При необходимости снимают следующие характеристики реле:

ток срабатывания в функции выдержки времени без предварительного подогрева номинальным током;

то же после подогрева.

В связи с тем что тепловые элементы на заводе-изготовителе калибруют при температуре +35 °С, при испытании реле необходимо скорректировать подаваемый на него испытательный ток с учетом окружающей температуры согласно заводским инструкциям. Так, для реле типа ТРТ ток уставки изменяется в среднем на 3,5 % на каждые ±10 °С, а для ТРА и ТРВ ток уставки уменьшается на 4—5 % на каждые 10 °С в сторону увеличения температуры от 20 до 50 °С и на 3,5 % увеличивается при снижении температуры окружающей среды на каждые 10 °С, начиная от 20 до —40 °С.

Испытуемые тепловые элементы оставляют под номинальным током на 2 ч, после чего ток повышают до 120 % номинального. При этом токе реле должно сработать за время не более 20 мин. Если за этот период оно не сработает, необходимо медленно перемещать регулиро-

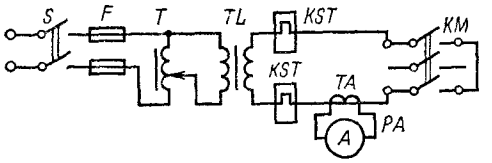


Рис. 6-15. Схема испытания тепловых реле.

T — автотрансформатор ЛАТР1; *TL* — трансформатор 220/12 (36) В; *KST* — тепловое реле; *KM* — контактор.

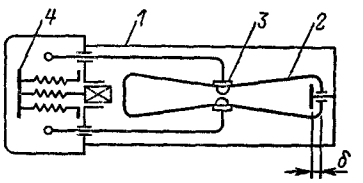


Рис. 6-16. Кинематическая схема реле ТР-100.

1 — латунная трубка; *2* — пружина; *3* — контакт; *4* — регулировочный винт.

вочный рычаг в сторону начала шкалы до момента срабатывания реле. Уставка фиксируется на корпусе реле меткой.

При значительном количестве проверяемых реле их настройку и проверку производят в форсированном режиме сравнением с реле, испытанным по изложенному методу, которое принимается в качестве образца-эталона. На соединенные последовательно с образцовым восемь—десять тепловых элементов с одинаковым номинальным током подается 2,5—3-кратный ток уставки и отсчитывается время их срабатывания (обычно 5—8 мин). Тепловые элементы, сработавшие с большим отклонением от эталонного, подвергаются регулировке изменением положения регулировочного рычага до отключения реле. Эту операцию необходимо выполнять за время не более 25—30 с.

Настройка реле считается удовлетворительной, если время срабатывания испытуемых реле будет отличаться от образцового не более чем на ±10 %.

Регулировка температурных реле типов ТР-100 и ТР-200. Регулировка на требуемую уставку производится после установки реле в зону контролируемой среды. Необходимая уставка температуры срабатывания (рис. 6-16) устанавливается регулировочным винтом, и при изменении температуры окружающей среды реле доводится до срабатывания.

Изменение уставки от 25 до 200 °С достигается не более чем двумя оборотами регулировочного винта. Его дальнейшее вращение излишне и может вызвать повреждение реле.

При необходимости регулировку реле следует производить в такой последовательности:

снять крышку на головке реле, отвернув три винта;

снять колпачок регулировочного винта, удалив предварительно пломбу;

освободить фиксатор регулировочного винта (у реле ТР-200);

к выводам реле подключить внешнюю сигнальную цепь с мощностью сигнального устройства, не превышающей допустимую для контактов реле;

температуру при нагревании контролировать термометром или термопарой;

по достижении требуемой температуры при помощи регулировочного винта добиться срабатывания реле;

повышая и понижая температуру контролируемой среды, определить окончательную уставку как среднее арифметическое из трех срабатываний; при необходимости следует провести повторную регулировку и проверку;

затянуть фиксатор и снова проверить уставку, доведя реле до срабатывания;

надеть колпачок на регулировочный винт и установить крышку.

Перегрев реле в процессе эксплуатации не должен превышать 25 °С сверх температуры уставки.

Г. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

6-10. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИИ АВМ

Технические данные. Основные параметры выключателей даны в табл. 6-4, 6-5 и 6-6.

Таблица 6-4

Номинальный ток выключателей серии АВМ и катушек максимальных расцепителей

Тип	Номинальный ток, А		Срабатывание максимальной токовой защиты	
	выключателя	катушки максимального расцепителя	при перегрузке	при коротком замыкании
АВМ-10Н	1000	500, 600, 800, 1000	С выдержкой времени не менее 10 с при токе, равном наименьшему току уставки перегрузки	Мгновенное
АВМ-10НВ	750	500, 600, 750		
АВМ-10С	1000	500, 600, 800, 1000		С выдержкой времени 0,25 и 0,4 с или 0,4 и 0,6 с
АВМ-10СВ	800	500, 600, 800		
	750	500, 600, 750		
АВМ-10Н без часового механизма	1000	600, 800, 1000	Мгновенное	Мгновенное
АВМ-10НВ без часового механизма	800	600, 800		
АВМ-15Н	1500	1000, 1200, 1500	С выдержкой времени не менее 10 с при токе, равном наименьшему току уставки перегрузки	Мгновенное
АВМ-15НВ	1150	800, 1150		
АВМ-15С	1500	1000, 1200, 1500		С выдержкой времени 0,25 и 0,4 с или 0,4 и 0,6 с
АВМ-15СВ	1150	800, 1150		
АВМ-20Н	~2000 =2000	1000, 1200 1500, 2000		Мгновенное
АВМ-20НВ	~1500	1000, 1200, 1500 =1000, 1200		
АВМ-20С	~2000 =2300	1000, 1200 1500, 2000		С выдержкой времени 0,25 и 0,4 с или 0,4 и 0,6 с
АВМ-20СВ	~1500 =2000	1000, 1200, 1500 1000, 1200, 1500, 2000		

Таблица 6-5

Коммутационная способность вспомогательных контактов выключателей серии АВМ

Род тока	Напряжение, В, не более	Предельный отключаемый ток, А
Переменный	230	15
	500	10
Постоянный	110	3
	220	1,5
	460	0,5

Таблица 6-6

Мощность, потребляемая катушками выключателя серии АВМ

Наименование	Пусковая мощность	
	Переменный ток, В·А	Постоянный ток, Вт
Расцепитель:		
независимый	1200	320
минимального напряжения	50*	9*
Реле:		
блокировки	360	450
управления	200	145

* В длительном режиме.

По максимально-токовой защите выключатели имеют следующие исполнения:

с максимальными расцепителями с обратнозависимой от тока выдержкой времени при перегрузках (с часовыми механизмами) и мгновенным срабатыванием при коротких замыканиях — неселективные (Н);

с максимальными расцепителями с обратнозависимой от тока выдержкой времени при перегрузках (с часовыми механизмами) и независимой от тока выдержкой времени при коротких замыканиях — селективные (С);

без максимальных расцепителей.

Выдержка времени при наименьшей уставке тока на шкале перегрузок и максимальной уставке времени часового механизма составляет не менее 10 с. При больших токах выдержка времени уменьшается.

Выключатели могут иметь добавочный расцепитель: независимый или минимального напряжения. Независимый предназначен для дистанционного отключения выключателей. Он работает при напряжении 50—110 % номинального. Расцепитель минимального напряжения отключает выключатель при снижении напряжения до 30 % номинального и ниже и не отключает при напряжении 50 % номинального и выше. Он также не препятствует включению выключателя вручную при напряжении 70 % номинального и выше, а выключатель с электромеханическим приводом — при напряжении 85 % номинального и выше.

Автоматические выключатели с электромеханическим приводом типов АВМ-15 и АВМ-20 селективные, а также выключатели без максимальных расцепителей поставляются со специальным расцепителем, который всегда присоединяется к главным вводным зажимам автомата и обеспечивает отключение автомата без выдержки времени при включении его на короткое замыкание.

Контакты коммутатора (вспомогательные контакты) отключают токи, указанные в табл. 6-5. При включенном выключателе раствор размыкающих вспомогательных контактов должен быть 4,5—5 мм, провал замыкающих вспомогательных контактов 2—3 мм. Контакты коммутатора допускают длительную нагрузку 10 А.

Вспомогательные (втычные) контакты выдвижных выключателей допускают длительную нагрузку 10 А и кратковременную (в течение 30 с) 30 А. Полное время включения выключателя с электромеханическим приводом от момента подачи питания на привод до полного включения составляет:

при постоянном токе . . . . . 0,55 с
при переменном . . . . . 0,35 с

Полное время отключения неселективных выключателей от момента возникновения тока короткого замыкания до момента полного исчезновения тока примерно равно:

АВМ-10 . . . . . 0,06 с
АВМ-15 . . . . . 0,08 с
АВМ-20 . . . . . 0,095 с

Пусковые токи двигателей электромеханического привода:

при переменном токе 230 В . . . . . 35 А
при постоянном токе 220 В . . . . . 25 А

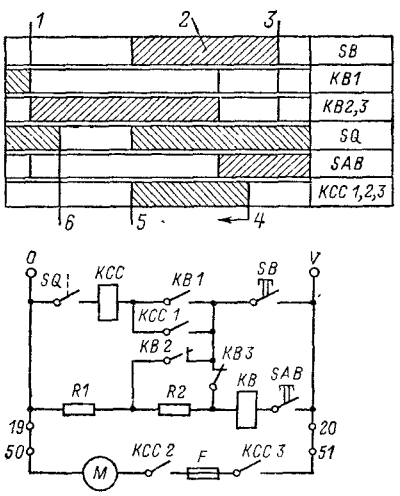


Рис. 6-17. Принципиальная схема управления электродвигательным приводом выключателей АВМ-15 и АВМ-20.

Положение контактов при работе привода: *1* — выключатель отключен *2* — импульс на включение; *3* — исходное положение привода и контактов после подачи напряжения на зажимы схемы; *4* — включение; *5* — снятие питания с электродвигателя; *6* — выключатель включен.

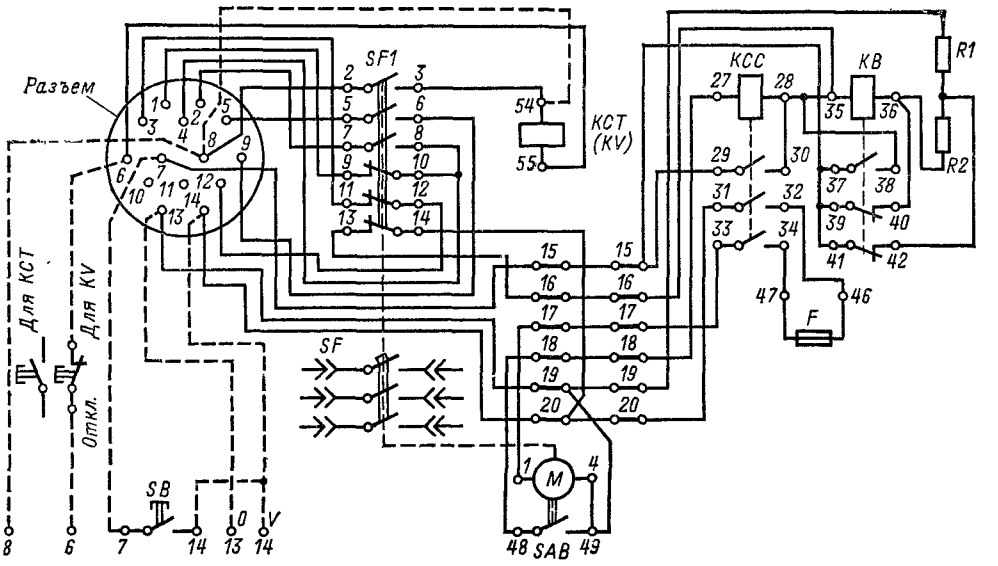


Рис. 6-18. Элементная схема управления выдвижного выключателя АВМ-10.

Назначение контактов: *8—6* — источник питания дополнительного привода; при минимальном расцепителе монтируется провод *8—54*; при независимом расцепителе монтируются провода *8—2* и *3—54*.

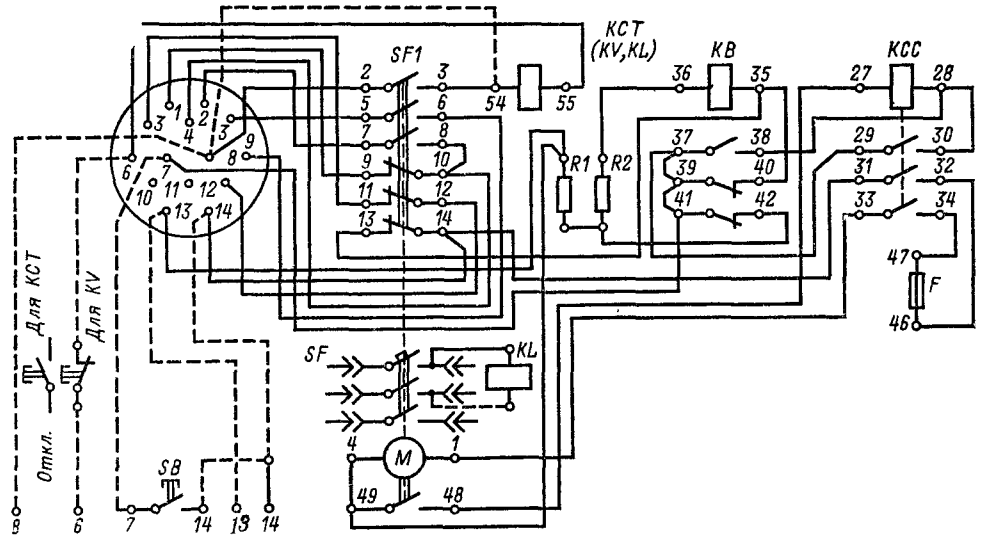


Рис. 6-19. Элементная схема управления выдвижных выключателей АВМ-15 и АВМ-20 с электродвигательным приводом.

8—6 — источник питания дополнительного расцепителя; *13—14* — источник питания электродвигательного привода; при минимальном расцепителе монтируется провод *8—54*; при независимом расцепителе монтируются провода *8—2* и *3—54*; в выключателях селективных и без максимальных расцепителей ставится специальный расцепитель.

Максимальная пусковая мощность катушек добавочных расцепителей, реле блокировки и реле управления приведена в табл. 6-6.

Электродвигатель привода допускает не более 10 включений подряд с интервалами не менее 10 с. Нормальная работа привода гарантируется при напряжении 85—110 % номинального.

Схема управления выключателем с электромеханическим приводом показана на рис. 6-17.

Для раздельного питания цепей управления и двигателя привода необходимо снять перемычки *19—50* и *20—51* и подать питание на зажимы *19—20* и *50—51*.

Схема управления предусматривает блокировку включения выключателя на короткое замыкание. Если в процессе включения выклю-

чателя произошло его отключение при замкнутой кнопке включения *SB*, то повторного самопроизвольного включения автомата не произойдет, так как катушка реле *KB* оказывается зашунтированной кнопкой включения *SB*, а контакт *KB1* в цепи реле *KCC* — разомкнутым. После размыкания кнопки включения *SB* реле блокировки *KB* получит питание и схема окажется снова подготовленной для включения выключателя электромеханическим приводом.

Для того чтобы в процессе блокировки не образовалось короткозамкнутого участка цепи, в схеме установлены резисторы *R1* (750 Ом) и *R2* (900 Ом). При работе блокировки резистор *R1* находится под полным напряжением цепи управления. В результате потребляемая мощность больше номинальной, и поэтому длительность замыкания контакта *SB* не должна превышать 30 с.

В выключателях выдвижного исполнения втычные контакты для вспомогательных цепей и цепей управления электродвигателем привода выполнены штепсельным разъемом. Примерные схемы управления выдвижных автоматов даны на рис. 6-18 и 6-19.

6-11. НАЛАДКА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ АВМ

Проверка контактной системы выключателей. При правильно отрегулированной контактной системе сила нажатия контактов имеет значения, приведенные в табл. 6-7.

Таблица 6-7

Сила нажатия контактов выключателей АВМ-15 и АВМ-20

Контакты	Нажатие	Сила нажатия контактов, Н, не менее
Главные	Конечное	540
Предварительные	Начальное	9,81
Разрывные	»	29,5

Для выключателей АВМ-15 и АВМ-20 в момент начала касания разрывных контактов должен быть зазор между предварительными контактами не менее 5 мм; в момент касания предварительных контактов зазор между главными контактами должен быть не менее 2,5 мм.

Раствор *B* разрывных контактов (рис. 6-20) в отключенном положении выключателей должен быть 70—90 мм для выключателей АВМ-15 и АВМ-20; провал *A* главных контактов во включенном положении выключателя должен быть не менее 2 мм (рис. 6-21). Для выключателей АВМ-10 раствор разрывных контактов должен быть не менее 45 мм. Эти выключатели предварительных контактов не имеют.

Измерение нажатий контактов производится динамометрами. Для измерения начальных нажатий на разрывные или предварительные контакты набрасывается петля из обычной тесьмы, второй конец ее крепится к крючку динамометра, который оттягивается в направлениях, указанных на рис. 6-21.

Отсчет показаний динамометра начинается тогда, когда можно будет высвободить тонкую

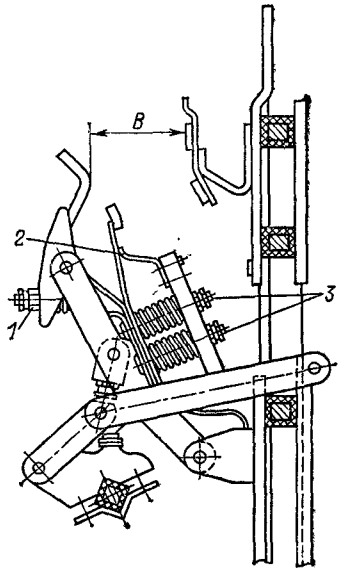


Рис. 6-20 Контактная система выключателей АВМ-15 и АВМ-20 в отключенном положении.

1—3 — гайки регулировки одновременности касания контактов; *2* — угольник.

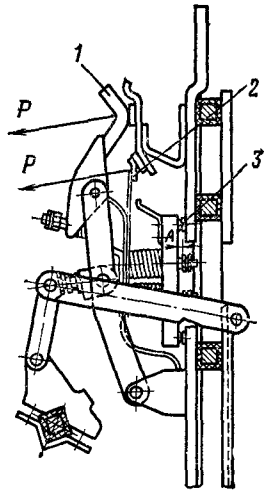


Рис. 6-21. Контактная система выключателей АВМ-15 и АВМ-20 во включенном положении.

1 — разрывные контакты; *2* — предварительные контакты; *3* — главные контакты; *A* — провал главных контактов.

полоску бумаги, предварительно зажатую между контактами.

Показания динамометра при измерении нажатий предварительных контактов отсчитывают в момент образования зазора *B* (рис. 6-20).

При необходимости измерений нажатий главных контактов применяется специальный динамометр; методика аналогична.

Регулирование токов срабатывания максимальных расцепителей производится изменени-

ем натяжения пружины *1* (рис. 6-22). Максимальный расцепитель с часовым механизмом в диапазоне меток «макс.» и «мин.» имеет устойчивую регулируемую выдержку времени, а в диапазоне «0» и «мин.» выключатель будет отключаться с небольшой неустойчивой выдержкой времени или мгновенно.

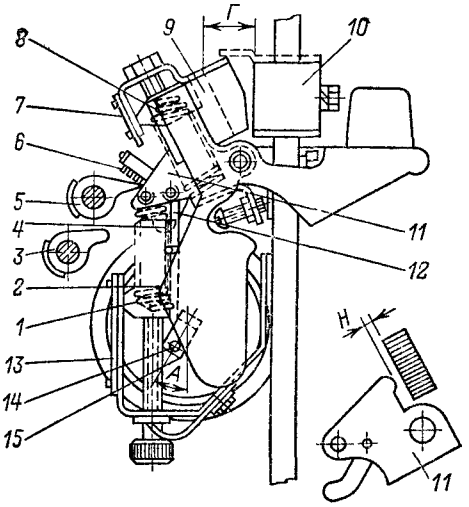


Рис. 6-22. Максимальный расцепитель.

1 — пружина; *2* — боек; *3* — рычаг отключающего валика (отсечка); *4* — боек часового механизма; *5* — рычаг отключающего валика (защита с выдержкой времени); *6* — пружина амортизации ударов; *7* — шкала отсечки; *8* — пружина (отсечка); *9* — якорь; *10* — сердечник; *11* — скоба, *12* — тяга; *13* — шкала уставок максимальной защиты; *14* — винт; *15* — колодка.

Для нормальной работы максимального расцепителя необходимо проверить следующее:

зазор *Г* между якорем и сердечником должен быть 23 мм у выключателей АВМ-15 и АВМ-20, а раствор магнитной системы для селективных выключателей 17 мм и для неселективных 13 мм (АВМ-10);

необходима такая длина тяги *12* (см. рис. 6-22) часового механизма, чтобы угол *А* был равен 45° и метка на колодке *15* находилась напротив метки *1* на корпусе часового механизма, а при отжимании скобы *11* получился бы некоторый зазор *Н* и метка на колодке *15* совпала с меткой *2* на корпусе часового механизма;

при выходе из зацепления часового механизма между бойком *4* и рычагом *5* отключающего валика нужен зазор 1—1,5 мм;

в момент отключения выключателя максимальным расцепителем через рычаг *5* отключающего валика должен оставаться зазор 1,5—2 мм между бойком *2* и рычагом *3*; регулировка зазоров осуществляется поворотом рычагов *5* и *3* на отключающих валиках;

отключение выключателя максимальным расцепителем должно наступать раньше, чем якорь *9* дойдет до упора на сердечнике *10*.

Регулировка напряжения срабатывания минимального расцепителя неселективных автоматических выключателей. Расцепитель регулируется так, чтобы при снижении напряжения до 30 % и ниже он отключал выключатель, а при напряжении 50 % и выше не отключал. Расцепитель не должен препятствовать включению выключателя рукояткой или рычажным приводом при напряжении 70 % номинального и выше, а электродвигательным

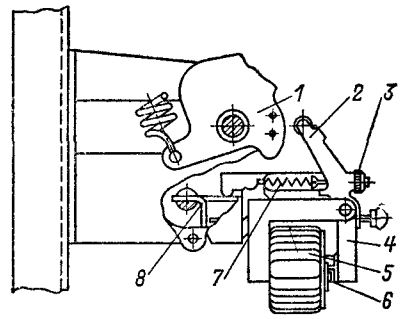


Рис. 6-23. Минимальный расцепитель (выключатели АВМ-15 и АВМ-20).

1 — кулачок; *2* — ролик; *3* — регулировочный винт; *4* — якорь; *5* — катушка; *6* — сердечник; *7* — пружина; *8* — скоба.

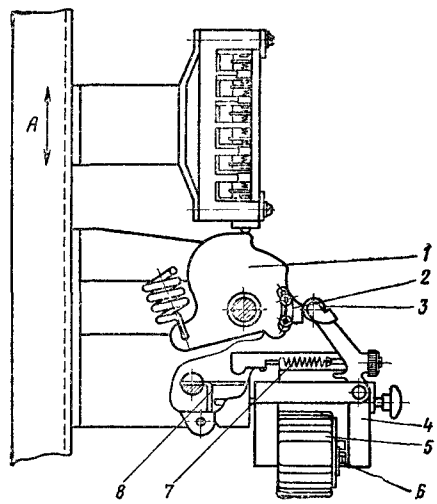


Рис. 6-24. Специальный расцепитель выключателей АВМ-15 и АВМ-20.

1 — кулачок; *2* — упор; *3* — ролик; *4* — якорь; *5* — катушка; *6* — сердечник; *7* — пружина; *8* — рычажок.

приводом — при напряжении 85 % номинального и выше.

Зазор между бойком якоря *4* (рис. 6-23) и скобой *8* отключающего валика при притянутом якоре *4* должен быть 2—3 мм. Этот зазор регулируется подгибом скобы *8*. При отключенном положении выключателя между якорем и сердечником должен быть зазор 0,4—0,8 мм.

Регулировка напряжения срабатывания осуществляется натяжением пружины *7*, которое производится при помощи гайки *3*.

Таблица 6-8

Наиболее характерные неисправности выключателей серии АВМ и способы их устранения

Неисправность	Причины	Способы устранения
Выключатель не поддается включению	1. Не отрегулирован рычажный привод	Отрегулировать
	2. Неправильное положение электродвигательного привода	Отрегулировать привод передвижением редуктора до замыкания конечного выключателя
	3. При нажатии кнопки включения *SB* (рис. 6-17):	
	а) электродвигатель не вращается, но реле *KB* притянуто, что может быть следствием перегорания предохранителя или катушки *KCC*	Проверить целость плавкой вставки предохранителя и обмотки реле *KCC*
	б) электродвигатель не вращается и реле *KB* не притягивается, что может быть следствием перегорания резистора *R1* или *R2* или же катушки *KB*	Заменить резистор или катушку новыми, проверить всю схему
Выключатель не полностью включается	1. Электродвигательный привод не доводит контактную систему до включенного положения при напряжении не ниже 85 % номинального. Возможные причины:	
	а) Разрегулировка тормоза	Довести привод от руки, отрегулировать тормоз
	б) Смещение привода относительно механизма свободного расцепления	Отрегулировать привод передвижением редуктора
	в) Нарушение регулировки реле *KCC* (рис. 6-17)	Проверить работу привода на напряжениях 85—110 % номинального
	2. В селективных выключателях в процессе включения при нормальных условиях работы происходит отключение. Возможные причины:	
	а) Неисправна катушка специального расцепителя	Проверить катушку на минимальное напряжение срабатывания
	б) Разрегулирована или вышла из строя пружина *7* (рис. 6-24)	Отрегулировать натяжение пружины или установить новую
	3. В неселективном выключателе в процессе включения при номинальном напряжении срабатывает минимальный расцепитель. Возможные причины:	
	а) Неисправна катушка расцепителя	Проверить катушку на срабатывание или заменить ее новой
	б) Разрегулирована или вышла из строя пружина *7* (рис. 6-23)	Отрегулировать натяжение пружины или установить новую
Выключатель не отключается при токах перегрузки	Избыточное усилие на якоре максимального расцепителя недостаточно, для того чтобы повернуть отключающий валик. Возможные причины:	
	а) Якорь расцепителя заедает	Устранить заедание, для чего создать небольшую «игру» между трущимися частями якоря, промыть ось и подшипники якоря бензином, смазать их

Продолжение табл. 6-8

Неисправность	Причины	Способы устранения
	б) Расцепление часового механизма происходит после встречи бойка *4* с рычагом отключающего валика *5* (рис. 6-22)	Отрегулировать положение рычага *5*
	в) Заедание отключающего валика в подшипниках	Устранить заедание
	г) Отключающий валик недостаточно повернулся при коротком замыкании из-за того, что разрегулирован рычаг *3* (рис. 6-22)	Отрегулировать положение рычага *3*
Выключатель не отключается при подаче питания на катушку независимого расцепителя	1. Обрыв цепи	Проверить исправность цепи
	2. Не выдержан зазор *А* (рис. 6-21)	Отрегулировать зазор: для АВМ-10 — 4 мм; АВМ-15 и АВМ-20 — 15 мм
Ток срабатывания максимального расцепителя отличается от уставки более чем на ±10 %	Изменился зазор *Г* (рис. 6-22) между якорем и сердечником	Отрегулировать зазор так, чтобы метка на колодке часового механизма совпала с меткой на его корпусе
Отсутствует выдержка времени у максимального расцепителя при перегрузке, хотя указатель часового механизма стоит между метками «мин.» и «макс.»	Порча часового механизма	Сменить часовой механизм
Выключатель не отключается минимальным или специальным расцепителем при достаточном для срабатывания напряжении	Слабое натяжение пружины *7* (рис. 6-23, 6-24)	Установить требуемое натяжение пружины. Если этого нельзя обеспечить, сменить пружину

Для четкой работы расцепителя минимального напряжения выключателей АВМ-10 необходимо, чтобы зазор между бойком якоря и скобой отключающего валика при притянутом якоре был 1,5—2,5 мм. При отключенном положении выключателя, когда напряжение на катушке отсутствует, между якорем и сердечником должен быть зазор 6—8 мм.

Проверка специального расцепителя в селективных выключателях с электромеханическим приводом. При включении выключателя на пониженное напряжение сети специальный расцепитель действует на отключение выключателя. Специальный распепитель действует также на отключение выключателя без выдержки времени при включении его на короткое замыкание.

Катушка *5* расцепителя (рис. 6-24) всегда присоединяется к главной цепи тока выключателя со стороны подвода питания. В отключенном положении между якорем *4* и сердечником *6* должен быть зазор 6—8 мм. Натяжение пружины *7* должно быть таким, чтобы расцепитель отключал выключатель через рычажок *8*, жестко укрепленный на отключающем валике, при напряжении на его катушке ниже 85 % номинального. Упор *2* должен

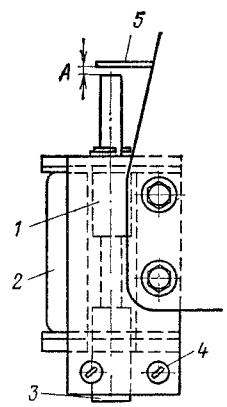


Рис. 6-25. Независимый (отключающий) расцепитель выключателя АВМ-10.

1 — сердечник; *2* — катушка; *3* — якорь; *4* — винт; *5* — скоба отключающего валика.

быть на кулачке *1* в таком положении, чтобы обеспечить отключение автомата до или в момент касания главных контактов выключателя.

Проверка независимого (отключающего) расцепителя (рис. 6-25). Расцепитель рассчитан на кратковременную работу не более 10 отключений подряд с интервалами 15 с при

напряжении 50—110 % номинального. Для четкого действия расцепителя необходимо, чтобы якорь *3* в любом положении свободно проходил внутри катушки *2*. Размер *А* должен быть около 4 мм.

Отключение выключателя при опробовании от руки должно происходить при медленном поднимании якоря до соприкосновения и поворота отключающего валика.

Проверка втычных контактов выдвижных выключателей. Сила нажатия каждого втычного контакта должна быть не менее 98—118 Н и измеряться динамометром при вставленной между контактами пластине толщиной 10 мм.

В нерабочем положении расстояние между втычными контактами и встречными ножами должно быть не менее 30 мм. При вкатывании выключателя в ячейку необходимо проверить, чтобы оси симметрии втычных контактов и встречных ножей совпадали по вертикали и горизонтали; допускается в рабочем положении автомата просвет между задними колесами тележки автомата и направляющими примерно 2 мм. Провал заземляющих скользящих контактов должен быть 5—7 мм.

Проверяется механическая блокировка, которая не позволяет разъединять втычные контакты при включенном положении выключателя. В табл. 6-8 указаны основные способы устранения характерных неисправностей автоматов АВМ.

6-12. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИИ А-3700

Технические данные. Основные технические данные выключателей серии А-3700 содержатся в табл. 6-9—6-13. Контактная система состоит из подвижных контактов токоограничивающего или компенсационного устройства.

Токоограничивающее устройство обеспечивает быстрое размыкание контактов при прохождении через них токов короткого замыкания независимо от действия расцепителей максимального тока и механизма свободного расцепления.

Компенсационным устройством снабжаются селективные выключатели. Оно надежно прижимает подвижный контакт к непо-

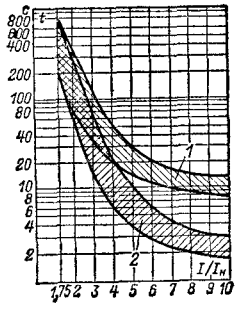


Рис. 6-26. Время-токовые характеристики выключателей переменного тока с полупроводниковыми расцепителями.

1 — при уставке срабатывания по времени 16 с при $6I_н$; *2* — при уставке срабатывания по времени 4 с при $6I_н$.

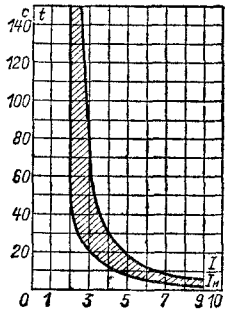


Рис. 6-27. Время-токовая характеристика выключателя типа А-3710Б с тепловыми расцепителями на токи 10, 20, 32, 40, 50, 63, 80, 125 и 160 А.

движному при протекании тока короткого замыкания в течение заданного времени.

Полупроводниковыми расцепителями регулируется номинальный ток расцепителя, уставка по току в зоне короткого замыкания, время срабатывания в зоне короткого замыкания и перегрузки.

Время-токовые характеристики выключателей с полупроводниковыми расцепителями приведены на рис. 6-26.

Таблица 6-9

Технические данные токоограничивающих выключателей серии А-3700 с полупроводниковым и электромагнитным расцепителями максимального тока

Исполнение выключателя	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Пределы регулирования тока полупроводникового расцепителя			Токи срабатывания, А, электромагнитного расцепителя	
			номинального, А	в зоне короткого замыкания, $I_к/I_н$	уставки тока срабатывания от перегрузки	Уставка тока срабатывания	Допустимое отклонение тока уставки
А-3713Б	440	160	20—40	2—6	—	960	±140
А-3713Б	660		40—80	—	1,2—1,3	1600	±240
А-3714Б	660		80—160		1,15—1,3		
А-3723Б	440	250	—	2—6	1,2—1,3	1500	±220
А-3723Б	660		160—250	3—10	1,15—1,3	2500	±370
А-3724Б	660						
А-3733Б	440	400	160—250	2—6	1,2—1,3	2400	±360
А-3733Б	660		250—400	3—10	1,15—1,3	4000	±600
А-3734Б	660						

Продолжение табл. 6-9

Исполнение выключателя	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Пределы регулирования тока полупроводникового расцепителя			Токи срабатывания, А, электромагнитного расцепителя	
			номинального, А	в зоне короткого замыкания, $I_к/I_н$	уставки тока срабатывания от перегрузки	Уставка тока срабатывания	Допустимое отклонение тока уставки
А-3743Б	440	630	250—400	2—6	1,2—1,3	3800	±570
А-3743Б	660		400—630	3—10	1,5—1,3	6300	±950
А-3744Б	660						

Примечание. Дополнительные данные для выключателей типа А-3720:

а) Пределы регулирования тока полупроводникового расцепителя в зоне перегрузки $I_{пер}/I_н$=1,25; ток несрабатывания 1,05$I_н$;

б) предел регулирования времени срабатывания в зоне перегрузки при $I_{пер}$=6$I_н$ составляет 4—16 с.

Таблица 6-10

Технические данные селективных выключателей серии А-3700 с полупроводниковым расцепителем

Исполнение выключателя	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Пределы регулирования		Ток уставки в зоне перегрузки $I_{пер}/I_н$	Ток срабатывания при перегрузке $I_{пер}/I_н$	Пределы регулирования времени срабатывания, с	
			номинального тока расцепителя, А	тока уставки короткого замыкания $I_к/I_н$			при токе перегрузки 5$I_н$ постоянного и 6$I_н$ переменного тока	в зоне короткого замыкания
А-3733С	440	400	160—250	2—6	1,25 без защиты в зоне перегрузки	1,2—1,3	4—16 без защиты в зоне перегрузки	0,1—0,25 (при постоянном токе) 0,1—0,4 (при переменном токе)
А-3733С	660		250—400	3—10		1,15—1,3		
А-3734С	660							
А-3733С	440		160—250	2—6		1,2—1,3		
А-3733С	660		250—400	3—10		1,15—1,3		
А-3734С	660							
А-3743С	440	630	250—400	2—6		1,2—1,3		
А-3743С	660		400—630	3—10		1,15—1,3		
А-3744С	660							
А-3743С	440		250—400	2—6	1,25	1,2—1,3	4—16	
А-3743С	660		400—630	3—10		1,15—1,3		
А-3744	660							

Примечание. Ток несрабатывания при перегрузке для всех исполнений выключателей составляет $I_{пер}/I_н$=1,05.

Таблица 6-11

Технические данные токоограничивающих выключателей серии А-3700 с тепловыми и электромагнитными расцепителями

Исполнение выключателя	Номинальное напряжение, В		Номинальный ток, А		Ток уставки электромагнитных расцепителей, А	Допустимое отклонение тока уставки электромагнитных расцепителей, А
	постоянного тока	переменного тока	выключателя и электромагнитного расцепителя	теплового расцепителя		
А-3715Б	440	—	160	16—160	600	±90
					960*	±140
		660			630	±95
					1600*	±240

Продолжение табл. 6-11

Исполнение выключателя	Номинальное напряжение, В		Номинальный ток, А		Ток уставки электромагнитных расцепителей, А	Допустимое отклонение тока уставки электромагнитных расцепителей, А
	постоянного тока	переменного тока	выключателя и электромагнитного расцепителя	теплового расцепителя		
А-3715Б	440	380	160	16—160	630 1600*	±125 ±320
А-3716Б	—	660	160	16—160	630 1600*	±95 ±240
		380	160	16—160	630 1600*	±125 ±320
А-3725Б	440	— 660	250	160, 200 250	1500 2500	±220 ±370
		380	200	170	2000	±400
А-3726Б	—	660 380	250 200	160, 200 250, 170	2500 2000	±370 ±400
А-3735Б	440	— 660	400	250, 320, 400	2400 4000	±360 ±600
А-3736Б	—	660	400	250, 320, 400	4000	±600
А-3745Б	400 —	— 660	630	400, 500, 630	3800 6300	±570 ±950
А-3746Б	—	660	630	400, 500, 630	6300	±950

* Для выключателей с тепловыми расцепителями на токи не ниже 32 А.

Примечания: 1. Номинальный ток уставки перегрузки $I_{пер}/I_н = 1{,}25$ для всех типов выключателей.

2. Ток несрабатывания для всех типов выключателей $1{,}05I_н$; ток срабатывания $1{,}25I_н$.

Таблица 6-12

Ток включения дистанционного привода выключателей серии А-3700

Тип выключателя	Ток выключателя, А						Тип выключателя	Ток выключателя, А					
	постоянный		переменный					постоянный		переменный			
	110 В	220 В	127 В	220, 230 В	380, 440 В	660 В		110 В	220 В	127 В	220, 230 В	380, 440 В	660 В
А-3710 А-3720	18	9	16	9	6	3,5	А-3730 А-3740			31,5	18	10,5	7

Примечание. Дистанционный привод рассчитан на напряжения при однофазном переменном токе 50 Гц — 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415 и 650 В.

Таблица 6-13

Максимальный ток катушки дистанционного расцепителя выключателей серии А-3700

Тип выключателя	Выключатели с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями				Выключатели с электромагнитными и тепловыми расцепителями						Выключатели с электромагнитными расцепителями и неавтоматические выключатели					
	Постоянный и переменный ток, А		Переменный ток, А		Постоянный ток, А		Переменный ток, А				Постоянный ток, А		Переменный ток, А			
	110 В	220 В	380 В	440 В	110 В	220 В	110 В	220 В	380 В	440 В	110 В	220 В	110 В	220 В	380 В	440 В
А-3710 А-3720	0,4	0,8	0,7	0,8	1,6	1,6	1,1	2,5	4,3	5,0	1,6	1,6	1,1	2,5	4,3	5,0
А-3730 А-3740	0,8	1,6	1,4	1,6	1,8	1,8	1,3	2,8	4,5	5,6	1,8	1,8	1,3	2,8	4,5	5,6

Примечание. Дистанционный расцепитель рассчитан на работу при напряжении 110—220 или 220—240 В однофазного переменного тока частотой 50 Гц.

Время-токовая характеристика выключателя типа А-3710Б с тепловыми расцепителями дана на рис. 6-27.

Номинальный режим работы катушки дистанционного расцепителя — кратковременный.

Расцепитель минимального напряжения срабатывает при напряжении ниже 0,3 номинального при переменном токе и ниже 0,2 номинального при постоянном.

Коммутационная способность вспомогательных контактов выключателей серии А-3700:

Ток включения и отключения:

при постоянном токе напряжением:

110 В . . . . . до 4 А

220 В . . . . . До 0,5 А

440 В . . . . . до 0,35 А

при переменном токе напряжением:

127—380 В . . . . . до 15 А

550—660 В . . . . . до 10 А

Число циклов включено — отключено до 50

Полное время срабатывания выключателя с приводом не превышает 0,3 с.

На рис. 6-28 приведена электрическая схема соединения выключателя с полупроводниковым расцепителем токоограничивающего исполнения с дистанционным управлением.

6-13. ПРОВЕРКА И НАСТРОЙКА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ А-3700

Проверяется соответствие параметров выключателя проектным данным. Производится его опробование вручную и дистанционно, причем проверяется соответствие: номинального напряжения и рода тока дистанционного привода, уставки электромагнитных и тепловых расцепителей.

Для выключателей с полупроводниковыми расцепителями необходимо проверить следующие параметры: номинальное напряжение сети, номинальный ток расцепителя, кратность тока срабатывания в зоне к. з., время срабатывания в зоне перегрузки, время срабатывания в зоне к. з. (для выключателей селективного исполнения), напряжение питания дистанционного расцепителя и блока управления при питании его от постороннего источника.

Для проверки работоспособности выключателей с полупроводниковыми расцепителями необходимо подать оперативное напряжение и опробовать вручную и дистанционно включение и отключение выключателя.

Четкость взвода, включение и отключение выключателя дистанционным приводом проверяются при напряжениях 0,85 и 1,1 номинального путем включения и отключения выключателя подряд 3 раза с интервалом между циклами 5 с.

Привод считается выдержавшим испытание, если он работает четко, без заеданий и остановок в промежуточных положениях.

Для проверки работоспособности полупроводниковых расцепителей необходимо собрать испытательную схему (рис. 6-29) и подсоединить выходные концы *1*, *2*, *3*, *4* к соответствующим гнездам на лицевой стороне расцепителя.

Включить автомат и подать от испытательной схемы напряжение 0,85—1,15 номинального; при включении рубильников *SA* и *S* выключатель должен отключиться за время не более 10 мин (если он имеет защиту в зоне перегрузки); при нажатии кнопки *SB* выключатель отключается мгновенно.

После проверки выключателя на работоспособность можно настраивать параметры по-

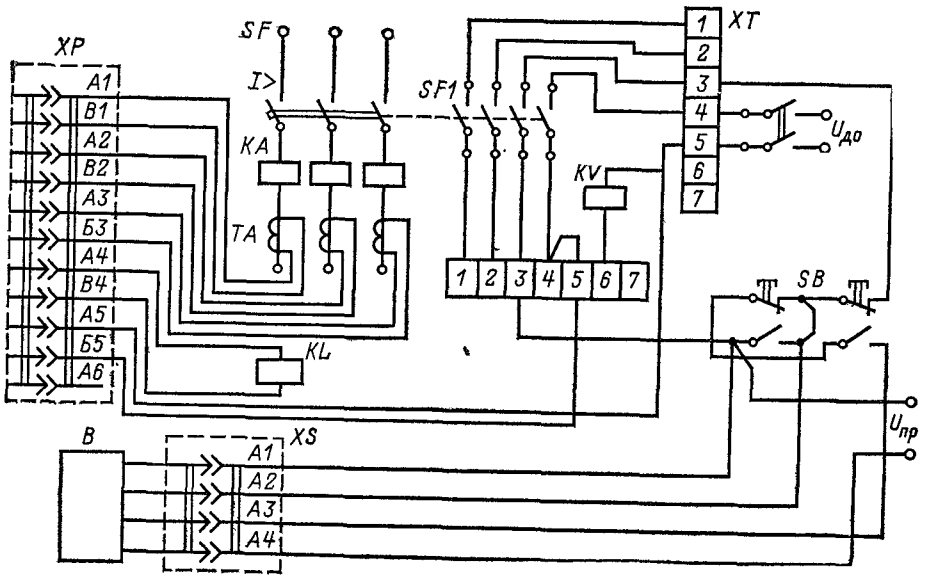


Рис. 6-28. Электрическая схема соединений автоматических выключателей серии А-3700.

KV — расцепитель минимального напряжения; *KA* — электромагнитный расцепитель; *XP* — штепсельный разъем полупроводникового расцепителя; *KL* — расцепитель дистанционный; *B* — привод дистанционный; *XS* — штепсельный разъем привода; $U_{пр}$ — напряжение привода; $U_{до}$ — напряжение дистанционного привода.

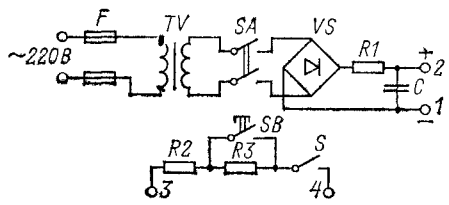


Рис. 6-29. Схема для проверки работоспособности выключателей серии А-3700 с полупроводниковыми расцепителями.

F — предохранитель; *TV* — трансформатор напряжения (выходное напряжение выбирается в зависимости от выходного напряжения расцепителя); *SA* — рубильник; *VS* — выпрямительный мост (диоды типа Д-226); *R1, R2* — резисторы (типа МЛТ-0,5 1 кОм); *R3* — резистор типа МЛТ-0,5 20 кОм; *SB* — кнопка; *S* — тумблер; *C* — конденсатор типа К50-3-250-20.

лупроводникового расцепителя максимального тока.

Для проверки уставок выключателей постоянного тока необходимо собрать испытательную схему с генератором постоянного тока (рис. 6-30). К гнездам *1* и *2* на лицевой стороне блока управления через резистор *R* (1 кОм) подводится напряжение от независи-

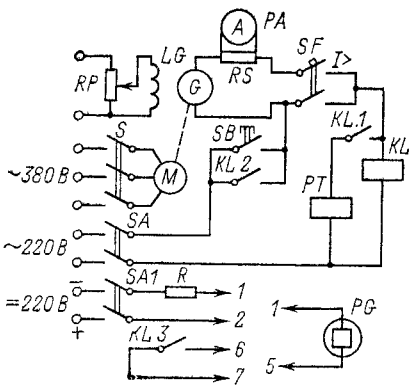


Рис. 6-30. Схема проверки выключателя серии А-3700 с полупроводниковыми расцепителями.

SF — автомат; *G* — генератор постоянного тока; *M* — асинхронный электродвигатель; *KL* — реле промежуточное; *PT* — электрический секундомер; *R* — резистор, *RS* — шунт измерительный; *PG* — осциллограф; *PA* — милливольтметр, *SB* — кнопка; *S, SA, SA1* — рубильники.

мого источника постоянного тока 220 В. Проверка уставок производится в двух фазах.

Уставка тока срабатывания в зоне перегрузки определяется подъемом тока выше номинального; при вращении ручки «ном. ток» необходимо добиться, чтобы при 1,2 $I_н$ выключатель не срабатывал за время не менее 800 с, а при токе 1,3 $I_н$ срабатывал за время не более 800 с. В целях экономии на ожидание срабатывания выключателя от перегрузки рекомендуется подать 3-кратный по отношению к номинальному ток. В этом случае время срабатывания от перегрузки не должно выходить за рамки разброса согласно время-токовой характеристике, приведенной на рис. 6-31. В противном случае необходимо проверить уставку тока срабатывания в зоне перегрузки по электронному осциллографу, присоединяемому к гнездам *1* и *5* на лицевой стороне расцепителя. При подаче на выключатель тока, равного

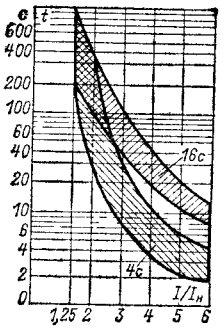


Рис. 6-31. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей с полупроводниковыми расцепителями серии А-3700 в зоне перегрузки.

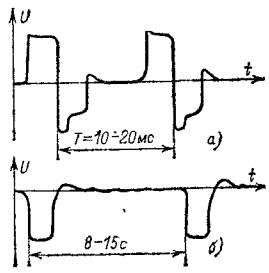


Рис. 6-32. Осциллограммы, характеризующие работоспособность полупроводникового расцепителя выключателей серии А-3700.

а — ток уставки менее заданного; *б* — ток срабатывания перегрузки равен заданному.

1,25 $I_н$, на экране осциллографа должна появиться последовательность разнополярных импульсов частотой 50—100 Гц (рис. 6-32, *а*). Вращая ручку «ном. ток» против часовой стрелки, нужно добиться исчезновения импульсов на экране осциллографа. Через 10—12 с на экране осциллографа могут появиться одиночные отрицательные импульсы (рис. 6-32, *б*). Это положение ручки «ном. ток» будет соответствовать уставке тока в зоне перегрузки.

Проверка уставки тока срабатывания в зоне к. з. производится следующим образом. Установить ручку «$I/I_н$ короткое замыкание» на заданную кратность срабатывания и подать ток на главные контакты выключателя. Вращая ручку «$I/I_н$ короткое замыкание», добиться отключения выключателя. Разброс уставок в зоне к. з. может находиться в пределах 0,9—1,1 заданного при проверке одновременно двух полюсов выключателя и 0,8—1,2 при проверке по одному или трем полюсам (для переменного тока). Эту операцию необходимо проводить быстро, так как держать выключатель под током, равным (5÷6) $I_н$, разрешается не более 20 с с последующим перерывом в течение 20 мин.

Уставка выдержки времени в зоне к. з. определяется при подаче тока, превышающего уставку тока короткого замыкания на 20—25 %.

Разброс времени срабатывания должен быть не более ±10 % заданного времени срабатывания выключателя при коротком замыкании.

Проверка работы расцепителя минимального напряжения. Условием правильной работы

расцепителя является обеспечение надежного отключения выключателя без выдержки времени при напряжении на катушке ниже 0,3 номинального при переменном токе и ниже 0,2 номинального при постоянном; выключатель не должен отключать при напряжении на катушке 0,55 номинального и выше, не должен препятствовать включению выключателя при напряжении на катушке 0,85 номинального и выше.

Проверка уставок срабатывания выключателей токоограничивающего исполнения производится от нагрузочного устройства постоянного и переменного токов, с помощью которых может быть получен нагрузочный ток до 8500 А. К таким устройствам можно отнести нагрузочный трансформатор типа НТ-10, разработанный ЛенПЭО ВНИИПЭМ.

Разброс токов срабатывания электромагнитных и полупроводниковых расцепителей лежит в пределах ±15 % токов уставки. Проверка токов уставок выключателей с полупроводниковыми расцепителями производится при снятом блоке управления и закороченных измерительных элементах.

При испытании дистанционного привода проверяется время включения и отключения выключателя при номинальном напряжении в цепи дистанционного привода. Время включения и отключения должно быть не более 0,3 с.

6-14. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИИ А-3100

Технические данные. Значения номинального тока срабатывания тепловых расцепителей или тепловых элементов комбинированных расцепителей при нагрузке одновременно всех полюсов выключателя с холодного состояния при температуре окружающего воздуха 25 °С должны находиться в пределах, указанных в табл. 6-14. Пределы значений тока мгновенного срабатывания электромагнитных элементов комбинированных расцепителей даны в табл. 6-15.

Таблица 6-14

Калибровка тепловых расцепителей выключателей серии А-3100

Величина выключателя	Кратность тока по отношению к номинальному току расцепителя	
	Выключатель не срабатывает	Выключатель срабатывает в течение не более 1 ч
I	1,1	1,35
II, III, IV, V	1,1	1,45

Таблица 6-15

Пределы тока срабатывания максимальных расцепителей выключателей серии А-3100

Величина выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Ток уставки мгновенного срабатывания, А	Пределы уставок, А		
			нижний	верхний	
				переменный ток	постоянный ток
II	100	150	100	200	240
		200	140	260	360
		250	170	330	400
		300	210	390	480
		400	280	520	640
		500	250	650	800
		600	420	780	960
		800	560	1050	1240
		1000	700	1300	1600
III	100	430	360	500	650
		600	510	700	900
		800	680	950	1200
		840	700	1000	1400
IV	200—250	1050	900	1200	1700
		1400	1150	1600	2300
		1750	1450	2000	2800
V	600	1750	1500	2000	2000
		2100	1800	2400	2400
		2800	2350	3200	3200
		3500	3000	4000	4000
		4200	3500	5000	5000

Примечания: 1. Электромагнитные элементы расцепителей на нижнем пределе не должны срабатывать, а при верхнем пределе должны срабатывать четко.

2. Расцепители выключателей I и V величин могут быть исполнены и маркированы для одного рода тока (постоянного или переменного частотой 50 Гц). Расцепители выключателей III и IV величин исполняются для любого рода тока (постоянного и переменого частотой 50 Гц).

3. Сопротивление изоляции выключателей измеряется мегаомметром на напряжение 500 В и составляет не менее 10 МОм.

4. Изоляция выключателя испытывается напряжением 2000 В переменного тока в течение 1 мин.

5. Отключающий расцепитель четко срабатывает при напряжении 70—105 % номинального.

6 Вспомогательные контакты выключателя допускают продолжительную нагрузку током 1 А и способны коммутировать предельные токи: включения — 10, отключения — 0,4 А при индуктивной нагрузке и напряжении 220 В постоянного и переменного токов.

7. Время отключения выключателей при токах короткого замыкания не более: для выключателей А-3110—0.025; А-3120—0,024; А-3130—0,031; А-3160—0,04 с.

6-15. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ТИПА АП-50

Технические данные. Токи срабатывания электромагнитных расцепителей выключателей постоянного и переменного токов с тепловыми и электромагнитными расцепителями, с тепловыми расцепителями типа АП-50 приведены в табл. 6-16, защитные характеристики — на рис. 6-33.

Регулирование уставки производится рычагом на механизме свободного расцепления автомата. При перемещении рычага вниз ток уставки уменьшается до 60 %.

Время остывания теплового элемента после срабатывания расцепителя составляет не более 2 мин.

Таблица 6-16

Технические данные автоматических выключателей типа АП-50

Номинальный ток расцепителя, А	Расцепители					
	тепловой				электромагнитный	
	Предел регулирования номинального тока уставки, А	Время срабатывания при нагрузке			Значения токов мгновенного срабатывания (отсечка), А	
		1,1 тока уставки	1,35 тока уставки	6-кратный ток уставки	на переменном токе	на постоянном токе
1,6	1—1,6	Не срабатывает в течение 1 ч	Время срабатывания не более 30 мин	Время срабатывания 1—10 с	11,5	14
2,5	1,5—2,5				17,5	22
4	2,5—4				28	36
6,4	4—6,4				45	57
10	6,4—10				70	90
16	10—16				110	140
25	16—25				175	320
40	25—40				280	352
50	30—50				350	440

Примечания: 1. Данные приведены при нагреве всех полюсов одновременно с холодного состояния при температуре окружающей среды 35 °С.

2. Электромагнитный расцепитель не срабатывает при испытательном токе на 15 % ниже значений, указанных в таблице, и срабатывает при испытательном токе на 15 % выше этих значений. Промежуточные значения испытательного тока образуют зону производственных допусков на неточность калибровки и на неточность срабатывания электромагнитных расцепителей.

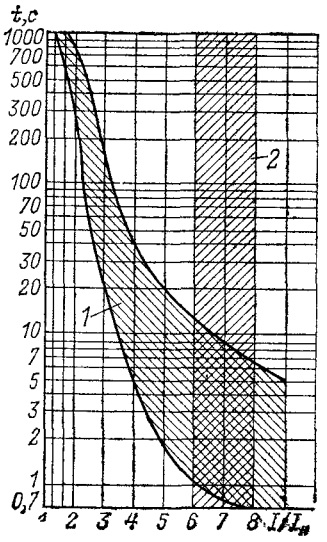


Рис. 6-33. Время-токовая характеристика выключателей АП-50.

1 — зона разброса срабатываний для тепловых расцепителей; *2* — зона разброса срабатываний для электромагнитных расцепителей.

6-16. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИИ АЕ-2000

Технические данные. Термическая и электродинамическая стойкость выключателей без расцепителей максимального тока приведена в табл. 6-17.

Время-токовая характеристика срабатывания показана на рис. 6-34. В выключателях с расцепителями максимального тока могут быть встроены дополнительные расцепители (табл. 6-18).

Расцепитель минимального напряжения отключает автомат при напряжении от 70 до 35 % номинального, допускает включение при

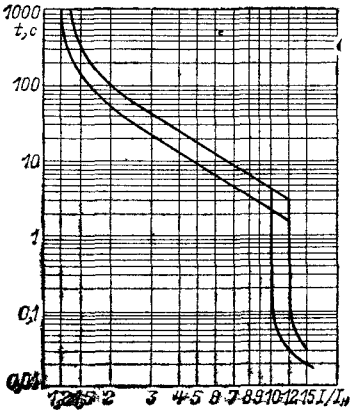


Рис. 6-34. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей серии АЕ-2000 с комбинированным расцепителем при 20 °С.

напряжении расцепителя не менее 85 % и не допускает включения при 35 % номинального напряжения на расцепителе.

Независимый расцепитель четко срабатывает при напряжении от 70 до 120 % номинального.

В табл. 6-19 приведены данные о коммутационной способности вспомогательных контактов выключателей.

Таблица 6-17

Термическая и электродинамическая стойкость выключателей серии АЕ-2000

Исполнение выключателя	Номинальный ток, А	Номинальный ток расцепителя, А	Допустимое действующее значение периодической составляющей тока к. з., кА ($\cos\varphi = 0{,}4$)			Допустимый ток к. з., кА ($\tau = 0{,}01$ с)	
			220 В	380 В	500 В	110 В	220 В
АЕ-2030	25	0,6—1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
		2,0—6,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		8,0—12,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
		16—25	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
АЕ-2040	63	10—12,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
		16	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
		20—25	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
		32—63	6,0	6,0	5,0	5,0	4,0
АЕ-2050	100	16	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
		20—25	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
		32—40	6,0	6,0	5,0	6,0	6,0
		50—100	9,0	9,0	8,0	10,0	10,0

Примечание. τ — постоянная времени цепи постоянного тока.

Таблица 6-18

Напряжение катушек дополнительных расцепителей для выключателей серии АЕ-2000

Вид дополнительного расцепителя	Номинальное напряжение, В	
	Постоянный ток	Переменный ток
Независимый	24, 48, 110, 220	24, 36, 110, 127, 220, 380
Минимального напряжения	48, 110, 220	440

Продолжение табл. 6-18

Таблица 6-19

Предельная включающая и отключающая способность контактов вспомогательной цепи выключателей серии АЕ-2000

Номинальный ток контактов, А	Номинальное напряжение, В	Действующее значение переменного тока при $\cos\varphi = 0{,}4$ и более, А		Значения постоянного тока при $\tau = 0{,}001$ с, А	
		Включение	Отключение	Включение	Отключение
2,5	110	—	—	4,0	0,4
	127	25	2,5	—	—
	220	20	2,0	2,0	0,2
	380	10	1,0	—	—
	440	10	1,0	—	—
	500	10	1,0	—	—

6-17. ПРОВЕРКА И ИСПЫТАНИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИЙ А-3100, АЕ-2000 И ТИПА АП-50

Проверка тепловых расцепителей выключателей серии А-3100 производится испытательным током, равным двукратному номинальному току расцепителей и трехкратному для выключателей А-3120, А-3130 и А-3140. При этом следует учитывать, что время срабатывания выключателей (табл. 6-20) дано заводом только для случая одновременной нагрузки испытательным током всех полюсов выключателя.

Проверка тепловых элементов в условиях наладки производится двукратным или трехкратным номинальным током каждого полюса в отдельности. При нагрузке одного полюса выключателя начальный ток срабатывания увеличивается примерно на 25—30 % по срав-

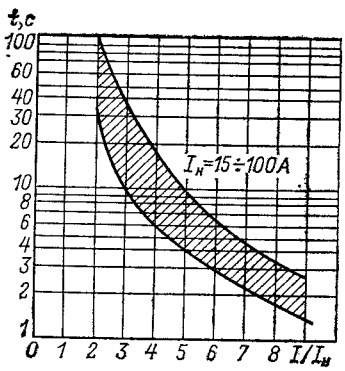


Рис. 6-35. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей А-3110.

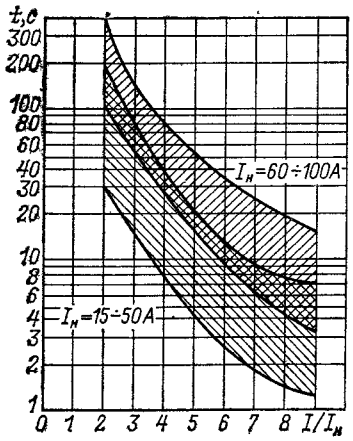


Рис. 6-36. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей А-3120.

нению с начальным током срабатывания при нагрузке одновременно всех полюсов выключателя.

Время срабатывания тепловых расцепителей проверяется на соответствие время-токовым характеристикам, приведенным на рис. 6-35—6-38 для выключателей на постоянном токе и в табл. 6-20 для выключателей на переменном токе.

Если время срабатывания выходит за пределы, указанные в табл. 6-20, или не согласуется с данными рис. 6-35—6-38, выключатель проверяется по начальным токам срабатывания. Предельный ток срабатывания для выключателей А-3160 равен 1,35 $I_н$, для остальных типов (А-3110, А-3120, А-3130 и А-3140) — 1,45 $I_н$. Повторное включение выключателя после срабатывания от перегрузки возможно по истечении времени, не превышающего для выключателей А-3110 и А-3160 — 1 мин, А-3120 — 2,5 мин, А-3130 — 3 мин, А-3140 — 4 мин.

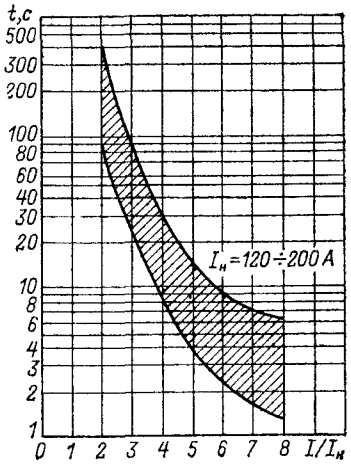


Рис. 6-37. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей А-3130.

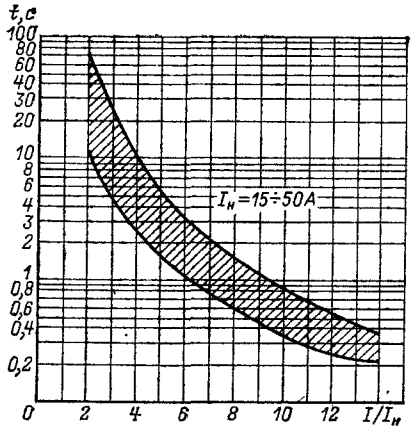


Рис. 6-38. Время-токовая характеристика срабатываний выключателей А-3160.

Проверка электромагнитных расцепителей у выключателей, не имеющих тепловых элементов, производится включением каждого полюса на нагрузочное устройство. Проверяется

Таблица 6-20

Характеристики тепловых элементов расцепителей выключателей серии А-3100

Исполнение выключателей	Номинальный ток расцепителя, А	Испытательный ток, А, при температуре окружающего воздуха, °С									Время срабатывания при одновременной нагрузке всех полюсов испытательным током, с	Максимально допустимое время испытания под током, с
		0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40		
А-3110	15	37	35	34	33	32	30	29	27	25	19—27	50
	20	48	46	44	43	42	40	38	37	35	27—37	70
	25	59	57	55	54	52	50	48	47	45	35—45	90
	30	74	71	68	66	63	60	57	54	50	55—65	130
	40	96	91	89	86	83	80	77	74	70	50—80	160
	50	114	111	109	106	103	100	97	90	90	80—100	200
	60	137	133	131	127	124	120	119	113	109	70—90	180
	70	157	154	151	150	144	140	136	133	129	75—95	190
	85	190	187	187	182	174	170	166	162	156	110—140	240
	100	228	224	218	212	206	200	194	187	180	100—150	240
А-3160	15	34	33	32	32	31	30	29	29	28	15—20	40
	20	45	44	43	42	41	40	39	38	37	18—23	45
	25	57	56	54	53	51	50	49	47	46	18—27	50
	30	67	66	64	63	62	60	59	57	55	28—35	70
	40	90	88	86	84	82	80	78	76	74	35—45	90
	50	114	112	109	106	103	100	97	94	91	58—78	150

Продолжение табл. 6-20

Исполнение выключателей	Номинальный ток расцепителя, А	Испытательный ток, А, при температуре окружающего воздуха, °С									Время срабатывания при одновременной нагрузке всех полюсов испытательным током, с	Максимально допустимое время испытания под током, с
		0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40		
А-3120	15	50	50	49	48	46	45	44	43	41	18—22	45
	20	67	66	65	64	62	60	59	57	55	18—22	45
	25	84	83	81	80	77	75	73	71	69	24—30	60
	30	101	99	97	96	92	90	88	85	83	28—38	70
	40	134	132	130	128	123	120	117	114	110	40—50	100
	50	168	165	162	161	154	150	146	143	138	50—60	120
	60	202	198	194	193	184	180	176	171	166	50—60	120
	80	269	264	259	257	246	240	234	228	221	70—80	160
	100	336	330	324	321	306	300	293	28	276	60—70	140
А-3130	120	403	396	389	385	369	360	351	342	331	65—75	150
	140	407	462	454	449	431	420	410	399	386	65—75	150
	170	571	561	551	546	523	510	497	485	469	68—78	150
	200	672	660	648	542	615	600	585	570	552	78—88	170
	250	840	825	810	803	796	750	731	713	690	60—70	140
А-3140	300	1008	990	972	963	923	900	878	855	828	65—75	150
	350	1176	1155	1134	1124	1076	1050	1024	998	966	65—75	150
	400	1344	1310	1296	1284	1230	1200	1170	1140	1104	50—60	120
	500	1680	1650	1620	1605	1538	1500	1463	1425	1380	50—60	120
	600	2016	1980	1944	1926	1845	1800	1755	1710	1656	65—75	150

несрабатывание выключателя при токах ниже тока уставки для выключателей А-3110 на 30 %, а для всех прочих — на 15 %. Затем испытательный ток поднимается до тока срабатывания. При этом последний не должен выходить за пределы тока уставки согласно табл. 6-21.

Чтобы убедиться, что отключение выключателя произошло от электромагнитного, а не от теплового расцепителя у выключателей с комбинированными расцепителями, необходимо после каждого отключения быстро отключить нагрузочное устройство и сразу же включить выключатель. Если выключатель включится нормально, отключение последовало от электромагнитного элемента. При срабатывании теплового элемента повторно выключатель не включится.

Испытание выключателей серии АЕ-2000 производится так же, как и выключателей серии А-3100. Допустимый диапазон срабатываний выключателей с комбинированными расцепителями должен соответствовать время-токовой характеристике, приведенной на рис. 6-34.

Несрабатывание электромагнитных расцепителей проверяется током на 20 % ниже тока уставки, а для проверки срабатывания электромагнитного расцепителя ток увеличивается на 20 % выше тока уставки.

Выключатели типа АП-50 проверяются аналогично выключателям серии А-3100. Допустимый диапазон срабатывания максимальных расцепителей выключателей должен быть: с токами отсечки 3,5 $I_н$±15 %, 8 $I_н$±20 %, 11 $I_в$ плюс 15 % — минус 30 %.

Расцепители максимального тока должны срабатывать в диапазоне —20÷+40 % номинального тока расцепителя значений, указанных в табл. 6-16.

Тепловые расцепители в условиях наладки должны проверяться трехкратным током уставки, время срабатывания должно находиться в соответствии с время-токовой характеристикой, приведенной на рис. 6-33.

6-18. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ «ЭЛЕКТРОН»

Технические данные выключателей приведены в табл. 6-22. Выключатели поставляются в комплекте с блоком МТЗ (максимально-токовой защиты), выполненным на полупроводниковых элементах. Зависимость времени срабатывания выключателя от тока перегрузки характеризуется одной из кривых, расположенных в зоне, ограниченной четырьмя характеристиками, приведенными на рис. 6-39.

Время включения выключателя с электродвигательным приводом не превышает 0,4 с.

Мощность, потребляемая электродвигательным приводом выключателя, составляет 1,5 кВ·А на переменном токе и 1,1 кВт на постоянном.

Таблица 6-21

Характеристика электромагнитных расцепителей выключателей серии А-3100

Тип выключателя	Комбинированный расцепитель		Электромагнитный расцепитель			Отклонение от тока уставки		
	Номинальный ток, А	Ток уставки мгновенного срабатывания (постоянный и переменный), А	Номинальный ток, А	Ток уставки мгновенного срабатывания, А		Нижний предел, А	Верхний предел, А	
				Переменный	Постоянный		при переменном токе	при постоянном токе
А-3110	15	150	15	150		100	200	240
	20	200	20	200		140	260	360
	25	250	25	250		170	330	400
	30	300	—	—	—	210	390	480
	40	400	40	300	400	280	520	640
	50	500	—	—	—	350	650	800
	60	600	60	500	600	420	780	960
	100	1000	100	800	1000	700	1300	1600
А-3120	15, 20	430	30	—	430	360	500	650
	25, 30	—	—	—	—	510	700	900
	40, 50, 60	600	100	600	—	—	—	—
	80, 100	800	—	—	800	680	950	1200
А-3130	120	840	200	840		700	1000	1400
	200	1400	—	1400		1150	1600	2300
А-3140	250	1750		1750		1500	2000	2000
	300	2100		2100		1800	2400	2400
	400	2800	600	2800		2350	3200	3200
	500	3500		3500		3000	4000	4000
	600	4200		4200		3500	5000	5000

Примечание. На нижнем пределе электромагнитные расцепители не должны срабатывать, на верхнем должны срабатывать четко.

Выключатель имеет контакт несоответствия, который замыкает цепь сигнализации при срабатывании максимального расцепителя и остается замкнутым до ручного возврата.

МТЗ по времени срабатывания в зависимости от тока может быть выполнена согласно табл. 6-23.

Датчиками МТЗ являются трансформаторы тока для переменного и магнитные усилители для постоянного тока. Реле МТЗ выдает сигнал на срабатывание расцепителя МТЗ (в выключателях переменного тока подается напряжение на его катушку, в выключателях постоянного тока шунтируется его удерживающая катушка, на которой было напряжение).

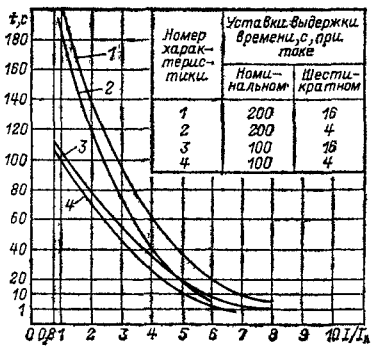


Рис. 6-39. Время-токовые характеристики реле МТЗ выключателей серии «Электрон» в зоне перегрузки.

Срабатывание реле МТЗ должно обеспечивать точность: для уставок по току ±15 %; для уставок по времени ±15 % при коротком замыкании и ±20 % в зоне перегрузки от значений, указанных на шкалах, при температуре 20±5 °С.

Электродвигательный привод рассчитан на работу с частотой включения 20 в час, а также допускает 10 включений подряд с холодного состояния с паузами между двумя последовательными включениями продолжительностью 10 с. Независимый расцепитель рассчитан на кратковременную работу и срабатывает при $(0{,}7 \div 1{,}2)\ U_н$.

Минимальный расцепитель обеспечивает отключение выключателя при снижении напряжения в защищаемой цепи на 70—35 % номинального, не производит отключения включенного выключателя при 70 % номинального напряжения и не препятствует включению выключателя при 85 % номинального напряжения и выше.

Питание МТЗ для выключателей постоянного тока должно осуществляться от незави-

Таблица 6-22

Номинальные токи выключателей автоматических серии «Электрон» и номинальные уставки максимальной токовой защиты

Тип выключателя	Типоисполнение		Номинальный ток выключателя[1], А	Номинальный ток МТЗ[1], А	Калибруемая уставка				
					по току в кратности к $I_н$		по времени в зоне перегрузки, с		
	по способу установки	обозначение			в зоне перегрузки	в зоне к. з.	при $I_н$	при $6I_н$	при к. з.
Э06	Стационарные	Э06С	800	250 400 630 800	0,8; 1,25; 2	3; 5; 7; 10	100; 150; 200	4; 8; 6	0,25; 0,45; 0,7
Э25		Э25С	3200	— 800					
				1000 1250 1600 2000 2500 — 3200		3; 5; 7			
Э40		Э40С	6300	— 3200 4000		3; 5			
				6300		3			
Э06	Выдвижные	Э06В	630	250 400 630		3; 5; 7; 10			
Э16		Э16В	1600	630 1000 1250 1600		3; 5; 7			
Э25		Э25В	2500	— 1600 2000 2500					
Э40		Э40В	5000	— 2500					
				3200 4000 5000		5 3			

[1] Эксплуатируются в районах с умеренным (при температуре от —40 до +40 °С) и холодным климатом (при температуре от —60 до +10 °С).

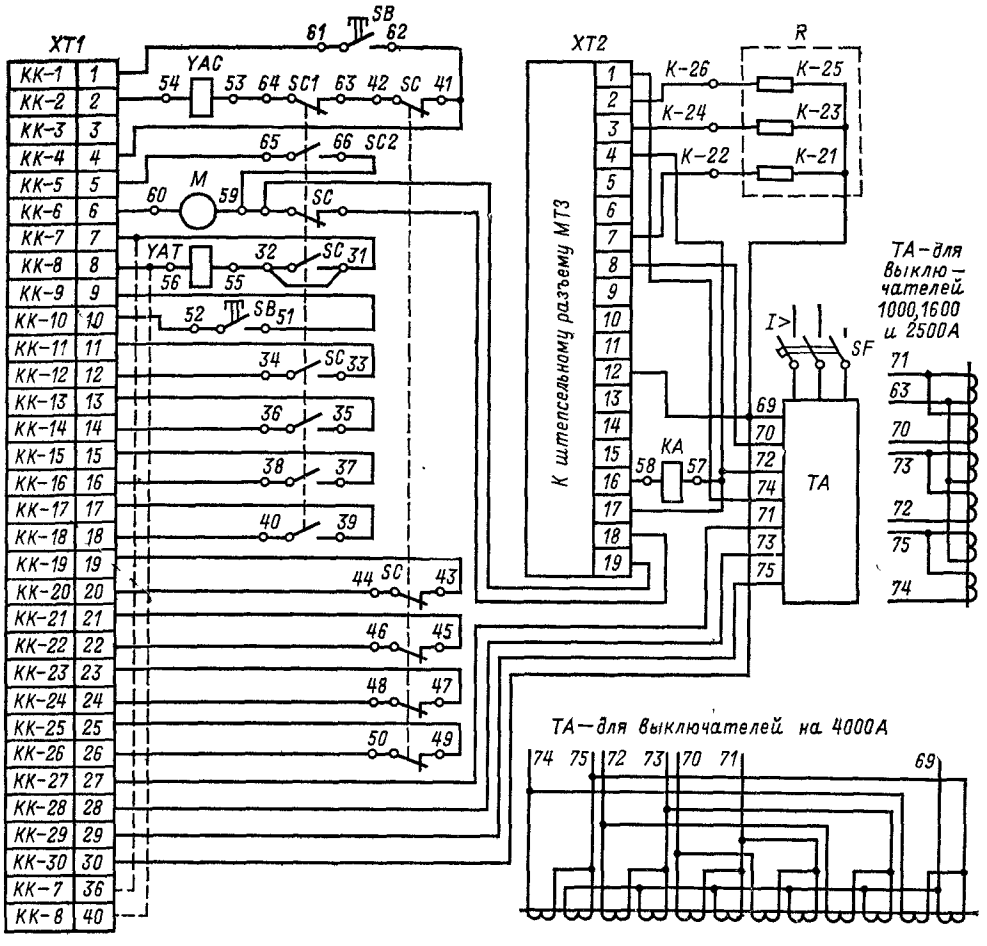


Рис. 6-40. Схема управления выключателями типа Э10—Э40 переменного тока с реле МТЗ мгновенного и замедленного действия.

Таблица 6-23

Характеристика срабатывания МТЗ автоматических выключателей серии «Электрон»

Положение переключателя реле МТЗ	Время срабатывания, с			
	при перегрузке	при к. з. при установленной на автомате кратности тока		
		1—2,2	2,2—3	3 и выше
Обе перемычки замкнуты	Обратнозависимое от тока (см. рис. 6-39)	Равно выбранной уставке реле МТЗ		
Верхняя перемычка разомкнута	То же	МТЗ срабатывает мгновенно		
Нижняя перемычка разомкнута	МТЗ срабатывает мгновенно	То же		

симого источника постоянного тока 110 и 220 В, коэффициент пульсаций источника тока не более 0,15; для выключателей переменного тока источником оперативного тока являются трансформаторы тока.

Блок сопротивлений у выключателей переменного тока подает на МТЗ напряжение, пропорциональное току в защищаемой цепи, а в выключателях постоянного тока служит для понижения напряжения питания реле МТЗ.

Схема управления выключателями Э10—Э40 приведена на рис. 6-40.

Сопротивление изоляции каждого полюса и заземленной плиты автомата должно быть не ниже 20 МОм.

6-19. ПРОВЕРКА МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ «ЭЛЕКТРОН»

Реле МТЗ откалибровано на заводе-изготовителе на уставки по току и времени, приведенные в табл. 6-22. Программа работ мак-

симальной токовой защиты осуществляется ручками управления *3—7*, которые выведены на лицевую панель реле МТЗ (рис. 6-41).

Исправность и работоспособность блока МТЗ для выключателей на переменном токе проверяется подачей сигнала от сети переменного тока 220 В поочередно к зажимам *30—27, 30—28, 30—29* (рис. 6-40) не более чем на

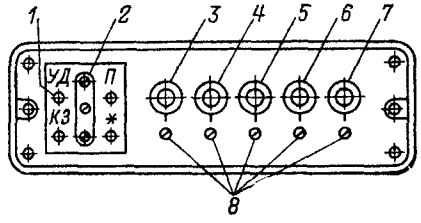


Рис. 6-41. Лицевая панель реле МТЗ.

1 — контрольные зажимы; *2* — переключатель; *3* — ручка для регулирования уставки по току в зоне перегрузки; *4* — ручка для регулирования уставки по току в зоне короткого замыкания; *5* — ручка регулирования уставки по времени при нормальном токе; *6* — ручка для регулирования уставки по времени при 6-кратном токе; *7* — ручка для регулирования уставки по времени при к. з.; *8* — фиксирующие винты.

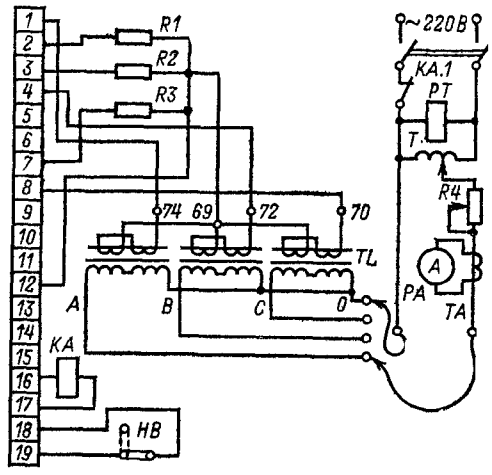


Рис. 6-42. Схема стенда для проверки реле МТЗ.

R1, R2, R3 — блок сопротивления (резисторы по 13 Ом); *TL* — трансформатор промежуточный; *R4* — реостат РСП-3, 30 Ом, 4 А; *Т* — автотрансформатор РНО-2-250; *ТА* — трансформатор тока типа И-54; *РТ* — электрический секундомер, *КА1* — вспомогательный контакт реле максимального тока.

2 с. При этом выключатель должен отключиться от отсечки.

Для проверки блока МТЗ выключателей, работающих на постоянном токе, необходимо подать оперативный постоянный ток 110 или 220 В и соединить зажимы *29—30* через резистор 1 кОм. При этом выключатель должен отключиться через 0,05—0,2 с, если ручка *4* будет повернута до упора против часовой стрелки, и через 1—2 с, если она повернута по часовой стрелке.

Для проверки работоспособности блока МТЗ у выключателей типа Э-40 переменного тока следует подавать на зажимы *30—27, 30—28, 30—29* переменный ток 380 В, так как от напряжения 220 В автомат не срабатывает.

Все работы по наладке защиты разбиваются на два этапа:

первый — проверка блока МТЗ на рабочих уставках и его работоспособности с помощью переносного стенда (примерная схема стенда дана на рис. 6-42);

второй — проверка действия защиты на отключение выключателя с одновременным подтверждением правильности настройки блока МТЗ на уставках перегрузки.

Проверка блока МТЗ на специальном стенде. Срабатывание реле перегрузки по току и времени производится подачей тока в фазы *А* и *С* блока МТЗ. Определяется ток срабатывания перегрузки. От заданной уставки допускается отклонение ±20 %.

Время работы реле перегрузки проверяется подачей тока 2 $I_н$. Оно не должно отличаться более чем на ±20 % от времени в соответствующей точке ампер-секундной характеристики реле. Производится проверка срабатывания реле перегрузки по току на других сочетаниях фаз: *А—В, В—С, А—0, В—0, С—0*. Одновременно с этим проверяется работоспособность блока на отключение закорачиванием контрольных точек *—*УД* (рис. 6-41). Опробование работоспособности производится при номинальном токе.

Проверка отсечки. Срабатывание реле МТЗ по току и времени производится подачей тока в фазы *А* и *В*, при этом момент срабатывания реле контролируется индикатором в точках *—*КЗ* (рис. 6-41), а время замеряется электросекундомером.

Работа реле МТЗ проверяется ускорением $T_{уск}$=0,045÷0,05 с при разомкнутой накладке *НВ* (рис. 6-42).

Проверка работы блока МТЗ первичным током на отключение выключателя осуществляется с помощью регулируемого источника нагрузочного тока. Предварительно настроенный на стенде блок МТЗ устанавливается на «свой» выключатель.

При проверке уставки по току в зоне перегрузки необходимо присоединить индикатор (вольтметр постоянного тока с внутренним сопротивлением не менее 5 кОм/В) к зажимам П и *, расположенным на лицевой панели реле МТЗ слева (рис. 6-41). Индикатор должен показывать напряжение 17—21 В для выключателей на постоянном токе и 17—21 В при подаче переменного тока для выключателей на переменном токе, при увеличении нагрузки тока от нуля. При некотором значении тока, равном току срабатывания на заданной уставке, показания индикатора должны резко уменьшиться до 0—3 В. Одновременно при номинальном токе защиты проверяется ее работоспособность на отключение выключателя закорачиванием точек *—*УД*.

При проверке уставки по току в зоне короткого замыкания (ручка *4*, рис. 6-41) индикатор подключается к зажимам *КЗ—*. Остальные операции аналогичны, т. е. момент срабатывания МТЗ фиксируется по резкому уменьшению показания индикатора (0—3 В).

При токе, превышающем уставку к. з. в 3 раза и более (при установке переключателя в положение «обе перемычки замкнуты»), время отключения не должно зависеть от положения ручки 7 и должно быть не более 0,1 с.

Д. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

6-20. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИЙ ВАБ-42 И ВАТ-42

Технические данные. Основные характеристики быстродействующих выключателей приведены в табл. 6-24. Линейные быстродействующие выключатели применяются типов ВАБ-42, а токоограничивающие — типов ВАТ-42.

Основные параметры контактной системы:

Давление между главными контактами, Н . . . . . 350—400
Сила нажатия дугогасительного контакта на неподвижный контакт, Н 120—140
Расстояние (раствор) между главными контактами, мм . . . . . 10—14
Провал главных контактов (зазор δ_1), мм . . . . . 1,5—2
Провал дугогасительного контакта (зазор δ_2), мм . . . . . 2—2,5

Продолжение

Расстояние между дугогасительным и неподвижным контактами в предвключенном положении, мм . . . 2,5—4
Зазор между подвижным контактом и упором в отключенном положении, мм . . . . . 2—3
Сопротивление постоянному току катушки включения при температуре +20 °С, Ом 2,5
Удерживающий ток катушки включения, А . . . . . 1,1—1,3
Ток отпадания якоря, А . . . . . 0,6—0,8
Падение напряжения при токе 2000 А на главных контактах, мВ . . . 10
Изоляция должна выдерживать при испытании током в течение 1 мин:
цепей коммутации главного тока, В 3000
цепей управления, В 2000

Таблица 6-24

Технические данные быстродействующих выключателей

Тип	Назначение	Номинальные данные: Напряжение, В	Номинальные данные: Ток, А	Ток уставки, А	Время отключения в безиндуктивной цепи, с	Цепи управления: Напряжение, В	Цепи управления: Ток включения, А	Цепи управления: Ток удержания/Ток отключения, А	Датчик отключения
ВАТ-42-2000/6Л ВАТ-42-2000/10Л ВАТ-42-2000/10ЛА ВАБ-42-2000/10Л	Для защиты полупроводниковых преобразователей, электрических машин и линий постоянного тока при к. з. и перегрузках в промышленных установках	660 1050 1050 1050	2000 2000 2000 2000	800—2000 или 1600—4000 или 2400—6000	0,012	220 110	40 65	1,5 3,0	РДШ
ВАТ-42-4000/6Л ВАТ-42-4000/10Л ВАТ-42-4000/10ЛА ВАБ-42-4000/10Л		660 1050 1050 1050	4000 4000 4000 4000	1600—4000 или 2400—6000 или 4000—8000	0,015	220 110	40 65	1,5 3,0	РДШ
ВАБ-43-4000/30Л		3300	4000	3000—5000		220 110	36 73	0,6 2,2/5	РДШ
ВАТ-42-6300-6Л ВАТ-42-6300/10Л ВАТ-42-6300/10ЛА ВАБ-42-6300/10Л		660 1050 1050 1050	6300 6300 6300 6300	4000—8000 или 6000—12 000	0,015 0,015 0,015 0,02	220 110	40 65	1,5 3,0	РДШ
ВАТ-42-10 000/6Л ВАТ-42-10 000/10Л		1050 1050	10 000 10 000	2400—6000 или 4000—8000 или 6000—12 000	0,015 0,025	220 110	80 130	3,0 3,8	2РДШ
ВАБ-43-4000/10К ВАБ-43-6000/10К	Для защиты преобразовательных установок от обратных токов	1050 1050	4000 6300	1200—2500 1200—2500	0,02 0,02	— —	— —	— —	—

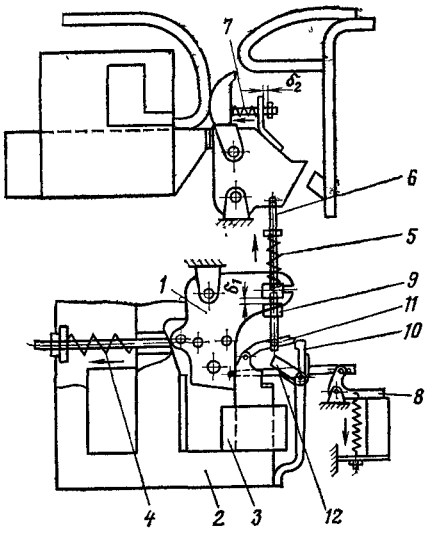


Рис. 6-43. Полюс выключателя ВАБ-42-2000/10Л во включенном положении.

1 — якорь; *2* — сердечник; *3* — удерживающая катушка; *4* — пружина; *5* — контактная пружина; *6* — тяга; *7* — пружина; *8* — рычаг; *9* — упор; *10* — защелка; *11* — рычаг; *12* — якорь.

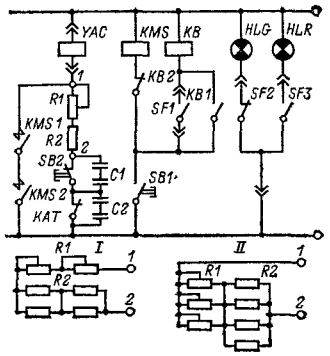


Рис. 6-44. Схема управления выключателями ВАБ-42-2000/5Л, ВАБ-42-2000/10Л, ВАБ-42-4000/10Л и ВАБ-42-6300/10Л.

KMS — контактор МК1-20У3; *R1* — резистор ПЭВР-100 51 Ом; *R2* — резистор ПЭВ-150 100 Ом; *KB* — реле блокировочное РП-23; *C1* и *C2* — конденсаторы КБГМН-2 1000 В, 0,5 мкФ; *YAC* — катушка включения: *SB1* и *SB2* — кнопки включения и отключения КЦ-121/1; *KAT* — реле — дифференциальный шунт; *HLG* — лампы сигнальные с красным и зеленым стеклом; *SF1*, *SF2*, *SF3* — блокировочные контакты; *I* — соединение резисторов на 220 В; *II* — соединение резисторов на 110 В.

Выключатели серии ВАБ-42. При включенном состоянии выключателя, например типа ВАБ-42-2000/10Л (рис. 6-43), якорь *1* подтянут к правому полюсу сердечника *2* и удерживается в этом положении при помощи магнитного потока, создаваемого постоянным током в катушке *3*. Магнитное притяжение якоря превосходит силу пружины *4* и контактной пружины *5*, которая перемещает вверх тягу *6* и создает контактное давление. Пружина *7* обеспечивает нажатие дугогасительного контакта. Рычаг *8* под действием пружины прижимается к вспомогательным контактам, удерживая их во включенном положении.

Схемы управления выключателями приведены на рис. 6-44—6-46.

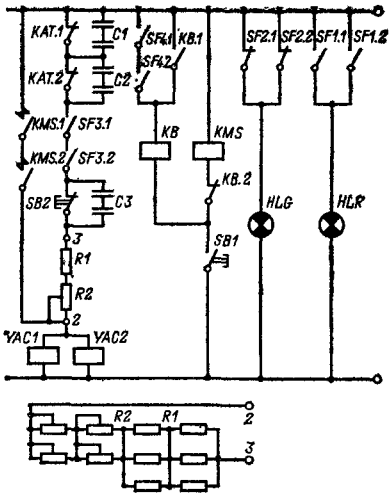


Рис. 6-45. Схема управления выключателем ВАБ-42-10000/10Л на 220 В *YAC1*, *YAC2* — катушки включения выключателя; *KMS*—контактор включения; *KB* — реле блокировочное; *C1*, *C2*, *C3* — конденсаторы; *KAT.1*, *KAT.2* — реле—дифференциальный шунт; *SF* — вспомогательные контакты выключателя; *SB1*—кнопка включения; *SB2* — кнопка отключения.

При появлении в защищаемой цепи тока, превышающего уставку, контакты реле *KAT* в цепи удерживающей катушки *3* размыкаются. Параллельно контактам *KAT* (реле — дифференциальный шунт) в цепь удерживающей катушки выключателя включены последовательно два конденсатора *C1* и *C2*, благодаря чему в цепи удерживающей катушки при размыкании контактов реле *KAT* возникает колебательный процесс спадания тока. За счет его отрицательной полуволны уничтожается остаточная намагниченность магнитопровода, что обеспечивает быстродействие выключателя. В результате сила, удерживающая якорь *1* во включенном положении, исчезает.

Под действием пружины *4* якорь *1*, пройдя путь δ_1, ударяет по упору *9* тяги *6*. Размыкаются главные, а затем дугогасительные контакты.

Включение выключателя производится контактором *KMS*, главные контакты которого подают напряжение на катушку *3*, в результате чего якорь *1* притягивается к правому полюсу сердечника *2*. При размыкании главных контактов контактора *KMS* последовательно к катушке *3* подключается добавочное сопротивление и ток в катушке *3* снижается до значения, обеспечивающего удерживание якоря *1* во включенном положении (около 1,5 А). Однако с притяжением якоря *1* контакты выключателя сомкнуться не смогут, так как тяга *6* при помощи защелки *10* и рычага

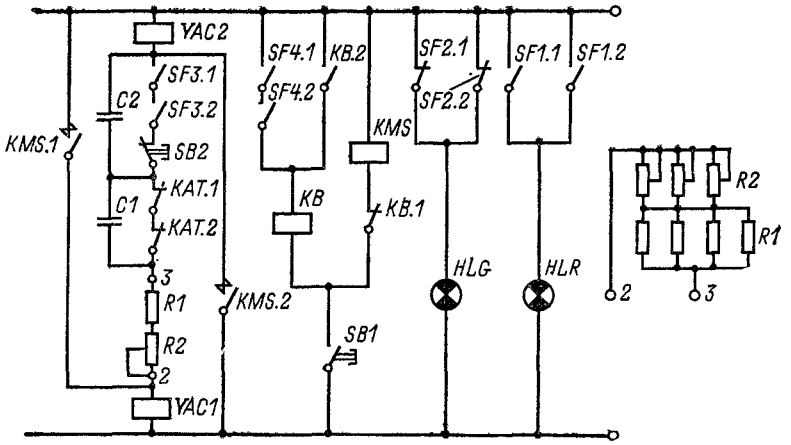


Рис. 6-46. Схема управления выключателем ВАБ-42-10000/10Л на 110 В. Обозначения по рис. 6-45.

11 останавливается, когда между контактами выключателя еще имеется некоторый зазор. Одновременно с якорем *1* к катушке *3* притягивается якорь *12*. Когда в катушке *3* ток снизится, якорь *1* останется в притянутом положении, удерживаемый магнитным потоком, в то время как якорь *12*, притянутый магнитным потоком рассеяния катушки *3*, не может удержаться в притянутом положении.

Под действием пружин якорь *12* возвращается в исходное положение, ударяет по защелке *10*, сбивая ее. Тяга *6* освобождается, и контакты смыкаются.

Схемы управления выключателями (рис. 6-44—6-46) предусматривают (с помощью реле *КВ*) предотвращение многократных включений и отключений выключателя при возникновении аварийного тока в момент включения.

Выключатели серии ВАТ-42 отличаются от выключателей серии ВАБ-42 наличием индукционно-динамического привода (ИДП) и схемой управления (рис. 6-47). При подаче импульса в катушку *2* привода от предварительно заряженной батареи конденсаторов в медном диске *1* наводится ток обратного направления. Диск отталкивается от катушки и через тягу *4* и рычаг *6* воздействует на подвижный контакт выключателя, например типа ВАТ-42-2000/10Л (рис. 6-48).

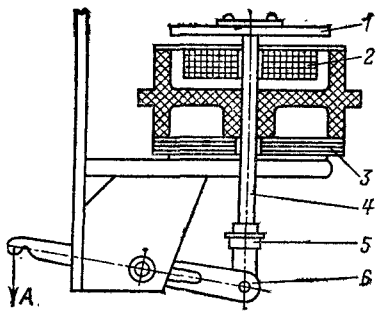


Рис. 6-47. Устройство индукционно-динамического привода ИДП.

1 — диск; *2* — катушка; *3* — прокладки; *4* — тяга; *5* — гайка; *6* — рычаг; *А* — к подвижному контакту выключателя.

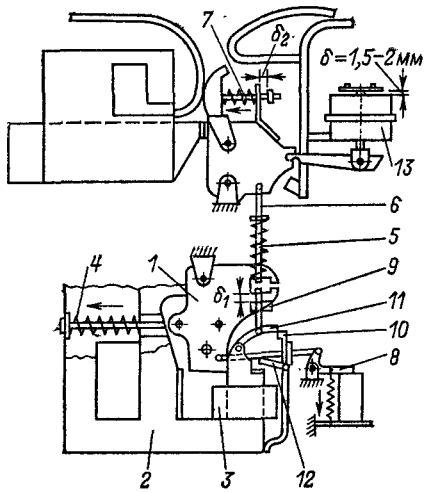


Рис. 6-48. Полюс выключателя ВАТ-42-2000/10Л во включенном положении.

1 — якорь; *2* — сердечник; *3* — удерживающая катушка; *4* — пружина; *5* — контактная пружина; *6* — тяга; *7* — пружина; *8* — рычаг; *9* — упор; *10* — защелка; *11* — рычаг; *12* — якорь; *13* — индукционно-динамический привод.

Для защиты силового трансформатора блока управления от перегрузок установлен выключатель *SFT* (рис. 6-49) с тепловым расцепителем на ток 2,5 А. Переменное напряжение 220 В подается на трансформатор *TV* через контакт *SQ1*, который замкнут при закрытой крышке блока управления; второй контакт *SQ2* разомкнут и батарея конденсаторов *C7* расшунтирована.

Заряд батареи конденсаторов происходит

от однополупериодного выпрямителя *VD1* и *VD2*.

При достижении на батарее конденсаторов напряжения 500—550 В срабатывает реле *KV*, которое замыкает *KV.1* и *KV.2* контакты в цепи катушки выключателя *YAC* и контактора *KMS*. Зажимы *4* и *5* блока управления должны быть присоединены непосредственно к контактам реле *KAT*, включенным в цепь катушки выключателя. При размыкании контактов реле *KAT*, включенных в цепь катушки выключателя, на контактах *4* и *5* появляется напряжение, заряжающее конденсаторы *C3* и *C4*. При достижении на конденсаторе *C3* напряжения 20—30 В происходит переключение динистора *VD9* (*VD10*) при минусе (плюсе) питающего напряжения на зажиме *4*; конденсатор *C3* разряжается на первичную обмотку трансформатора *TL*. Во вторичной обмотке трансформатора появляется импульс управления, который через диоды *VD5*, *VD6* и резисторы *R12* и *R13* поступает на управляющий переход тиристора *V3*.

Диоды *VD8*, *VD7*, включенные встречно-параллельно динисторам *VD9*, *VD10*, служат для защиты динисторов от обратных напряжений.

Резистор *R14* служит для разряда конденсатора *C4* и предотвращает появление управляющего импульса на тиристоре *V3* при смыкании контактов *KAT* после окончания аварийного режима.

Резистор *R11* предназначен для снятия заряда с коллекторного перехода тиристора, для исключения ложного открытия тиристора, работающего в ждущем режиме.

Стабилитрон *VD4* защищает переход тиристора *V3* от больших токов управления. В цепи катушки *YAT* индукционно динамического привода установлено блокировочное токовое реле *KA*, которое при срабатывании *YAT* разрывает цепь держащей катушки выключателя. В остальном схема управления выключателем аналогична схеме для ВАБ-42.

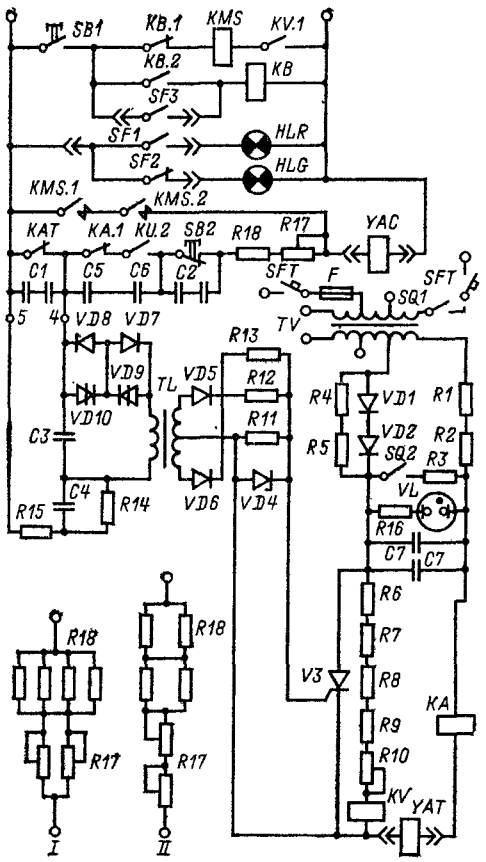


Рис. 6-49. Схема управления выключателями ВАТ-42-2000/6Л, ВАТ-42-2000/10Л.

VD1, *VD2* — диоды полупроводниковые Д-246; *V3* — тиристор Т-32 (не ниже 14-го класса); *KA* — реле токовое; *VD4* — стабилитрон Д-815*Е*; *VD5—VD8* — диоды кремниевые Д-229А; *VD9*, *VD10* — динисторы КН-102 А; конденсаторы: *C2* — КБГ-МН-2-1000 0,5 мкФ; *C1*, *C3*, *C6* — КБГ-МН-2-1000 1 мкФ; *C7*-МБГВ 1000 В 200 мкФ; *SQ* — контакты блокировочные; *VL* — лампа неоновая ТН-0,2; *TV* — трансформатор силовой; *TL* — трансформатор управления; резисторы: *R1*, *R2* — ПЭ-150 51 Ом; *R3* — ПЭВ-100 330 Ом; *R4*, *R5* — МЛТ-2 68 кОм; *R6—R10*—ПЭВ-15 4,7 кОм; *R11* — МЛТ-2 150 Ом; *R12*, *R13* — МОН2-18ЕС; *R14* — МЛТ-2 10 кОм; *R15* — МЛТ-2 220 Ом; *R16* — МЛТ-1 1,1 МОм (3 последовательно); *R17* — ПЭВР-100 51 Ом; *R18* — ПЭ-150 100 Ом; *KAT* — реле — дифференциальный шунт; *KMS* — контактор МК-1-20У; *KV* — реле напряжения РЭВ-821; *SFT* — выключатель автоматический АП-50Т; *I* — соединение резисторов на 110 В; *II* — соединение резисторов на 220 В.

Разновидностью токоограничивающих выключателей являются агрегатные выключатели, например ВАТ-42-400/10ЛА.

6-21. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ СЕРИИ ВАБ-43

Технические данные. Выключатели ВАБ-43 применяют в качестве катодных быстродействующих выключателей для защиты полупроводниковых преобразователей при параллельной работе, а также при питании приемников со значительной противо-э. д. с. для отключения преобразователей от сборных шин при внутреннем их повреждении. Основные характеристики выключателей — см. табл. 6-24.

Составной частью полюса выключателя (рис. 6-50—6-52) является блок быстродействующего привода, в который входят электромагнит *1*, П-образный сердечник *2*, якорь *3*, постоянный магнит *4* с катушкой подмагничивания *5*, отключающая пружина *6*, шина главного тока *7*; *8* — контактная пружина; *9* — упор; *10* — тяга; *11* — контакт подвижный; *12* — упор; *13* — якорь; *14* — рычаг; *15* — тяга.

Выключатель ВАТ-42-10000/10Л состоит из двух полюсов выключателя ВАТ-42-6300/10Л, установленных на общей тележке. Каждый полюс имеет механический указатель включенного и отключенного положения. Во включенном положении выключатель удерживается электромагнитом быстродействующего привода, в отключенном — пружиной.

Схема управления выключателем ВАТ-42-10000/10Л (см. рис. 6-45) предусматривает протекание включающего тока (около 80 А) через катушки *YAC1* и *YAC2* не более 0,7 с. Отключение выключателя происходит при разрыве цепи катушки кнопкой *SB2* или контактами реле — дифференциальный шунт *KAT*.

Для включения выключателя подается напряжение на катушку электромагнита *1* (см. рис. 6-50). Катушка *1* создает магнитный поток Φ_3 (рис. 6-53, *а*), и якорь *3* притягивается

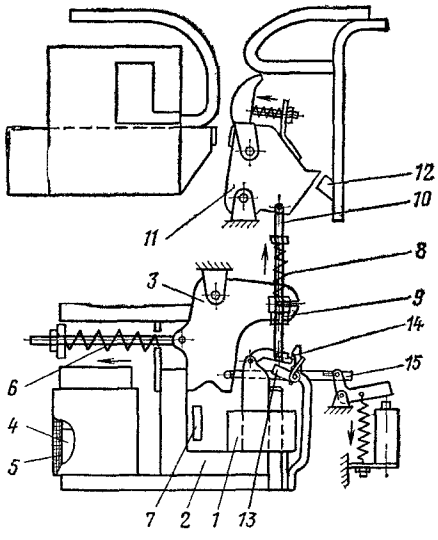


Рис. 6-50. Полюс ВАБ-43 в отключенном положении.

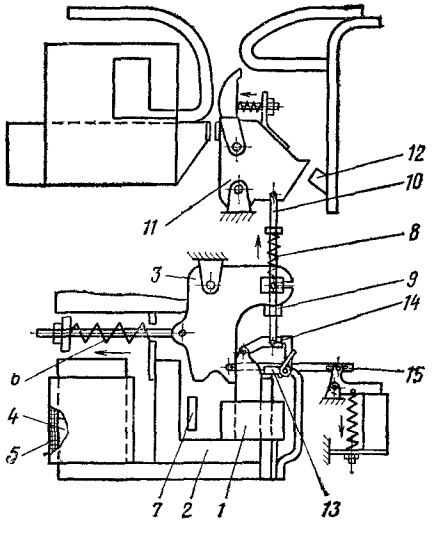


Рис. 6-51. Полюс выключателя ВАБ-43 в предвключенном положении.

к правому полюсу сердечника *2*. Включение выключателя (см. рис. 6-51) происходит аналогично включению выключателя ВАБ-42. Во включенном положении якорь *3* притянут к правому полюсу сердечника *2* и удерживается в этом положении магнитным потоком, создаваемым постоянным магнитом *4*. Сила магнитного притяжения якоря превосходит силу пружины *6* и контактной пружины *8*. Во включенном положении электромагнит *1* обесточен. Ток прямого направления протекает через шину *7* и создает в сердечнике *2* магнитный поток, который в месте касания якоря и сердечника совпадает по направлению с магнитным потоком постоянного магнита.

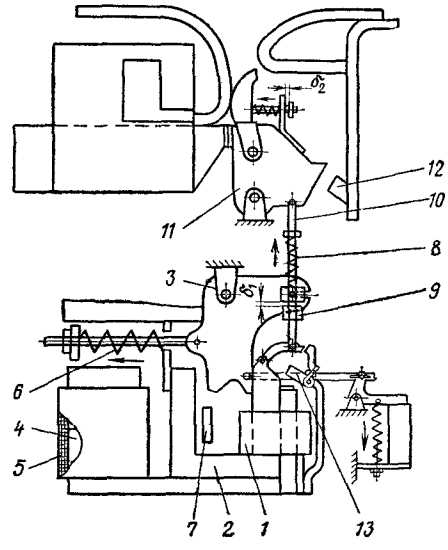


Рис. 6-52. Полюс выключателя ВАБ-43 во включенном положении.

При появлении в защищаемой цепи тока обратного направления в сердечнике появляется магнитный поток Φ_2, который направлен встречно потоку постоянного магнита Φ_1 (рис. 6-53, *б*). В результате сила, удерживаю-

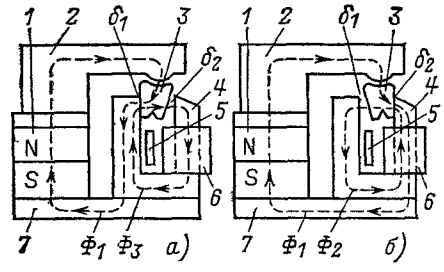


Рис. 6-53. Направление магнитных потоков в магнитной системе выключателя ВАБ-43.

а — момент включения; *б* — при появлении обратного тока в защищаемой цепи; *1* — постоянный магнит; *2* — верхний брус; *3* — якорь; *4* — сердечник; *5* — шина главного тока; *6* — включающая и отключающая катушки; *7* — нижний брус; Φ_1 — магнитный поток постоянного магнита; Φ_2 — магнитный поток главного тока; Φ_3 — магнитный поток включающей катушки.

щая якорь во включенном положении, исчезает. В то же время в левом зазоре между якорем и сердечником магнитный поток Φ_2 создает силу, стремящуюся перевести якорь в положение «отключено». Быстродействие электромагнитного привода обеспечивается тем, что удерживающий поток Φ_1 не уничтожается, а только вытесняется в параллельный участок магнитной цепи. Весь этот поток, ранее удер-

живающий якорь во включенном положении, притягивает якорь в положение «отключено». Якорь *3* проходит путь δ_1 (см. рис. 6-52) и ударяет по упору *9* тяги *10*. Размыкаются главные контакты, а затем дугогасительные. После того как якорь перешел в отключенное положение, подвижный контакт *11* продолжает еще некоторое время двигаться по инерции, сжимает пружину *8* и останавливается упором *12*.

6-22. МЕТОДЫ ПРОВЕРКИ И НАСТРОЙКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Общие указания

Проверка монтажа. Кабели и соединительные шины к выключателю должны быть укреплены так, чтобы механические усилия, в том числе и электродинамические, от кабелей и шин не передавались выключателю. Должны быть выполнены ограждения, так как выключатели находятся под полным рабочим напряжением.

У выключателей типа ВАТ-42-10000/10Л для равномерного распределения тока между полюсами шины, подводящие ток к выключателю, должны быть расщеплены на длине не менее 5 м; допускается расщепление подводящих шин по 3,5 м со стороны верхних и нижних выводов выключателя.

Реле РДШ должны быть установлены горизонтально (шкалой вверх); в случае установки реле РДШ вертикально шкала должна быть переградуирована. Рекомендуется устанавливать реле РДШ на расстоянии не менее 0,5—1 м от токоведущих частей выключателя для исключения влияния их полей на работу реле.

Проверка выполненного монтажа схем управления производится по принципиальным схемам и схемам электрических соединений. Согласно паспортным данным проверяются параметры реле, контакторов, резисторов, включающих и держащих катушек. Опробуется ручное и дистанционное включение и отключение выключателя; проверяется отключение выключателя от защитных средств; проверяется работоспособность схемы управления при пониженном (до 85 % номинального) напряжении оперативных цепей; производится опробование работы блокировки от многократных включений выключателя на к. з.

Проверка шкалы уставок. Проверка соответствия токов отключения выключателя токам уставок производится при условии соответствия параметров выключателя данным заводских испытаний; давлению между контактами, току и температуре удерживающей катушки. Эти условия должны быть соблюдены при испытании смонтированного выключателя. Давление между главными контактами должно быть измерено с помощью динамометра и в случае необходимости отрегулировано в соответствии с паспортными данными. Если значение тока удерживающей катушки не будет соответствовать данным заводских испытаний, необходимо регулированием дополнительного сопротивления довести ток до соответствующего значения и удерживающую катушку прогреть номинальным током до установившейся температуры.

1. *Проверка шкалы уставок генератором низкого напряжения постоянного тока.* В обмотку возбуждения генератора подается напряжение от постороннего источника постоянного тока; обмотка возбуждения включается потенциометром. Это дает возможность регулировать ток возбуждения, а следовательно, и ток якоря генератора от нуля до максимально возможного.

Подъем тока на каждой точке шкалы производят трижды и вычисляют среднее арифметическое из трех показаний. Подъем тока при испытании должен быть плавным, особенно в тех случаях, когда проверяется шкала выключателя с индуктивным шунтом. При резком изменении испытательного тока участок шины, имеющий стальные пластины индуктивного шунта, резко изменяет свое сопротивление в переходном режиме и основной повышенный ток ответвляется в токоведущую шину, что приводит в действительности к заниженным показаниям срабатывания защиты выключателя. Для того чтобы при отключении нагрузочного тока контакты не обгорели, необходимо их зашунтировать перемычкой из провода сечением не менее 120 мм². После каждого отключения выключателя нужно быстро снижать возбуждение генератора, тем самым предотвращая нагревание установленной перемычки током. После проверки всех точек шкалы устанавливают требуемую проектом уставку тока и еще раз проверяют ток срабатывания выключателя. Ток срабатывания выключателя считается отрегулированным, если он отличается от проектного не более чем на ±10 %.

Данные значений токов срабатывания на каждой уставке записывают в протокол и вычисляют для каждой точки шкалы поправочный коэффициент.

При калибровке выключателей с индуктивным шунтом может быть измерено распределение токов между шунтом и размагничивающим витком одним из следующих способов:

если можно измерить малые сопротивления шин размагничивающего витка $z_в$ и индуктивного шунта $z_ш$, то токи, проходящие по этим шинам, определяют по падению напряжения на замеренных участках. Пропуская через выключатель ток 1000—1500 А, замеряют падение напряжения на одинаковой длине шин шунта и размагничивающего витка. В результате деления значений падения напряжения $\Delta u_в$ и $\Delta u_ш$ на значение найденного сопротивления этих участков шин определяют искомые токи через шунт и размагничивающий виток $I_в$;

если сопротивление участков шин индуктивного шунта и размагничивающего витка измерить невозможно, определение токов, проходящих по шунту и размагничивающему витку, производят расчетным путем по сечению шин. Пропуская через выключатель ток 800—1000 А, измеряют падение напряжения между двумя точками шины, образующими размагничивающий виток $\Delta u_в$ и шунт $\Delta u_ш$; измеряют сечение шин на обоих участках $s_в$ и $s_ш$ и по

результатам измерений находят ток

$$I_{ш} = \frac{\Delta u_{ш} I}{\Delta u_{ш} + \frac{s_{в}}{s_{ш}} \Delta u_{в}}.$$

2. *Проверка шкалы уставок полупроводниковым или ионным выпрямителем с регулируемым напряжением.* Калибровка выключателя производится в режиме короткого замыкания. Регулируя выпрямленное напряжение, постепенно увеличивают ток к. з. через выключатель до его отключения.

Основной недостаток при такой регулировке — резкая пульсация тока. При небольших токах она наибольшая, при больших — наименьшая. Это в значительной степени искажает действительное значение уставки срабатывания защиты выключателя.

Последовательность работы по калибровке та же, что и с генератором низкого напряжения постоянного тока.

3. *Проверка шкалы уставок с помощью калибровочной катушки.* Этот способ действителен только для выключателей, у которых отсутствует индуктивный шунт. Если катушка главного тока состоит из одного витка, м. д. с. калибровочной катушки $F_{кат}$ равна току отключения, т. е. $F_{кат} = In$, где I — ток отключения выключателя; n — число витков калибровочной катушки.

Калибровочная катушка насаживается на место катушки главного тока, и в нее подается ток такого же направления, что и в главной цепи; значение тока регулируется с помощью реостатов. При плавном увеличении тока в калибровочной катушке по амперметру устанавливают ток, при котором происходит отключение выключателя. Проверив шкалу уставок выключателя с помощью калибровочной катушки, можно установить действительный ток отключения выключателя. Для этого необходимо подать первичный ток на выключатель от генератора низкого напряжения или выпрямителя и по соотношению м. д. с. при отключении выключателя от калибровочной катушки и генератора низкого напряжения рассчитать поправочный коэффициент, который может быть использован для определения действительных токов отключения на каждой точке шкалы уставок.

У выключателей, имеющих индуктивный шунт, для установления действительного тока их отключения необходимо определить долю общего тока $1/m$, ответвляющуюся в размагничивающий виток при медленном нарастании испытательного тока через выключатель. В этом случае распределение тока по ветвям определяется только соотношением омических сопротивлений шин и отключение выключателя происходит на так называемой статической уставке.

Определив долю общего тока, ответвляющуюся в размагничивающий виток, находят ток отключения от калибровочной катушки и действительный ток отключения выключателя

$$I_{ср} = F_{кат} m = m I_{кат} n.$$

4. *Настройка максимальной защиты на реле РДШ.* Ток срабатывания линейного выключателя определяют плавным медленным подъемом прогрузочного тока от постороннего источника или от рабочей установки в режиме короткого замыкания. Для реле РДШ (рис. 6-54), имеющего калибровочную катушку, для каждой точки шкалы снимается зависимость

$$i_{кат} = f(I_{РДШ}),$$

где $i_{кат}$ — ток, проходящий через калибровочную катушку; $I_{РДШ}$ — ток, проходящий через первичную цепь реле РДШ.

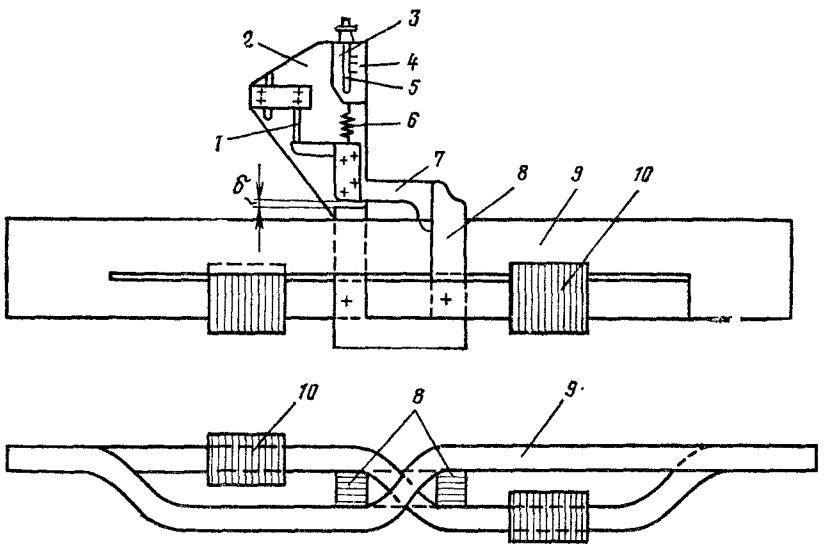


Рис. 6-54. Реле—дифференциальный шунт типа РДШ.

1 — размыкающий контакт; *2* — планка; *3* — скоба; *4* — шкала реле; *5* — указатель-стрелка; *6* — пружина; *7* — якорь; *8* — магнитопровод реле; *9* — токоведущая шина; *10* — стальные пластины.

6-23. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВКИ И НАЛАДКИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИЙ ВАБ-42 И ВАТ-42

Проверка, регулировка и подготовка выключателя к включению производятся в такой последовательности:

1) проверяют наличие смазки оси вращения подвижного контакта выключателя;

2) если выключатель длительное время хранился в помещении с относительной влажностью воздуха 80 %, необходимо просушить дугогасительную камеру при температуре 80 °С в течение 12 ч;

3) с помощью прибора или пробника убеждаются в отсутствии металлического контакта полюса магнитного дутья и всех шпилек, стягивающих катушку магнитного дутья с неподвижным контактом;

4) измеряют нажатие дугогасительного контакта, которое должно быть 120—140 Н. Нажатие главных контактов устанавливают равным 350—400 Н. Перед измерением рекомендуется несколько раз оттянуть динамометром на 2—3 мм подвижный контакт, так как в противном случае могут получиться завышенные значения нажатия;

5) проверяют предвключенное положение полюса выключателя и устанавливают зазор 2—2,5 мм между рогом и дугогасительным контактом;

6) регулируют вспомогательные контакты. Регулировочными гайками пружина вспомогательных контактов растягивается так, чтобы рычаг четко переключал вспомогательные контакты. После этого дополнительно еще раз растягивают на 4 мм пружину вспомогательных контактов и регулируют длину их тяги так, чтобы во включенном положении выключателя она имела свободный ход 2—2,5 мм;

7) в отключенном положении выключателя устанавливают зазор между упором и подвижным контактом, равный 2—3 мм;

8) делают 10 контрольных включений и отключений выключателя. Включающая катушка допускает суммарную длительность протекания тока включения 40 А не более 4 с. Необходимая длительность тока включения (около 0,3 с) обеспечивается правильной работой схемы управления и выключателя;

9) провода, идущие к контактам реле РДШ, должны быть скручены между собой. Сечение их не менее 2,5 мм^2;

10) проверяют падение напряжения на главных контактах, гибком токосъемнике выключателей на номинальный ток 4000, 6300 и 10 000 А. Падение напряжения при токе 2000 А на главных контактах 10, на гибком токосъемнике 7 мВ.

На всем выключателе падение напряжения при токе 2000 А составляет для выключателей 2000 А — 100, 4000 А — 50, 6300 А — 25 мВ (на одном полюсе);

11) проверяют напряжение на конденсаторах *С7* (рис. 6-49). При отклонении от 600—650 В пересоединить ответвления трансформатора;

12) проверяют для выключателей ВАТ работу привода ИДП. Отключая выключатель вручную от контакторов РДШ (*КАТ*) убеждаются в срабатывании реле *KV*;

13) проверяют зазор между диском и катушкой ИДП для выключателей ВАТ. Во включенном положении зазор между диском и катушкой ИДП должен быть 1,5—2 мм, что достигается с помощью прокладок *3* и гайки *5* (см. рис. 6-47);

14) зазоры между главными контактами должны быть 10—14 мм;

15) определяют ток отпадания якоря выключателя, который должен быть 0,6—0,8 А при равномерной регулировке сопротивлений ПЭВР-100 51 Ом. На станции управления установить держащий ток 1,1—1,3 А;

16) регулируют напряжение срабатывания реле *KV*, которое должно быть 500—550 В. Регулировка осуществляется натяжением возвратной пружины.

6-24. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВКИ И НАЛАДКИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИИ ВАБ-43

При наладке и подготовке выключателя к включению после окончания монтажа необходимо:

1) проверить смазку оси вращения контакта и в случае необходимости нанести на ось смазку ЦИАТИМ-203 (ГОСТ 8773-73*);

2) если выключатель длительное время хранился в помещении с относительной влажностью воздуха выше 80 %, то рекомендуется просушить дугогасительные камеры при температуре 80 °С в течение 12 ч;

3) проверить правильность и надежность всех электрических соединений. Все линии низкого напряжения должны быть достаточно удалены или экранированы от частей выключателя, находящихся под высоким напряжением;

4) проверить прибором с напряжением не ниже 12 В, нет ли недопустимого металлического контакта полюсов магнитного дутья и всех шпилек катушки магнитного дутья с неподвижным контактом;

5) динамометром измерить нажатие дугогасительного контакта, которое должно быть равно 120—140 Н;

6) установить провал дугогасительного контакта $\delta_2 = 2 \div 2{,}5$ мм (см. рис. 6-52);

7) измерить нажатие главных контактов и установить равным 350—400 Н. Перед измерением нажатия несколько раз оттянуть динамометром подвижный контакт на 2—3 мм. Контактное нажатие, измеренное без предварительного оттягивания контакта, может иметь завышенные значения;

8) оттянуть подвижный контакт и завести рычаг *14* за защелку, при этом между рогом и дугогасительным контактом должен быть зазор 2,5—4 мм (см. рис. 6-51);

9) удерживая якорь *13* прижатым к сердечнику *2*, включить выключатель; убедиться, что подвижный контакт останавливается в предвключенном положении (защелка не срывается). Если рычаг срывается, то отрегулировать работу механизма свободного расцепления (поднимая или опуская скобу с вспомогательными контактами);

10) во включенном положении выключателя измерить и установить равномерный по всей плоскости упора *9* зазор $\delta_1 = 1{,}5 \div 2$ мм;

11) отрегулировать вспомогательные контакты, для чего растянуть пружину так, чтобы рычаг четко переключал вспомогательные контакты. После этого дополнительно растянуть пружину еще на 4 мм так, чтобы во включенном положении выключателя она имела свободный ход 2—2,5 мм;

12) в отключенном положении выключателя, вращая упор *12*, установить зазор между ним и подвижным контактом 2—3 мм;

13) проверить между главными контактами зазор, который должен быть 12—14 мм;

14) измерить падение напряжения на главных контактах, которое должно быть не более 15 мВ при токе 1000 А. Падение напряжения может быть также измерено при другой силе тока с последующим пересчетом;

15) сделать 10 контрольных включений и отключений. Следует иметь в виду, что включающая катушка допускает суммарную длительность протекания тока включения 40 А не более 4 с. Необходимая длительность тока включения (около 0,3 с) обеспечивается правильной работой схемы управления и выключателя.

Если полюс выключателя не держится во включенном положении, необходимо намагнитить или перемагнитить постоянный магнит, для чего по намагничивающей катушке пропустить ток не менее 38 А в течение 1—2 с, отключить ток, затем 3 раза повторить эту операцию.

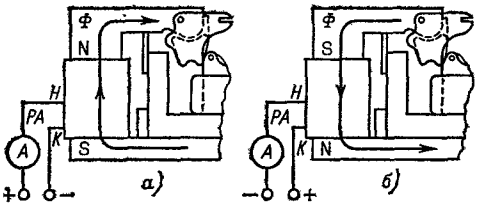


Рис. 6-55. Намагничивание постоянных магнитов выключателей ВАБ-43.

Намагничивать постоянные магниты при рабочем направлении главного тока от неподвижного контакта к подвижному следует согласно рис. 6-55, *а*. При рабочем направлении главного тока от подвижного контакта к неподвижному намагничивать согласно рис. 6-55, *б*;

16) проверить обратный ток срабатывания выключателя. Для этого пропустить ток от генератора низкого напряжения постоянного тока (6 В) через выключатель. Направление тока должно быть противоположно рабочему.

Если нельзя пропустить ток через выключатель, то можно проверить уставку косвенным способом — пропустить ток по катушке *1*.

Выключатель должен отключиться при токе 5—11 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6-1. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка и А. П. Хечумяна. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.

6-2. **Правила** устройства электроустановок. Гл. 1—8. — М.: Атомиздат, 1976. — 56 с.

6-3. **Объем** и нормы испытания электрооборудования. — М.: Энергия, 1975. — 224 с.

6-4. **ТУ 16-526.010-73.** Выключатели автоматические воздушные серии А-3100.

6-5. **ТУ 16-522.028-74.** Выключатели автоматические воздушные серии А-3700.

6-6. **ТУ 16-522.022-72.** Выключатели автоматические серии «Электрон».

6-7. **Информация** на изделия электротехнической промышленности. Расцепители полупроводниковые максимального тока серии РП для выключателей автоматических серии А-3700. (Информэлектро).

6-8. **Технические** описания и инструкции по эксплуатации (каталоги) заводов-изготовителей на автоматические выключатели серий А-3100, А-3700, «Электрон».

6-9. **Сборник** указаний по наладочным работам. Вып. 1. — М.: Энергия, 1972. (Минмонтажспецстрой СССР. Главэлектромонтаж).

6-10. **Выключатели** АВМ-15, АВМ-20. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОБЕ.463.003.

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

7-1. ОБЪЕМ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Электрические машины, вводимые в эксплуатацию после монтажа, подвергаются приемо-сдаточным испытаниям в объеме, предусмотренном «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ-76), гл. 1-8 «Объем и нормы приемо-сдаточных испытаний электрооборудования» и СНиП III-33-76 «Правила производства и приемки работ. Электротехнические устройства».

В программу входят:

1) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками, а также сопротивления изоляции заложенных в машину температурных индикаторов;

2) определение возможности включения электрических машин без сушки;

3) испытание электрической прочности изоляции повышенным напряжением промышленной частоты;

4) измерение сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии;

5) измерение воздушных зазоров между полюсами и якорем для машин постоянного

тока, между статором и ротором для машин переменного тока;

6) измерение зазоров в подшипниках скольжения;

7) измерение разбега ротора (якоря) в осевом направлении для машин с подшипниками скольжения;

8) проверка работы машин на холостом ходу;

9) измерение вибрации машин;

10) снятие характеристики холостого хода;

11) испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность;

12) определение характеристик трехфазного к. з. для синхронных машин;

13) определение реактивных сопротивлений и постоянных времени синхронных генераторов;

14) измерение расхода охлаждающего воздуха (для машин с принудительной системой вентиляции);

15) проверка и испытание системы маслоснабжения;

16) проверка изоляции подшипника (для машин с подшипниковыми стойками);

17) проверка работы машины под нагрузкой, определение рабочих характеристик, нагрева и др.

В зависимости от габарита, назначения электрической машины, а также потребности в определении данных для наладочных работ объем приемо-сдаточных испытаний может быть увеличен. Он может быть увеличен, если машина на предприятии-изготовителе не проходила в полном объеме приемочных или приемо-сдаточных испытаний.

Отдельные пункты программ по согласованию с заказчиком могут быть сокращены.

7-2. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ОТНОСИТЕЛЬНО КОРПУСА И МЕЖДУ ОБМОТКАМИ

Для измерения сопротивления изоляции применяют мегаомметры логометрической системы с источником постоянного напряжения на 250, 500, 1000 и 2500 В. Измерение сопротивления изоляции вспомогательных измерительных цепей, электрически не соединенных с рабочими цепями объекта измерения, заложенных и встроенных температурных индикаторов, термометров сопротивления, термопар и т. п. производят мегаомметром на 250 В. Мегаомметры напряжением 500 В применяют при измерении сопротивления изоляции обмоток с номинальным напряжением до 500 В включительно; мегаомметры напряжением 1000 В — для обмоток выше 500 В. Мегаомметры напряжением 2500 В применяют для измерения сопротивления изоляции обмоток статоров крупных машин переменного тока с напряжением 6000 В и выше. При измерении сопротивления изоляции крупных машин рекомендуется применять мегаомметр с электроприводом. Измерение сопротивления изоляции производят при отсутствии электрического напряжения по методике, изложенной в разд. 3 справочника.

После окончания измерений сохранившийся на обмотке потенциал высокого напряжения следует разрядить путем замыкания ее на корпус проводником, предварительно соединенным с корпусом. Продолжительность разряда для обмоток с номинальным напряжением 3000 В и выше должна быть не менее 15 с для машин до 1000 кВт и 60 с для машин больше 1000 кВт.

Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками производят поочередно для каждой электрически независимой цепи при соединении всех прочих цепей с корпусом машины.

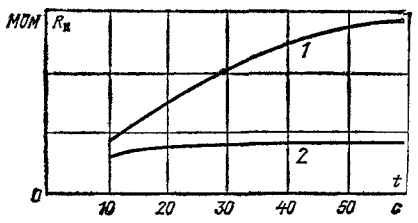


Рис. 7-1. Зависимость сопротивления изоляции $R_и$ обмотки относительно корпуса от времени приложения напряжения мегаомметра.

1 — при сухой изоляции; *2* — при увлажненной изоляции.

Показания мегаомметра зависят от времени приложения напряжения к проверяемой обмотке. Чем больше время, прошедшее от момента приложения напряжения к изоляции до момента отсчета (15 и 60 с), тем больше получается измеренное значение сопротивления изоляции (рис. 7-1).

При измерении сопротивления изоляции необходимо измерять и температуру обмотки. С повышением температуры сопротивление изоляции уменьшается. Измерение сопротивления изоляции следует выполнять при температуре обмотки, соответствующей номинальному режиму работы машины или приведенной к температуре 75 °С. Температура обмотки в холодном состоянии не должна быть ниже 10 °С. Если температура ниже указанной, то обмотку перед измерением необходимо подогреть. Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции электрических машин относительно корпуса и между обмотками при рабочей температуре и через 60 с после приложения напряжения определяются

$$R_{60} = \frac{U_н}{1000 + \frac{P_н}{100}}, \qquad (7\text{-}1)$$

где $U_н$ — номинальное напряжение обмотки, В; $P_н$ — номинальная мощность машины: постоянного тока, кВт, переменного тока, кВ·А.

Допустимое значение сопротивления изоляции, подсчитанное по (7-1), должно быть не меньше 0,5 МОм. В случае измерения сопротивления изоляции при температуре ниже рабочей, полученное по (7-1) сопротивление изоляции следует удваивать на каждые 20 °С (полные и неполные) разности между рабочей

температурой и той температурой, при которой выполнено измерение.

Наименьшее допустимое значение сопротивления изоляции R_{60} для машин постоянного тока приведены в табл. 7-1, для машин переменного тока напряжением выше 1000 В — в табл. 7-2.

Таблица 7-1

Допустимые сопротивления изоляции R_{60} машин постоянного тока

Номинальное напряжение обмотки, В	Сопротивление изоляции, МОм, при температуре обмотки, °С							
	10	20	30	40	50	60	70	75
220	2,7	1,85	1,3	0,85	0,6	0,4	0,3	0,22
460	5,3	3, 7	2,6	1,75	1,2	0,8	0,5	0,45
650	8	5,45	3,8	2,5	1,75	1,15	0,8	0,65
750	9,3	6,3	4,4	2,9	2,0	1,35	0,9	0,75
900	10,8	7,5	5,2	3,5	2,35	1,6	1,0	0,9

Таблица 7-2

Допустимые сопротивления изоляции R_{60} машин переменного тока напряжением выше 1000 В

Номинальное напряжение обмотки, кВ	Сопротивление изоляции, МОм, при температуре обмотки, °С						
	10	20	30	40	50	60	75
3	35	25	18	12	9	6	3
6	75	50	35	24	16	10	6
10	125	85	60	40	27	18	10

Для машин переменного тока напряжением ниже 1000 В сопротивление изоляции обмотки статора 0,5 МОм при температуре 10—30 °С; обмотки ротора 0,2 МОм.

О степени влажности изоляции судят по так называемому коэффициенту абсорбции $k_а$, который представляет собой отношение показаний мегаомметра после приложения напряжения через 15 и 60 с, $k_а = R_{60}/R_{15}$.

Следует учесть, что значение $k_а$ даже при хорошем состоянии изоляции в значительной степени зависит от температуры машины и вида применяемых изоляционных материалов. С повышением температуры коэффициент абсорбции для машин, имеющих неувлажненную изоляцию, уменьшается (рис. 7-2).

Для неувлажненной обмотки при температуре 10—30 °С $k_а = 1{,}3 \div 2{,}0$; для увлажненной обмотки коэффициент абсорбции близок к единице.

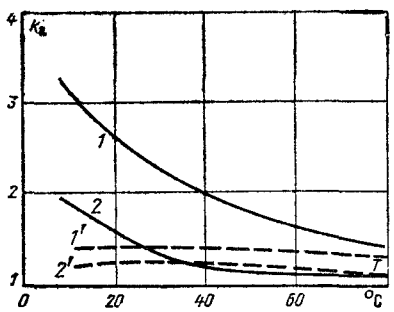


Рис. 7-2. Зависимость коэффициента абсорбции от температуры машины.

1 — для крупных машин при сухой изоляции; *1'* — для крупных машин при увлажненной изоляции; *2*, *2'* — для машин средней и малой мощности при сухой и увлажненной изоляции, соответственно.

7-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН БЕЗ СУШКИ

1. Условия включения машин постоянного тока без сушки — см. СНиП III-33-76, п. 3.18.

а) Машины напряжением до 500 В с изоляцией обмотки класса «А» должны иметь абсолютные значения сопротивления изоляции R_{60} не менее приведенных в табл. 7-1.

б) Машины напряжением 500—1000 В с изоляцией обмоток класса «В» должны иметь абсолютные значения сопротивления изоляции R_{60} не менее приведенных в табл. 7-1 и коэффициент абсорбции $k_а$ не ниже 1,2 при температуре 10—30 °С.

Если значения R_{60} и $k_а$ меньше требуемых, что может быть в случае поверхностного увлажнения обмотки, изоляция обмоток должна быть подвергнута контрольному прогреванию, а в случае необходимости — сушке. Если изоляция обмоток удовлетворяет требованиям, то перед пуском следует провести испытания повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты в соответствии с § 7-5.

2. Условия включения машин переменного тока без сушки — см. СНиП III-33-76, п. 3.14—3.17.

а) Абсолютные значения сопротивления изоляции R_{60}, измеренные при температуре не ниже 10 °С, должны быть не менее приведенных в табл. 7-2.

б) Значения коэффициента абсорбции $k_а$ при температуре 10—30 °С должны быть:

для машин 1-й группы не ниже 1,2;

для машин 2-й группы не ниже 1,3.

(К 1-й группе относятся электродвигатели до 5000 кВт при частоте вращения не более 1500 об/мин; ко 2-й группе — все остальные машины).

в) Характеристика зависимости тока утечки $I_{ут}$ через изоляцию обмотки от испытательного выпрямленного напряжения $U_и$ не должна иметь крутого изгиба (рис. 7-3). Значение коэффициента нелинейности k должно быть не более 3 (см. ниже).

Для электрических машин первой группы снятие характеристики $I_{ут} = f(U_и/U_н)$ проводят только в том случае, если какое-либо из условий п. «а» или «б» не выполнено. Снятие характеристики $I_{ут} = f(U_и)$ обязательно для всех машин 2-й группы. Методы измерения тока утечки приведены в § 7-5.

Для машин 1-й группы включение без сушки допустимо при соблюдении условий пп. «а», «б» и «в» или «б» и «в». Если соблю-

даются условия «а» и «б», то коэффициент абсорбции должен быть не ниже 1,1 и коэффициент нелинейности — не больше 1,2. При выполнении условий «б» и «в» коэффициент нелинейности не должен превышать 1,2.

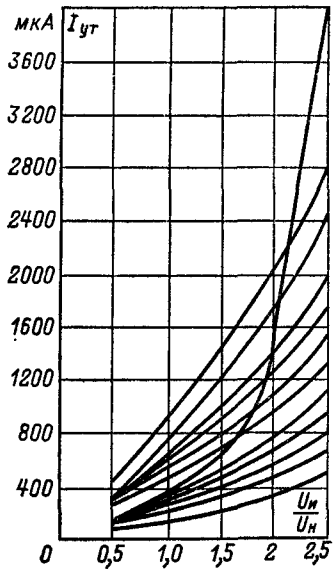


Рис. 7-3. Примерные характеристики тока утечки.

Для двигателей, имеющих только три вывода обмотки статора, ток утечки не измеряют. В этих случаях обязательным условием включения без сушки является соблюдение одного условия п. «а» при R_{60} всех трех фаз не меньше значений, приведенных в табл. 7-2, или комбинации условий пп. «а» и «б» при R_{60} не меньше половины значений, указанных в табл. 7-2.

Коэффициент нелинейности k определяют из характеристики $I_{ут}=f(U_и)$ при испытании изоляции выпрямленным напряжением

$$k=\frac{R_{U,min}}{R_{U,max}};$$

Таблица 7-3

Испытательное выпрямленное напряжение для машин 2-й группы

Мощность, кВ·А	Номинальное напряжение, В	Испытательное выпрямленное напряжение, В
Менее 1000	Все напряжения	$1,2\,(2U_н+1000)$
1000 и более	До 3300 включительно	$1,2\,(2U_н+1000)$
	Выше 3300 до 6600 включительно	$1,2\,(2,5U_н)$
	Свыше 6600	$1,15\,(2U_н+3000)$

$$R_{U,min}=\frac{U_{min}}{I_{ут,min}};\qquad R_{U,max}=\frac{U_{max}}{I_{ут,max}},$$

где U_{min}, U_{max} — минимальное и максимальное испытательные напряжения, В; $I_{ут,min}$, $I_{ут,max}$ — токи утечки, соответствующие этим испытательным напряжениям, мкА.

Значение U_{max} для 1-й группы машин принимается $2,5U_н$, а для машин 2-й группы — согласно табл. 7-3.

Значение U_{min} для машин 1-й группы принимается $0,5U_н$, а для машин 2-й группы — не более $0,2U_{max}$.

Испытательное напряжение от U_{min} до U_{max} прикладывают по ступеням согласно табл. 7-4.

Таблица 7-4

Допустимые токи утечки

Ступень испытательного напряжения $U_и/U_н$	0,5	1,0	1,5	2,0	3,5	3,0
Наибольший допустимый ток утечки, мкА	250	500	1000	2000	3000	3500

Токи утечки определяют через 60 с после приложения напряжения. Если при неизменном испытательном напряжении ток утечки продолжает нарастать, испытание прекращают и возобновляют после устранения неисправности. Если характеристики тока утечки (рис. 7-3) не имеют крутого изгиба, но токи утечки превысили допустимое значение (табл. 7-4), а коэффициент нелинейности k не превышает 3, машину следует подвергнуть контрольному прогреванию до температуры 75 °С и повторно измерить ток утечки. Если сопротивление изоляции R_{60} при температуре 60 °С будет не ниже вычисленного по (7-1), то машину можно включать в эксплуатацию без сушки. Включение без сушки роторов синхронных машин всех групп возможно, если сопротивление изоляции будет не ниже 0,5 МОм для генераторов и синхронных компенсаторов и 0,2 МОм для двигателей.

Изоляция обмоток статоров электрических машин всех групп перед включением на полное рабочее напряжение должна быть испытана относительно корпуса повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты в соответствии с § 7-5.

Испытание изоляции максимальным выпрямленным напряжением U_{max} при снятии характеристик токов утечки считается одновременно и испытанием изоляции на электрическую прочность повышенным напряжением выпрямленного тока.

7-4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОДШИПНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Сопротивление изоляции подшипников электрических машин должно быть не ниже 0,3 МОм для гидрогенераторов и не менее 1 МОм для турбогенераторов. Для остальных

машин эта величина не нормируется, но практически она должна быть не ниже 0,5 МОм.

Проверку состояния изоляции производят на работающей машине при холостом ходе и при нагрузке методом измерения напряжения в контуре вал — подшипник — фундаментная плита — подшипник — вал по схеме рис. 7-4. Значение напряжения между концами вала до 0,5 В не вызывает появления большого подшипникового тока; при напряжении выше 0,5 В возможно протекание значительного подшипникового тока.

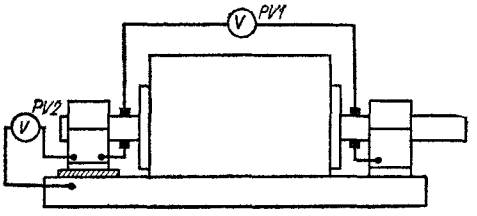


Рис. 7-4. Схема проверки изоляции подшипниковой стойки.

Измерения производят вольтметром со шкалой 3—10 В с возможно малым внутренним сопротивлением для исключения наводок от полей рассеяния.

Проводят два измерения (рис. 7-4):

а) определяют напряжение между концами вала, провода от вольтметра *PV1* при помощи металлических пластинчатых или сетчатых щеток прижимают к концам вала, зачищенным от краски;

б) определяют напряжение между фундаментной плитой и корпусом подшипника вольтметром *PV2*, причем вал с обоих концов электрически присоединяется к стойкам подшипников гибким проводником большого сечения; провод с одного конца имеет упругую металлическую щетку, а с другого конца — наконечник; щетку прижимают к валу в непосредственной близости от подшипника, а наконечник присоединяют болтом к стойке подшипника.

При хорошем состоянии изоляции подшипника напряжения U_1 и U_2 должны быть одинаковыми. Уменьшение напряжения U_2 больше чем на 10 % относительно U_1 указывает на неисправность изоляции и необходимость тщательного обследования и устранения повреждения.

7-5. ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ПОВЫШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ И ПОВЫШЕННЫМ ВЫПРЯМЛЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

1. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытание электрической прочности изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками производят синусоидальным переменным напряжением частотой 50 Гц по схеме рис. 7-5.

Испытательный трансформатор *T2* выбирают с запасом по напряжению и мощности.

Требуемая мощность трансформатора определяется, кВ·А,

$$P = U_и U_н C\omega \cdot 10^{-9},$$

где $U_и$ — испытательное напряжение, кВ; $U_н$ — номинальное напряжение вторичной (высшего напряжения) обмотки испытательного трансформатора, кВ; C — емкость изоляции обмотки, пФ; ω — угловая частота, $с^{-1}$.

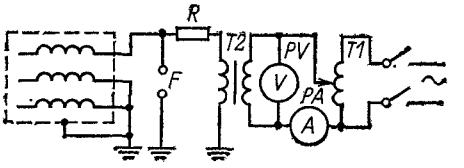


Рис. 7-5. Схема испытания изоляции обмоток машин повышенным напряжением переменного тока.

F — шаровой разрядник.

Питание испытательного трансформатора регулируемым напряжением производят через индукционный регулятор или регулируемый трансформатор от линейного напряжения сети трехфазного тока. Питание фазным напряжением недопустимо. Для испытательных трансформаторов с пределом испытательного напряжения не выше 3000 В допускается питание от линейного напряжения сети трехфазного тока через реостат, включенный потенциометрически.

При питании крупных машин мощностью выше 2000 кВ·А и номинальным напряжением 6000 В и выше для контроля амплитуды испытательного напряжения рекомендуется включать параллельно объекту испытания шаровой разрядник, устанавливаемый на напряжение, превышающее амплитуду данного испытательного напряжения не больше чем на 10 %.

Значения испытательного напряжения промышленной частоты для испытания изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками по ГОСТ 183-74 и ПУЭ приведены в табл. 7-5 ($U_р$ — рабочее напряжение).

Как правило, при испытании следует руководствоваться рекомендациями ПУЭ-76.

Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин.

Проведение испытаний изоляции обмоток высоким напряжением следует начинать с организации рабочего места в соответствии с требованиями правил техники безопасности. Данным испытаниям должна предшествовать проверка сопротивления изоляции согласно § 7-2. Если при испытаниях применяется шаровой разрядник, то подключение испытуемого объекта к испытательной установке производится после проверки и настройки шарового разрядника. Напряжение пробоя разрядника не должно превышать более чем на 10 % заданного значения испытательного напряжения. В табл. 7-6 приведены значения пробивных напряжений для различных диаметров шарового разрядника.

Согласно ПУЭ испытание обмоток статора синхронных генераторов рекомендуется

Таблица 7-5

Значения испытательного напряжения промышленной частоты для испытания изоляции обмоток машин на объекте

№ п/п	Электрическая машина или ее части	Испытательное напряжение (действующее значение), В	
		ГОСТ 183-74	ПУЭ
1	Машины мощностью менее 1 кВт (1 кВ×А) на номинальное напряжение ниже 100 В	$0{,}8\ (2U_н+500)$	—
2	Машины мощностью от 1 кВт (1 кВ·А) и выше на номинальное напряжение ниже 100 В	$0{,}8\ (2U_н+1000)$	$1{,}6U_н+800$
3	Машины мощностью до 1000 кВт (1000 кВ·А), за исключением перечисленных в пп. 1 и 2 настоящей таблицы	$0{,}8\ (2U_н+1000)$, но не менее 1200	$1{,}6U_н+800$, но не менее 1200
	Машины мощностью 1000 кВт (1000 кВ×А) и выше на номинальное напряжение:		
	до 3300 В включительно	$0{,}8\ (2U_н+1000)$	$1{,}6U_н+800$
	свыше 3300 до 6600 В включительно	$0{,}8\cdot 2{,}5U_н$	$2U_н$
	выше 6600 В	$0{,}8\ (2U_н+3000)$	$1{,}6U_н+2400$
4	Обмотки возбуждения машин постоянного тока с независимым возбуждением	$0{,}8\ (2U_н+1000)$, но не менее 1200 В	$1{,}6\ U_н+800$, но не менее 1200 В
5	Обмотки возбуждения синхронных машин:		
	генераторов, двигателей и компенсаторов, пускаемых специальными пусковыми двигателями;	$8\ U_н$, но не менее 1200 В и не более 2800 В	$7{,}5\ U_н$, но не менее 1100 В и не более 2800 В
	машин, предназначенных для непосредственного пуска от источника переменного тока с обмоткой возбуждения, замкнутой на сопротивление, не превышающее 10-кратного сопротивления обмотки;	$8\ U_н$, но не менее 1200 В	—
	то же, но предназначенных для пуска с разомкнутой обмоткой возбуждения	$0{,}8\ (2U_н+1000)$, но не менее 1500 В	—
6	Вторичные обмотки асинхронных двигателей, не находящиеся непрерывно в короткозамкнутом состоянии:		
	допускающих торможение противовключением	$0{,}8\ (4U_р+1000)$	—
	не предназначенных для торможения противовключением	$0{,}8\ (2U_р+1000)$	1000 В
7	Возбудители для синхронных двигателей, если во время пуска они заземлены или отключены от обмотки возбуждения. Обмотки возбуждения возбудителей с независимым возбуждением	$0{,}8\ (2U_н+1000)$, но не менее 1200 В	$8\ U_н$, но не менее 1200 В
8	Собранные в группы электрические машины	85 % испытательного напряжения машины, у которой это напряжение наименьшее	—

Таблица 7-6

Пробивные напряжения шаровых разрядников

Диаметр, см	Верхний предел измерения		Нижний предел измерения	
	Искровой промежуток, мм	Пробивное напряжение (действующее значение), кВ	Искровой промежуток, мм	Пробивное напряжение (действующее значение), кВ
2	15	28,3	0,5	1,9

Продолжение табл. 7-6

Диаметр, см	Верхний предел измерения		Нижний предел измерения	
	Искровой промежуток, мм	Пробивное напряжение (действующее значение), кВ	Искровой промежуток, мм	Пробивное напряжение (действующее значение), кВ
5	35	58,3	3	5,7
6,5	45	71,5	4	10
10	75	109,6	5	11,9

производить до ввода ротора в статор. В процессе испытания производят наблюдение за состоянием лобовых частей машин. Повышать испытательное напряжение нужно плавно, начиная с 25—30 % испытательного. Ступени измерения напряжения не должны превышать 5 % испытательного, а время подъема напряжения от $0{,}5\,U_н$ до $U_н$ не должно быть меньше 10 с. По истечении времени испытания повышенное напряжение плавно снижают, и при значении, равном $0{,}3\,U_н$, установка может быть выключена. По истечении времени испытания повышенным напряжением (1 мин) обмотки статора синхронных генераторов напряжением 10 кВ и выше испытательное напряжение снижается до номинального значения и выдерживается в течение 5 мин для наблюдения за коронированием лобовых частей обмотки статора. В период испытания с безопасного расстояния ведут наблюдение за испытуемой изоляцией. По окончании испытания всех обмоток производят измерение сопротивления изоляции мегаомметром.

Результаты испытания изоляции обмоток считаются удовлетворительными, если во время испытания не происходит пробоя изоляции или перекрытия ее скользящим разрядом. Явление коронирования на поверхности во внимание не принимается. Пробой изоляции характеризуется резким и устойчивым спаданием испытательного напряжения; перекрытие скользящими разрядами сопровождается неустойчивым понижением испытательного напряжения. При пробое и обнаружении серьезных дефектов следует устранить дефекты, после чего испытание повторяется до получения удовлетворительных результатов.

2. Испытание изоляции обмоток выпрямленным напряжением. Испытание выпрямленным напряжением изоляции обмоток машин переменного тока с номинальным напряжением 6 кВ и выше, мощностью 1000 кВт и больше производится при наличии соответствующих рекомендаций завода-изготовителя. Испытание выпрямленным напряжением производится до испытания переменным напряжением.

Значения испытательного выпрямленного напряжения для машин 1-й группы принимаются $2{,}5\,U_н$, а для машин 2-й группы — согласно табл. 7-3. ГОСТ 183-74 допускает дополнительное испытание выпрямленным напряжением, равным 1,28 действующего значения переменного напряжения, указанного в табл. 7-5. Одновременно производится измерение тока утечки. В качестве выпрямителя может быть использовано устройство, имеющее одно- или двухполупериодную схему выпрямления.

Выпрямленное напряжение подводится к каждой фазе обмотки относительно корпуса при двух других, заземленных по схеме рис. 7-6. При наличии параллельных ветвей фаз обмотки каждую ветвь испытывают отдельно.

Подъем испытательного напряжения следует производить не менее чем пятью ступенями, причем начальная ступень не должна превышать $0{,}5U_н$. На каждой ступени напряжение следует выдерживать в течение 1 мин. Ток утечки следует измерять каждые 15 и 60 с. Время снятия напряжения не нормируется. Если испытания проводились во время монтажа до ввода ротора в статор, то после окончания монтажа машины проводят повторное испытание, при этом выпрямленное напряжение равно $1{,}5U_н$.

Провода испытательного аппарата прокладывают на расстоянии не менее чем 0,5 м от корпуса машины и других заземленных частей.

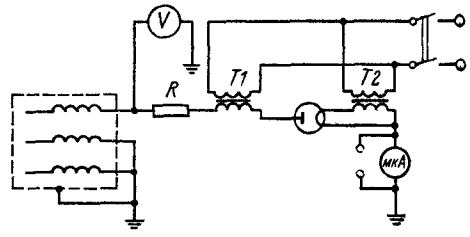


Рис. 7-6. Схема испытания изоляции обмоток выпрямленным напряжением.

Если в процессе испытания при неизменном испытательном напряжении на какой-то ступени ток утечки продолжает нарастать, то испытание прекращают и принимают меры по устранению причин нарастания. Абсолютные значения тока утечки при различных ступенях испытательного напряжения не должны превышать допустимых значений, приведенных в табл. 7-4.

Характеристика $I_{ут}=f(U_и/U_н)$ должна быть близка к линейной (рис. 7-3). Нарушение линейности (наличие излома кривой) сви-

Таблица 7-7

Значения испытательных напряжений

Электрические машины	Испытательное напряжение, время
Электрические машины (кроме турбогенераторов и гидрогенераторов)	$1{,}3U_н$, 3 мин
Электрические машины, у которых при напряжении $1{,}3U_н$ ток холостого хода превышает номинальный	$1{,}3U_н$, 1 мин
Гидрогенераторы	$1{,}5U_н$, 5 мин
Турбогенераторы и синхронные компенсаторы	$1{,}3U_н$, 5 мин
Синхронные машины (кроме турбогенераторов и гидрогенераторов), у которых при номинальном токе возбуждения напряжение выше $1{,}3U_н$	$1{,}3U_н$ (соответственно $I_н$), 3 мин
Возбудители, у которых при форсировке напряжение превышает $1{,}3U_н$	Предельное значение при форсировке, 1 мин

Примечание. При испытании повышенным напряжением допускается одновременно повышение частоты переменного тока не более чем на 15 % или частоты вращения не более 20 % максимального значения.

детельствует об увлажненности изоляции. Резкое расхождение значения тока утечки по фазам (больше чем в 2—3 раза) указывает на дефекты изоляции. Колебания стрелки микроамперметра и вольтметра во время испытания обычно предшествуют пробою изоляции.

После испытания выпрямленным напряжением или перед изменением схемы испытуемую обмотку заземляют не менее чем на 5 мин.

3. Испытание на электрическую прочность междувитковой изоляции. Испытания проводят при холостом ходе путем повышения подводимого напряжения (при испытании в режиме двигателя) или генерируемого (при испытании в режиме генератора). Значения испытательного напряжения приведены в табл. 7-7.

7-6. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

1. Общие замечания. Измерение сопротивлений производят с целью проверки соответствия сопротивления расчетному значению, проверки надежности паек, определения превышения температуры над температурой окружающей среды. Сопротивление может быть измерено в холодном и нагретом состоянии. Холодным состоянием считают такое состояние обмотки, при котором температуры обмотки и окружающей среды различаются не более чем на 3 °С. Нагретое состояние — это состояние обмоток при рабочей температуре.

При определении температуры в холодном состоянии необходимо за 30 мин до испытания заложить в машину термометры.

В практике наладочных работ применяют следующие методы измерения сопротивления постоянному току: амперметра — вольтметра, одинарного моста и двойного моста.

Принципиальная схема включения измерительных приборов при измерении по методу амперметра — вольтметра приведена на рис. 7-7, *а*. Для измерения применяют электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы: вольтметры класса не ниже 0,5 со встроенными добавочными сопротивлениями или наружным добавочным сопротивлением класса 0,1 и милливольтметры класса не ниже 0,5 с шунтами класса 0,1.

По схеме рис. 7-7, *а* производят измерение малых сопротивлений.

Точный расчет измеряемого сопротивления производят по формуле

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}},$$

где R_V — внутреннее сопротивление вольтметра.

Измерение больших сопротивлений рекомендуется производить по схеме рис. 7-7, *б*. Сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_x = \frac{U - IR_A}{I},$$

где R_A — внутреннее сопротивление амперметра.

Во избежание повреждения вольтметра при отключении обмотки, имеющей большую индуктивность, необходимо сначала отключить рубильник *QS2* и только после этого отключить рубильник *QS1*. Регулировку тока производят с помощью добавочного сопротивления *R*.

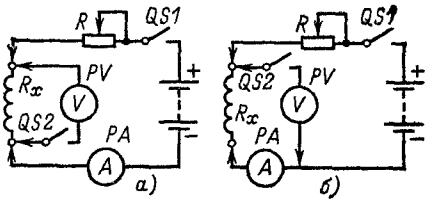


Рис. 7-7. Схемы измерения сопротивлений.

а — малых; *б* — больших.

Наибольший допустимый ток при измерении сопротивления обмотки определяют по формулам: для медной обмотки $I \leqslant 1{,}82\,qa$; для алюминиевой обмотки $I \leqslant 1{,}2\,qa$, где q — поперечное сечение проводника обмотки, мм²; a — число параллельных ветвей обмотки.

При отсутствии обмоточных данных наибольшее значение тока при измерении не должно превышать 20 % номинального значения тока обмотки.

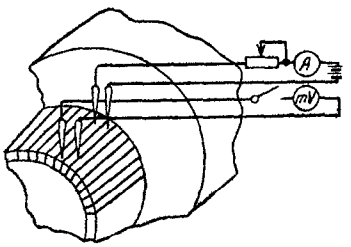


Рис. 7-8. Схема измерения сопротивления обмотки якоря.

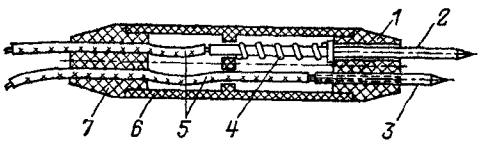


Рис. 7-9. Сдвоенный щуп для измерения сопротивлений.

1 — наконечник; *2* — подвижная игла щупа; *3* — неподвижная игла щупа; *4* — отжимающая пружина; *5* — проводники; *6* — корпус щупа; *7* — втулка.

Вольтметр и амперметр при измерениях следует располагать рядом, показания приборов снимать одновременно.

Для измерения сопротивления больше 1 Ом применяют одинарные мосты. Следует учесть, что в одинарных мостах сопротивление соединительных проводов влияет на результаты измерения. Для более точных измерений сопротивления применяют двойные мосты, в которых сопротивление соединительных проводов

и контактов практически не влияет на результаты измерений.

На значение сопротивления большое влияние оказывает температура обмотки. Для сопоставления результатов измерения сопротивления приводят к одной температуре, чаще всего к условной, принятой за исходную температуру, по формулам:

для медной обмотки

$$R_2 = R_1 \frac{235 + t_2}{235 + t_1};$$

для алюминиевой обмотки

$$R_2 = R_1 \frac{245 + t_2}{245 + t_1},$$

где R_2 — сопротивление обмотки, Ом, приведенное к исходной температуре t_2; R_1 — сопротивление обмотки, Ом, измеренное при температуре опыта t_1.

2. **Измерение сопротивления обмоток машин постоянного тока.** Согласно требованиям ПУЭ измеренные значения сопротивления постоянному току обмоток возбуждения не должны отличаться от ранее измеренных или заводских данных более чем на ±2 %. При измерении сопротивления обмотки якоря между коллекторными пластинами не должны отличаться больше чем на 10 %. Эта разница может быть больше, если она обусловлена схемой соединения обмотки якоря. Измерением сопротивления обмотки между коллекторными пластинами (рис. 7-8) проверяется также качество паек петушков якоря. Если измеренные сопротивления больше допустимых нормами, это означает наличие какого-либо повреждения.

Для измерения пользуются специальными щупами (рис. 7-9). При присоединении щупов к коллекторным пластинам сначала соприкасаются подвижные иглы и замыкают цепь источника тока, а затем при дальнейшем нажатии на щупы соприкасаются неподвижные иглы и замыкают цепь вольтметра. Размыкание происходит в обратной последовательности для защиты вольтметра от толчков э. д. с., возникающих при размыкании цепи.

Известную трудность представляет измерение сопротивления обмотки якоря. Сложность заключается в выборе коллекторных пластин, между которыми должно производиться измерение, для разных типов обмоток с наличием или отсутствием уравнительных соединений.

Измерение сопротивления якоря, выполненное простой волновой обмоткой или простой петлевой обмоткой с полным числом уравнительных соединений, производят между пластинами коллектора, отстоящими друг от друга на $k/2p$ делений коллектора, с округлением до ближайшего целого числа (k — число коллекторных пластин, $2p$ — число полюсов). Измерение сопротивления в малых и средних машинах следует проводить при поднятых щетках; в крупных машинах параллельные соединения, создаваемые щетками, мало влияют на результаты измерения. Для более сложных обмоток якоря выбор коллекторных пластин производят после детального изучения схемы и электрических характеристик обмотки.

3. **Сопротивление обмоток машин переменного тока.** Измерение сопротивлений многофазных обмоток при наличии выводов начала и конца всех фаз следует производить пофазно. Если фазы обмотки статора соединены в звезду и не имеют вывода нулевой точки (рис. 7-10), измерение сопротивления производится между каждыми двумя выводами (двумя фазами).

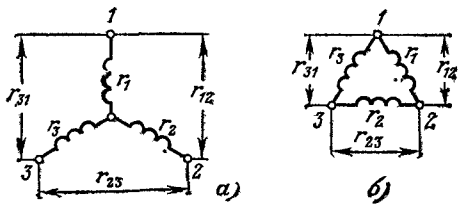


Рис. 7-10. Соединение фаз обмотки.
а — в звезду; *б* — в треугольник.

Результат измерений дает сумму сопротивлений двух фаз:

$$r_{12} = r_1 + r_2;$$
$$r_{23} = r_2 + r_3;$$
$$r_{31} = r_3 + r_1.$$

Сопротивление каждой фазы в отдельности

$$r_1 = \frac{r_{31} + r_{12} - r_{23}}{2}; \quad r_2 = \frac{r_{12} + r_{23} - r_{31}}{2}$$

$$r_3 = \frac{r_{23} + r_{31} - r_{12}}{2}.$$

В случае соединения фаз в треугольник (рис. 7-10) сопротивление каждой фазы равно:

$$r_1 = \frac{1}{2}\left[\frac{4r_{23}r_{31}}{r_{23} + r_{31} - r_{12}} - (r_{23} + r_{31} - r_{12})\right];$$

$$r_2 = \frac{1}{2}\left[\frac{4r_{31}r_{12}}{r_{31} + r_{12} - r_{23}} - (r_{31} + r_{12} - r_{23})\right];$$

$$r_3 = \frac{1}{2}\left[\frac{4r_{12}r_{23}}{r_{12} + r_{23} - r_{31}} - (r_{12} + r_{23} - r_{31})\right].$$

Если расхождение измеренных сопротивлений не превышает 2 % при соединении фаз в звезду и 1,5 % при соединении фаз в треугольник, то сопротивление одной фазы можно определить упрощенно: при соединении фаз в звезду $r_1 = r_2 = r_3 = r/2$; при соединении фаз в треугольник $r_1 = r_2 = r_3 = 3/2r$.

Измерение сопротивления обмотки ротора в двигателях с фазными ротором производят аналогично измерениям обмоток статора. Соединение обмоток ротора может быть в звезду и в треугольник. Напряжение измеряют на контактных кольцах, чтобы исключить влияние переходного сопротивления контактов щеток.

Согласно ПУЭ предельно допустимые отклонения сопротивления постоянному току обмоток различных фаз статора и ротора не должны отличаться одно от другого или от заводских данных более чем на 2 %. Сопротивления гашения поля, пускорегулирующие сопротивления проверяют на всех ответвлени-

ях. Значения сопротивлений не должны отличаться от заводских данных более чем на 10 %.

7-7. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ

Размеры воздушных зазоров электрических машин определяют с помощью специального набора калиброванных щупов. Измерения производят в междужелезном пространстве. Ширина щупа должна быть меньше ширины зубцов, и при измерениях щуп не должен попадать на пазовый клин или бандаж.

Для машин переменного тока измерения производят в нескольких диаметрально противоположных точках — в четырех или восьми в зависимости от размера машины, и с обеих сторон. Средний зазор равен среднеарифметическому измеренных зазоров.

В машинах постоянного тока и синхронных явнополюсных измерение производят под средней частью каждого полюса с двух сторон.

В крупных машинах воздушный зазор в нижней части допускается на 0,1—0,3 мм больше, чем в верхней части.

По данным ПУЭ воздушные зазоры, измеренные в диаметрально противоположных точках, не должны отличаться друг от друга более чем на 10 % среднего размера зазора.

7-8. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАЗОРА В ПОДШИПНИКАХ

Между шейкой вала и верхним вкладышем подшипника устанавливается зазор, который зависит от диаметра шейки вала и частоты вращения. Размеры зазора определяются с учетом подъемной силы масляного клина и образования соответствующей толщины смазочного слоя.

Размеры радиального зазора определяют по оттискам отрезков свинцовой проволоки диаметром 0,5—1 мм, длиной 2—4 см, закладываемых между шейкой вала и верхней половиной вкладыша, а также в полость разъема вкладышей, как указано на рис. 7-11. При равномерной затяжке стяжными болтами верхней половины вкладыша и крышки подшипника отрезки свинцовой проволоки сплющиваются соответственно зазором. После снятия верхнего вкладыша производят измерение микрометром толщины всех свинцовых оттисков.

Зазор по линии *АА* определяют

$$\delta_1 = c_1 \frac{b_1 - b_2}{2}.$$

Зазор по линии *ББ*

$$\delta_2 = c_2 \frac{b_3 - b_4}{2},$$

где c_1, c_2, b_1, b_2, b_3 — толщины свинцовых оттисков; значения δ_1 и δ_2 не должны отличаться друг от друга больше чем на 10 %.

Аналогично определяют зазор между верхним вкладышем и крышкой подшипника; его устанавливают 0,05 мм.

Радиальный зазор в неразъемных подшипниках скольжения измеряют шупом, вводимым между шейкой вала и вкладышем. При измерении шуп следует вводить на всю длину вкладыша.

Таблица 7-8

Допустимые зазоры в подшипниках скольжения

Диаметр вала, мм	Зазор, мм, при частоте вращения, об/мин		
	до 1000	1000—1500	свыше 1500
18—30	0,040—0,093	0,060—0,130	0,14—0,28
30—50	0,050—0,112	0,075—0,160	0,17—0,34
50—80	0,065—0,135	0,095—0,195	0,20—0,40
80—120	0,080—0,160	0,120—0,235	0,23—0,46
120—180	0,100—0,195	0,150—0,285	0,26—0,52
180—260	0,120—0,225	0,180—0,300	0,30—0,60
260—360	0,140—0,250	0,200—0,380	0,34—0,68
360—500	0,170—0,305	0,250—0,440	0,38—0,76

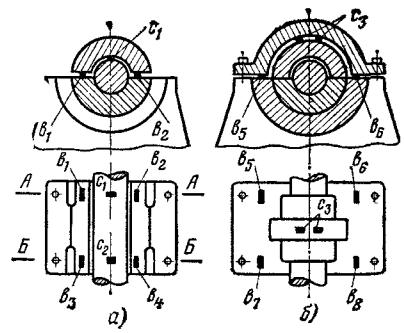


Рис. 7-11. Измерение зазоров в разъемных подшипниках скольжения.

а — зазор между шейкой вала и верхним вкладышем; *б* — зазор между верхним вкладышем и крышкой.

Таблица 7-9

Допустимые зазоры в подшипниках качения

Диаметр вала, мм	Минимальный зазор, мм		Максимальный зазор, мм
	Шарикоподшипники	Роликоподшипники	
20—30	0,005	0,01	0,1
35—50	0,010	0,02	0,15
55—80	0,015	0,03	0,2
85—120	0,020	0,04	0,3

Допустимые радиальные зазоры в подшипниках указаны в табл. 7-8 и 7-9.

В подшипниках качения радиальные зазоры измеряют щупом, который вводят между обоймой и телом качения (шариком, роликом).

7-9. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ И ИСПРАВНОСТИ ОБМОТОК

1. **Проверка выводов обмоток электрических машин постоянного тока.** При правом направлении вращения в режиме электродвигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток, размещенных на

главных полюсах) должен протекать от начала к концу.

Направление вращения считается правым, когда приводной вал вращается по часовой стрелке, если смотреть на машину со стороны приводного вала. Для машин, имеющих два приводных вала, направление вращения определяют по приводному валу, расположенному со стороны, противоположной коллектору или контактным кольцам.

Правильность соединения обмоток сводится к определению их начала и конца. Начало обмотки якоря присоединено к щеткам с положительной полярностью.

2. **Проверка полярности полюсов.** Проверка порядка чередования полярности полюсов обмоток возбуждения машин постоянного тока производится следующими способами:

Способ магнитной стрелки. Включают обмотку возбуждения и подвешенную на тонкой нитке магнитную стрелку подносят поочередно к каждому полюсу. По направлению стрелки судят о полярности полюса. Подносить стрелку необходимо осторожно, чтобы ее не перемагнитить. Лучше всего проверку производить до сборки машины. Если же машина собрана и нет доступа к полюсам, чередование полярности полюсов можно определить, поднося стрелку к болтам, крепящим сердечник полюса к ярму. Полярность полюса со стороны якоря имеет противоположный знак по сравнению с полярностью со стороны ярма.

Способ пробной катушки. Пробная катушка представляет собой плоскую катушку с большим количеством витков, прикрепленную к тонкой пластинке из изоляционного материала. Пробную катушку можно свободно вводить в воздушный зазор машины. Катушка соединена с чувствительным милливольтметром. Проверку полярности производят следующим образом: обмотку возбуждения включают в цепь постоянного тока, пробную катушку вводят в зазор под полюсом, а затем быстро выдвигают из зазора и наблюдают за направлением отклонения стрелки прибора. Можно катушку оставить неподвижной, а размыкать цепь питания обмотки возбуждения.

3. **Проверка чередования главных и добавочных полюсов.** Порядок чередования главных и добавочных полюсов машин указан в табл. 7-10.

Таблица 7-10

Порядок чередования полюсов машин

Режим работы машины	Генератор	Двигатель
Направление вращения якоря	→	→
Чередование полюсов	*N—s—S—n*	*N—n—S—s*

Примечание. *N*, *S* — главный северный и южный полюса; *n*, *s* — добавочные полюса.

Проверку чередования полюсов можно произвести способом магнитной стрелки или способом пробной катушки аналогично проверке полярности полюсов.

4. **Определение правильности соединения обмотки добавочных полюсов по отношению к якорю.** Проверка правильности соединения обмотки якоря и добавочных полюсов сводится к определению направления магнитных потоков якоря и добавочных полюсов при номинальных условиях работы. Эти потоки направлены встречно.

Способ пробной катушки. В зазор между якорем и добавочным полюсом вставляют пробную катушку, которая соединена с милливольтметром, через якорь протекает постоянный ток значением не больше 10 % номинального (рис. 7-12, *а*). Определяют полярность подводимого тока. Производят размыкание цепи и наблюдают за отклонением стрелки милливольтметра; после этого, не вынимая катушки из зазора, подают питание на обмотку добавочных полюсов, сохраняя полярность, которая была при питании обмотки якоря (рис. 7-12, *б*). Размыкая цепь обмотки добавочных полюсов, наблюдают за отклонением стрелки милливольтметра. Если стрелка отклоняется в противоположную сторону по сравнению с предыдущим отклонением при размыкании цепи якоря, следует считать, что обмотки якоря и добавочных полюсов соединены правильно.

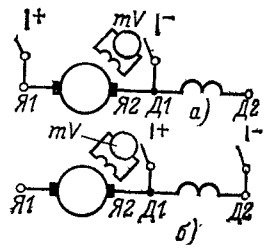


Рис. 7-12. Схема проверки соединения обмоток якоря и добавочных полюсов способом пробной катушки.

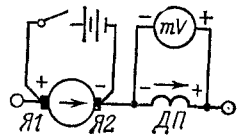


Рис. 7-13. Схема проверки соединения обмоток добавочных полюсов и якоря индуктивным способом.

Способ проверки переменным током. Через обмотку добавочных полюсов, соединенную последовательно с якорем, пропускают переменный ток и измеряют ток и напряжение. Определяют полное сопротивление $Z = U/I$. Затем обмотку добавочных полюсов включают противоположно по полярности и после измерения вновь подсчитывают Z. Правильное соединение обмоток такое, при котором полное сопротивление имеет меньшее значение. При наличии в машине компенсационной обмотки этот опыт можно произвести, включив обмотки добавочных полюсов последовательно с компенсационной. При проведении опыта щетки на коллекторе машины должны быть установлены на нейтрали.

Индуктивный способ. К щеткам якоря, установленным на нейтрали, через рубильник подключают источник постоянного тока (батарею), а к обмотке добавочных полюсов присоединяют миливольтметр (рис. 7-13). В ма-

шинах, где обмотка добавочных полюсов чередуется с катушками компенсационной обмотки, милливольтметр подключают на их общие выводы. Если обмотка добавочных полюсов включена правильно по отношению к обмотке якоря, то при замыкании цепи якоря в обмотках добавочных полюсов индуцируется э. д. с., причем полярность в месте соединения с якорем должна быть одного знака с источником питания. Для обмоток добавочных полюсов, включенных по обе стороны якоря, опыт проводят дважды, для каждой части полюсов отдельно.

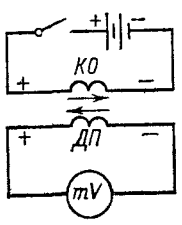


Рис. 7-14. Схема проверки полярности компенсационной обмотки и добавочных полюсов.

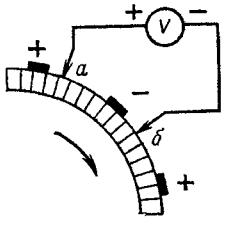


Рис. 7-15. Схема проверки полярности щеток якоря.

5. **Определение правильности соединения компенсационной обмотки и добавочных полюсов.** Магнитный поток компенсационной обмотки должен быть направлен согласно с потоком добавочных полюсов. Взаимную полярность компенсационной обмотки и добавочных полюсов в случае раздельного их соединения проверяют, присоединив к началу обмотки добавочных полюсов положительный вывод милливольтметра, а к началу компенсационной обмотки через рубильник положительный полюс источника низкого напряжения постоянного тока (аккумулятора), как указано на рис. 7-14. При согласном включении обмоток стрелка прибора отклоняется вправо в момент кратковременного включения рубильника, а при размыкании — влево. В крупных машинах, у которых катушки обмоток добавочных полюсов чередуются с катушками компенсационной обмотки, правильность включения этих обмоток определяют путем прослеживания направления намотки витков в катушках, пользуясь правилом «буравчика».

6. **Определение полярности щеток якоря.** *Индукционный способ.* К двум точкам коллектора *а* и *б*, отстоящим от нейтрального положения щеток на небольшой угол (10—15°) в направлении вращения якоря, присоединяют вольтметр (рис. 7-15). Производят включение обмотки возбуждения от источника напряжения, причем положительный полюс источника присоединяют к началу обмотки возбуждения. Если в момент включения стрелка вольтметра отклонится вправо, то положительный полюс в точке *а*, а отрицательный в точке *б*.

Способ проворачивания якоря. К обмотке возбуждения подключают источник постоянного тока заданной полярности, способный создать в полюсах поток, превышающий остаточный. К щеткам якоря присоединяют вольтметр, после чего якорь проворачивают в сторону заданного направления вращения от руки, рычагом или краном. По отклонению стрелки вольтметра судят о полярности щеток якоря.

7. **Проверка исправности обмотки якоря.** Обмотку якоря проверяют на обрыв и короткое замыкание измерением сопротивления секций обмотки. Через две пластины коллектора пропускают определенный ток и измеряют падение напряжения на этих пластинах (см. рис. 7-8). При простой петлевой обмотке измерение производят между соседними пластинами, а при волновой — между пластинами, отстоящими на полюсный шаг по коллектору. Если шаг волновой обмотки неизвестен, то его определяют опытным путем, измеряя сопротивление на расстоянии двойного полюсного деления. Между пластинами, где наименьшее сопротивление, и будет шаг волны. Отступление на одну пластину в любую сторону дает возрастание сопротивления в несколько раз.

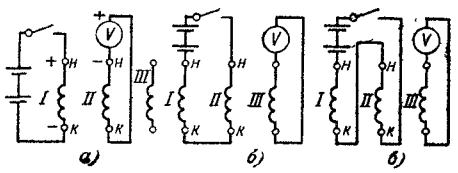


Рис. 7-16. Схема проверки выводов обмотки статора с помощью источника постоянного тока.

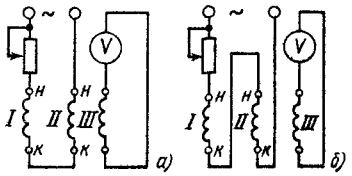


Рис. 7-17. Схема проверки выводов обмотки статора с помощью источника переменного тока.

Наличие обрыва или замыкания в обмотке может быть обнаружено при значительном отклонении измеренного сопротивления. Увеличение сопротивления свидетельствует об обрыве или плохой пайке на данном участке обмотки. Уменьшение сопротивления относительно остальных указывает на наличие короткого замыкания всей секции или ее части. Однако следует учитывать, что в некоторых обмотках якоря сопротивление между измеряемыми пластинами коллектора периодически изменяется по определенному закону. Такое изменение сопротивления на участках обмотки может быть, если обмотки снабжены частью уравнительных соединений. При проверке обмотки якоря на обрыв или короткое замыкание необходимо поднять щетки с коллектора.

8. **Проверка правильности соединения выводов обмоток машин переменного тока.** Проверка сводится к определению начала и кон-

ца каждой фазы. Вначале проверяют выводы каждой фазы в отдельности с помощью мегаомметра или источника питания.

Способ проверки напряжением постоянного тока. Для проверки правильности соединения выводов применяют источник постоянного тока (аккумулятор или сухой элемент) и вольтметр. Схемы проверки представлены на рис. 7-16. Источник питания включают импульсом на одну из фаз (рис. 7-16, *а*), к другим фазам поочередно присоединяют вольтметр. Вольтметр присоединяют к выводам фаз так, чтобы в момент подачи напряжения от источника питания стрелка прибора отклонялась вправо. В этом случае «плюс» батареи и «минус» вольтметра соединены с одноименными выводами фаз. Для контроля источник питания следует присоединить к другой фазе и повторить опыт.

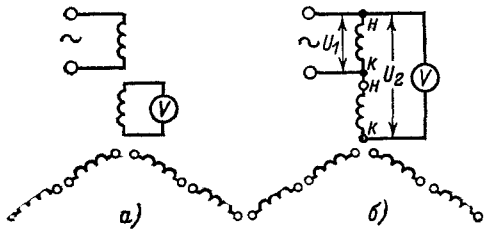


Рис. 7-18. Схема проверки соединений составных частей обмотки.

Маркировку выводов можно проверить также попарным включением фаз. Две фазы соединяют последовательно между собой и присоединяют к источнику питания. К третьей фазе присоединяют вольтметр. Если первые две фазы соединены одноименными выводами (рис. 7-16, *б*), стрелка вольтметра не будет отклоняться при выключении батареи. При соединении фаз разноименными выводами (рис. 7-16, *в*) в момент включения и отключения источника питания стрелка вольтметра будет отклоняться.

Способ проверки напряжением переменного тока.. Две фазы статора соединяют последовательно и включают на пониженное напряжение источника переменного тока. При отсутствии пониженного напряжения последовательно с обмотками можно включить реостат и присоединить к сети низкого напряжения. К третьей фазе присоединяют вольтметр переменного тока. Схемы проверки представлены на рис. 7-17. Если две фазы соединены одноименными выводами (рис. 7-17, *а*), то стрелка вольтметра не отклоняется. При соединении двух фаз разноименными выводами (рис. 7-17, *б*) вольтметр покажет наличие напряжения на третьей фазе. Аналогично определяют соответствие выводов третьей фазы выводам первой или второй фазы.

Проверка правильности соединений отдельных частей составной обмотки производится по схеме рис. 7-18. Подавая переменный ток в одну часть обмотки (рис. 7-18, *а*), по наибольшему из измеренных напряжений находят другую часть обмотки этой фазы. Полярность соединения составных частей обмотки проверяют по схеме рис. 7-18, *б*. При последовательном включении двух одинаковых частей обмотки одной фазы напряжение U_2, измеренное вольтметром, примерно в 2 раза больше напряжения U_1.

Проверку соединения обмоток статора асинхронного двигателя с фазным ротором можно произвести, подавая питание на обмотки ротора от трехфазного понижающего трансформатора. После включения ротора измеряют напряжение на выводах статора. При правильном соединении обмотки статора напряжение на его выводах будет симметричным. Если симметрии не удается достигнуть переключением выводов обмотки статора, то следует проверить соединение катушек обмотки ротора.

7-10. ПРОВЕРКА ПОВЕРХНОСТИ КОЛЛЕКТОРА, КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ, ЩЕТОК И НЕЙТРАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЩЕТОК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Проверка поверхности коллектора и контактных колец. Поверхности коллектора и контактных колец должны быть хорошо отшлифованы. На поверхностях не должно быть следов резца, задиров, забоин, царапин, пятен лака и т. п.

Таблица 7-11

Допустимые биения коллекторов, мкм

Диаметр коллектора, мм	Номинальная частота вращения, об/мин											
	до 100		100—400		400—600		600—850		850—1250		1250—6500	
	при состоянии коллектора											
	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом
355	—	—	40	60	30	50	30	50	30	50	20	30
355—630	—	—	40	60	30	50	30	50	20	40	20	30
630—900	50	80	40	70	30	60	30	50	20	40	—	—
900—1500	50	90	40	70	30	60	30	50	—	—	—	—
Свыше 1500	60	100	40	70	40	70	—	—	—	—	—	—

Таблица 7-12

Допустимые биения контактных колец асинхронных и синхронных машин, мкм

Диаметр контактных колец, мм	Синхронная частота вращения, об/мин									
	до 250		250—500		500—1000		1000—1500		1500—3000	
	при состоянии контактных колец									
	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом	холодном	нагретом
200	—	—	—	—	40	60	30	50	30	40
200—355	—	—	40	70	40	70	30	60	—	—
355—630	—	—	50	80	50	80	30	60	—	—
Свыше 630	60	100	50	90	—	—	—	—	—	—

Таблица 7-13

Основные технические характеристики щеток

Обозначения	Марка	Плотность тока, А/см²	Переходное падение напряжения на пару щеток, В	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Удельное давление на щетку, Па·10³ (кгс/см²)	Коэффициент трения	Максимальная линейная скорость, м/с
Г-20	Угольно-графитные	15	2,9	35—100	50(0,500)	0,22	40
Г-21		5	4,3	150—420	15—100(0,150—1,000)	0,22	30
Г-22		10	2,5	100—230	40(0,400)	0,25	30
Г-3	Графитные	11	1,9	8—20	20—25(0,200—0,250)	0,30	25
611М		12	2,0	8—22	20—25(0,200—0,250)	0,30	40
ЭГ2А	Электрографитированные	10	2,6	11—28	20—25(0,200—0,250)	0,23	45
ЭГ4		12	2,0	6—16	15—20(0,150—0,200)	0,25	40
ЭГ8		10	2,4	30—45	20—40(0,200—0,400)	0,25	40
ЭГ14		11	2,5	20—38	20—40(0,200—0,400)	0,25	40
ЭГ51		12	2,2	20—40	20—25(0,200—0,250)	0,22	60
ЭГ71		12	2,2	20—35	20—25(0,200—0,250)	0,30	40
ЭГ74		15	2,7	35—75	17,5—25(0,175—0,250)	0,22	50
ЭГ85		15	2,3	35—75	17,5—25(0,175—0,250)	0,20	50
М1	Металлографитные	15	1,5	2—5	15—20(0,150—0,200)	0,25	25
М3		12	1,8	6—12	15—20(0,150—0,200)	0,25	20
М6		15	1,5	1—6	15—20(0,150—0,200)	0,20	25
М20		12	1,4	3—13	15—20(0,150—0,200)	0,26	20
МГ		20	0,2	0,04—0,12	18—25(0,180—0,200)	0,20	20
МГ2		20	0,5	0,10—0,25	20—25(0,200—0,250)	0,20	20
МГ4		15	1,1	0,3—1,30	20—25(0,200—0,250)	0,20	20

Биение коллектора и контактных колец измеряют индикатором часового типа, прикрепленным к изолированному от корпуса и от токоведущих частей штативу. Биения коллектора в нагретом и холодном состояниях не должны превышать значений, приведенных в табл. 7-11, а контактных колец — в табл. 7-12.

Наконечник индикатора упирают в щетку, притертую к коллектору, или в коллектор через специально установленный на наконечник индикатора лепесток. Измерения производят при линейной скорости не выше 1 м/с. При вращении машины не должно быть резкого изменения биения коллектора. Недопустимо наличие местного биения из-за выступа или провала отдельных коллекторных пластин.

2. **Проверка состояния щеток.** Проверяют соответствие марки щеток, установленных на машине и рекомендованных заводом-изготовителем. Контактная поверхность (зеркало) щетки должна быть пришлифована. Щетки должны без особых усилий перемещаться в обойме щеткодержателя. Зазор между щеткой и щеткодержателем не должен превышать 0,1—0,2 мм. Расстояние нижнего края обоймы щеткодержателя от коллектора или контактных колец следует устанавливать в пределах 2—4 мм. Давление на щетку должно быть равномерным. Его проверяют с помощью динамометра и тонкой полоски бумаги, положенной под щетку. Одновременно с приложением на динамометр усилия, оттягивающего щетку, натягивают полоску бумаги. Отсчет показания динамометра производят в момент свободного перемещения бумаги. Разность давления отдельных щеток не должна превышать 10 % среднего значения. Давления должны соответствовать рекомендованным по табл. 7-13 значениям для данной марки щеток.

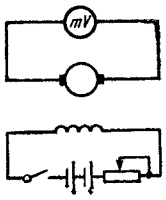


Рис. 7-19. Схема для установки щеток в нейтральное положение.

Равномерность расстановки щеточных рядов по окружности коллектора проверяют наложением на поверхность коллектора бумажной ленты шириной 70—100 мм. Ленту натягивают так, чтобы она плотно прилегала к коллектору. Затем острым карандашом отмечают положение всех щеток по сбегающим краям и, сняв ленту, измеряют расстояния между отметками. Расстановка щеток и щеткодержателей считается удовлетворительной, если разность между наибольшим и наименьшим расстояниями не превышает 1 мм.

3. **Проверка установки щеток в нейтральное положение.** Существует несколько способов установки щеток машин постоянного тока в нейтральное положение, но наиболее практичным является индуктивный, который основан на принципе трансформации э. д. с.

Нейтральное положение щеток определяют на неподвижной машине следующим способом: в цепь обмотки возбуждения подают питание от независимого источника постоянного тока, значение тока не должно превышать 5—10 % номинального. К щеткам разной полярности присоединяют милливольтметр со шкалой с нулем посредине (рис. 7-19). Размыкая и замыкая цепь возбуждения, наблюдают за отклонением стрелки милливольтметра. При нейтральном положении щеток стрелка милливольтметра будет иметь незначительное отклонение. Для контроля проворачивают якорь и повторяют опыт. При проворачивании якоря милливольтметр необходимо отключить. После установки в нейтральное положение и закрепления щеточной траверсы вновь производят проверку, так как при этом может произойти смещение щеток.

7-11. ПРОБНЫЙ ПУСК, ПРОВЕРКА РАБОТЫ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

1. Подготовка к пуску:

а) произвести внешний осмотр машины, убрать лишние предметы, измерительные приборы и инструмент;

б) произвести осмотр и прочистить вентиляционные каналы, продуть машину сжатым воздухом;

в) опробовать систему вентиляции;

г) проверить подшипниковые узлы, крепеж, чистоту масляных ванн, заполнить маслом стойки, отрегулировать подачу масла (если система принудительная), проверить, нет ли течи;

д) проверить равномерность воздушного зазора, крепеж и все болтовые соединения токопровода;

е) провернуть ротор, проверить наличие осевого разбега вала;

ж) произвести измерение сопротивления изоляции машин с подводящими проводами;

з) проверить действие защиты и сигнальной аппаратуры;

и) проверить схему внешних соединений и правильность соединения выводных концов с сетью;

к) проверить установку щеток на нейтрали;

л) произвести пробный пуск с отключением, прослушать, нет ли стука, постороннего шума, вибрации.

2. Проверка машины при холостом ходе:

а) проверить нагрев подшипников, состояние подшипниковых лабиринтов;

б) проверить нагрев обмоток активной стали;

в) измерить вибрацию машины;

г) прослушать шум в машине и установить источники шума (от плохой запрессовки стальных пакетов и вентиляции);

д) проверить притирку щеток;

е) измерить ток холостого хода, напряжение, частоту вращения;

ж) проверить разгон асинхронного двигателя до номинальной частоты вращения;

з) проверить состояние пусковой обмотки синхронного двигателя в процессе пуска и после остановки, а также введение синхронного двигателя в синхронизм;

и) проверить защиту при повышенной частоте вращения;

к) проверить направление вращения машины, полярность зажимов;

л) проверить коммутацию машины, степень и характер искрения щеток;

м) включить электродвигатель на различные частоты вращения;

н) проверить регулировку частоты вращения.

7-12. ВОЗМОЖНЫЕ НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Причины и способы устранения неисправностей приведены в табл. 7-14.

Таблица 7-14

Неисправности электрических машин

Неисправность	Причина	Способ устранения
	Машины постоянного тока	
Искрение щеток	Щетки установлены не на нейтрали. Нарушена равномерность расстановки щеток по коллектору	Установить щетки в нейтральное положение. Проверить равномерность расстановки щеток по коллектору (см. § 7-10, п. 2)
	Щетки слабо или сильно прижаты к коллектору	Измерить и установить нормальное нажатие щеток на коллекторе (см. § 7-10, п. 2)
	Неравномерное нажатие на щетки	Установить равномерное нажатие на щетки
	Неудовлетворительная разбивка главных или добавочных полюсов	Проверить и установить нормальную разбивку полюсов
Искрение появляется при частичной нагрузке	Неправильное чередование главных и добавочных полюсов	Проверить и установить правильное чередование полюсов (см. § 7-9)
Круговой огонь по коллектору	Полностью или частично закорочены добавочные полюсы	Устранить замыкание обмоток полюсов
Щетки равномерно искрят по коллектору	Слишком сильные или слишком слабые добавочные полюсы	Определить зону безыскровой работы и установить необходимый зазор под добавочными полюсами (см. § 7-17)
	Зазор под отдельными добавочными полюсами отличается от других	Произвести измерение зазоров и установить равномерно в пределах допуска (см. § 7-7)
Щетки искрят. Наблюдается потемнение некоторых коллекторных пластин	Плохой контакт или обрыв между обмоткой якоря и коллектором или уравнительными соединениями обмотки	Проверить методом падения напряжения. При обнаружении обрыва или плохого контакта устранить (см. § 7-9)
Щетки искрят, наблюдается почернение пластин, которые находятся через одну или две пластины, может также наблюдаться переходящее почернение пластин	Ослабла затяжка коллектора	Произвести формовку коллектора, проточить коллектор, продорожить, снять фаски и прошлифовать (см. § 7-10)
Щетки искрят, хотя щеточный аппарат и коллектор в порядке	Машина перегружена. Коллектор плохо охлаждается	Проверить приборы и пределы измерения, проверить условия охлаждения
Наблюдается легкое круговое искрение по поверхности коллектора	Коллектор загрязнен	Промыть коллектор

Продолжение табл. 7-14

Неисправность	Причина	Способ устранения
Щетки искрят при переменной нагрузке (разгоне или торможении), повышенный нагрев щеток	Скорость нарастания тока слишком велика	Ограничить скорость нарастания тока
Повышенный нагрев всей машины	Машина перегружена, недостаточная вентиляция, неправильное направление вращения машины с встроенным нереверсивным вентилятором	Проверить нагрузку, расход охлаждающего воздуха (см. § 7-15) и исправность системы охлаждения, проверить направление вращения машины
Повышенный нагрев обмотки якоря на холостом ходу	Неправильно соединен один из главных полюсов (появился уравнительный ток)	Проверить полярность главных полюсов (см. § 7-9)
То же и отдельные катушки главных полюсов нагреваются неравномерно	Замыкание катушек главных полюсов	Проверить сопротивление катушек главных полюсов (см. § 7-6)
Местный нагрев обмотки якоря на холостом ходу	Короткое замыкание в одной или нескольких секциях	Проверить, нет ли замыкания между собой коллекторных пластин и петушков (см. § 7-10)
Перегрев коллектора и щеток	Неправильно выбрана марка щеток, сильное нажатие щеток на коллектор, неравномерное распределение тока между щетками	Выбрать новую марку щеток, установить нормальное нажатие щеток на коллектор (см. § 7-10), установить новый комплект щеток
Генератор не возбуждается или дает напряжение ниже номинального	Генератор с обмоткой самовозбуждения размагничен	Намагнитить машину
	Неправильное положение щеток	Установить щетки в нейтральное положение
	Неправильное направление вращения, при котором обмотка самовозбуждения действует противоположно остаточному магнетизму	Проверить направление вращения
	Междувитковое соединение в одной или нескольких катушках возбуждения	Проверить сопротивление катушек обмотки возбуждения
	Частота вращения ниже номинальной	Установить номинальную частоту вращения
Генератор имеет номинальное напряжение при холостом ходе; при нагрузке напряжение сильно падает	У генератора со смешанным возбуждением последовательная обмотка включена неправильно. Понижается частота вращения гонного двигателя	Соединить последовательную обмотку правильно (см. § 7-9). Устранить причины понижения частоты вращения гонного двигателя
Двигатель не развивает номинальной частоты вращения при номинальном напряжении	Щетки сдвинуты с нейтрали в сторону направления вращения	Установить щетки в нейтральное положение (см. § 7-10)
	Междувитковое замыкание в одной или нескольких катушках обмотки возбуждения	Устранить замыкание витков в обмотке возбуждения (см. § 7-9)

Продолжение табл. 7-14

Неисправность	Причина	Способ устранения
	Синхронные машины	
Перегрета активная сталь при номинальной нагрузке	Машина работает с повышенным напряжением, повышенные потери в стали	Снизить напряжение до номинального значения
Равномерный перегрев обмотки статора	Машина перегружена или недостаточная вентиляция	Проверить нагрузку и вентиляцию (см. § 7-15)
	Напряжение на зажимах двигателя ниже номинального	Установить номинальное напряжение
Обмотка возбуждения нагрета выше нормы	Машина работает с повышенным напряжением. Междувитковое замыкание обмотки возбуждения	Установить номинальное напряжение. Проверить и устранить дефект
Напряжение между фазами генератора неравномерное	Одна или несколько катушек обмотки статора соединены неправильно	Проверить правильность соединений и неправильное соединение устранить (см § 7-9)
Напряжение генератора колеблется	При постоянной частоте вращения плохой контакт в цепи возбуждения	Проверить и устранить дефект
Намагничен вал	Нарушена симметрия магнитного поля вследствие междувиткового замыкания в обмотке возбуждения	Проверить сопротивление обмоток и устранить дефект, размагнитить вал
Двигатель не разгоняется или не разгоняется до номинальной частоты вращения	Напряжение при пуске слишком мало	Проверить напряжение
	Нагрузка на двигателе при пуске слишком велика	Снизить нагрузку
	Витковое замыкание некоторых катушек обмотки возбуждения	Проверить сопротивление обмотки, при наличии замыкания — устранить
При пуске двигателя в роторе появляется искрение	Плохой контакт в пусковой обмотке (соединение колец со стержнями)	Проверить все контакты пусковой обмотки, при необходимости пропаять соединения стержней с кольцами
	Асинхронные двигатели	
Перегрев активной стали статора	Напряжение сети выше номинального	Снизить напряжение до номинального
Местное нагревание активной стали	Замыкание отдельных листов стали между собой	Удалить заусенцы стальных листов
Стяжные болты пакетов стали сильно нагреваются	Плохая изоляция стяжных болтов	Изолировать стяжные болты

Продолжение табл. 7-14

Неисправность	Причина	Способ устранения
Перегрев обмотки статора	Двигатель перегружен или нарушена его вентиляция	Проверить нагрузку и систему вентиляции
	Напряжение на зажимах двигателя ниже номинального	Установить номинальное напряжение
Местные перегревы обмотки статора	Междувитковое замыкание в обмотке статора	Проверить сопротивление фаз, правильность соединения катушек в фазе, сопротивление изоляции между фазами и устранить дефект
Неравномерный ток в фазах	Неправильное соединение одной или нескольких катушек в фазе	
Понижен крутящий момент	Короткое замыкание между фазами	
Перегрев обмотки ротора	Напряжение на зажимах статора ниже номинального	Установить номинальное напряжение на обмотке статора
	Неудовлетворительное охлаждение ротора	Проверить систему вентиляции
Перегрев обмотки ротора	Нарушен контакт в обмотке ротора, неисправен реостат в цепи ротора, плохой контакт между отдельными стержнями и короткозамыкающими кольцами	Найти место плохого контакта в цепи ротора и устранить
Двигатель не разгоняется, гудит	Обрыв в одной фазе статора	Проверить сопротивление фаз, при обнаружении обрыва — устранить
Двигатель не разгоняется, ток в трех фазах равномерный	Неправильное соединение обмоток статора	Проверить соединения обмоток статора
	Отсутствие питания в одной фазе	Проверить питание, подводимое к двигателю
	Обрыв в обмотке ротора	Проверить цепь ротора
	Ротор испытывает одностороннее притяжение вследствие неравномерного воздушного зазора между статором и ротором	Проверить зазоры между статором и ротором, при обнаружении дефектов — устранить
Двигатель вращается с пониженной частотой вращения на холостом ходу и сильно гудит	Одна фаза обмотки статора соединена неправильно	Соединить выводы фаз обмотки статора правильно (см. § 7-9)
Одностороннее притяжение ротора	Неравномерный зазор между статором и ротором	Проверить и установить равномерный зазор между статором и ротором (см. § 7-7)
	Витковое замыкание в статоре	Проверить сопротивление обмотки статора

Продолжение табл. 7-14

Неисправность	Причина	Способ устранения
Искрят щетки и обгорают контактные кольца	Плохо пришлифованы щетки к контактным кольцам	Пришлифовать щетки
	Щетки заклинивают в обойме щеткодержателя	Прочистить щеткодержатели
	Кольца и щетки загрязнены	Промыть кольца и щетки
	Повышенное биение колец	Проточить кольца
	Установлены щетки несоответствующей марки	Выбрать и установить щетки новой марки

Общие неисправности электрических машин

Чрезмерно велик износ щеток	Неудовлетворительно обработана поверхность коллектора, контактных колец	Проточить коллектор, контактные кольца
	Неудачно подобрана марка щеток	Выбрать и установить щетки новой марки
Неисправности подшипников, перегреваются подшипники скольжения	Заклинивают смазочные кольца	Устранить обнаруженный дефект
	У машин с принудительной смазкой: засорен маслопровод; слишком малая подача масла; несоответствующий сорт масла	
	Плохо пригнан вкладыш	
	Шероховата шейка вала	
	Неудовлетворительная центровка	
	Велика радиальная нагрузка на подшипник	

Продолжение табл. 7-14

Неисправность	Причина	Способ устранения
	Велико осевое нажатие на подшипник в результате несовпадения магнитных осей статора и ротора	Устранить обнаруженный дефект
	Повышенная вибрация ротора	
	Наличие подшипникового тока	
Перегревается подшипник качения	Загрязнен подшипник	
	Избыток смазки	
	Отсутствует осевой зазор	
Вибрация машин	Плохо отбалансирован ротор (якорь)	
	Неправильная центровка: дефект соединительных муфт; согнут свободный конец вала; не совпадают оси валов	
	Слишком мал или велик зазор между шейкой вала и вкладышем	
	Непрочно закреплена машина на фундаментной плите	
	Вибрация передается от другой машины или механизма	
	Резонанс отдельных частей машины, т. е. совпадение собственных колебаний с частотой колебания ротора	
	Неравномерный зазор между статором и ротором, слишком большая несимметрия нагрузки	
Повышенный шум в машине	Слабая запрессовка активной стали	
	Вентиляционный шум	

7-13. ИСПЫТАНИЕ НА НАГРЕВАНИЕ

1. **Общие замечания.** Испытания на нагревание проводят для определения температуры обмотки или частей машины относительно охлаждающей среды при номинальной нагрузке машины.

Испытание на нагревание может осуществляться непосредственно при нагрузке и косвенным методом (нагревание от основных потерь). Испытания проводят до установившейся температуры при практически неизменной нагрузке. Установившейся температурой считается такая температура, которая в течение 1 ч изменяется не более чем на 1 °С. Практически неизменной нагрузкой считается такая, при которой напряжение, ток и мощность изменяются не больше чем на ±3 %, а частота не больше чем на ±1 %.

Если испытуемая машина предназначена для работы в повторно-кратковременном или перемежающемся режиме, а при испытаниях их невозможно создать, то проводят испытания при эквивалентном продолжительном режиме.

Среднеквадратичный эквивалентный ток

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 \text{ПН}\%}{100} + \frac{I_2^2 (100 - \text{ПН}\%)}{100}},$$

где I_1 — ток нагрузки за время части цикла ПН; I_2 — ток холостого хода за время части цикла 100—ПН %; ПН % — относительная продолжительность нагрузки, % продолжительности цикла.

Измерению температуры подвергаются: все обмотки, охлаждающий воздух, коллектор, контактные кольца, подшипники, вода или иная охлаждающая жидкость; реже — стальные сердечники, оболочка машины. В зависимости от конкретных условий для измерения температуры применяют различные методы.

Метод термометра. Этим методом определяют температуру поверхности в точке приложения. Применяют ртутные или спиртовые термометры. Для лучшей передачи тепла от нагретой поверхности конец термометра, наполненный ртутью или спиртом, оборачивают станиолью и после установки изолируют от окружающей среды теплоизоляционным материалом (ватой). Ртутные термометры располагают так, чтобы они не находились в магнитном поле, так как показания термометра при этом будут искажаться. Для измерения температуры охлаждающего воздуха (газа) рекомендуется применять термометры с ценой деления 1 °С.

Метод сопротивления. Этот метод позволяет определить среднюю температуру обмотки. Для определения превышения температуры, °С, производят измерение сопротивления обмотки практически в холодном и нагретом состояниях и производят вычисления по формуле

для меди

$$\Delta T = \frac{r_г - r_х}{r_х}(235 + T_х) + (T_х - T_о);$$

для алюминия

$$\Delta T = \frac{r_г - r_х}{r_х}(245 + T_х) + (T_х - T_о),$$

где ΔT — превышение температуры обмотки, °С; $r_х$ — сопротивление практически в холодном состоянии, Ом; $r_г$ — сопротивление в нагретом состоянии, Ом; $T_х$ — температура обмотки в холодном состоянии, °С; $T_о$ — температура охлаждающей среды, °С.

Измерения производят в нагретом и холодном состояниях одними и теми же приборами и на тех же пределах. Так как измерения производят после остановки машины, т. е. спустя некоторое время, то, чтобы результат измерения приблизить к моменту отключения машины, производят экстраполяцию результатов измерений. Сопротивления обмотки измеряют

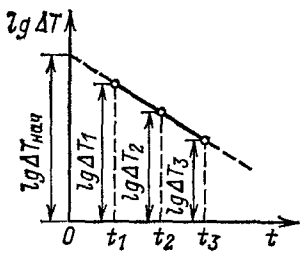


Рис. 7-20. Экстраполяции кривой превышения температуры машины.

3—4 раза через одинаковые интервалы времени. Первое измерение должно быть произведено не позднее чем через 1 мин после отключения для машин мощностью до 100 кВт и через 2 мин для машин мощностью свыше 100 кВт.

По результатам измерений строят график (рис. 7-20), на оси абсцисс откладывают время, а на оси ординат — превышение температуры в логарифмическом масштабе. Полученные точки соединяют плавной линией. Точка пересечения этих линий с осью ординат и будет превышением температуры в момент отключения. При остановке машины необходимо отключить приток охлаждающей среды. Сопротивление обмоток измеряют методом вольтметра — амперметра или методом двойного моста.

Измерение при помощи температурных индикаторов — термометров сопротивления или термопар. Температурные индикаторы в основном применяют в машинах переменного тока и закладывают в пазы между слоями обмоток и на дне паза. Превышение температуры определяют по показанию прибора, комплектно поставленного с термометром сопротивления, или пользуются таблицей градуировки. При измерениях следует учесть, что термометры сопротивления имеют тепловую инерцию от 9 с до 4 мин. Измерение температуры с помощью термопары производится откалиброванным вместе с ней прибором или измерением термо-э. д. с. термопары. Температура в этом случае определяется по табл. 7-15. Приведенные в табл. 7-15 значения яв-

Таблица 7-15

Зависимость термо-э. д. с. термопар от температуры нагретого спая при температуре холодного спая 0 °С

Температура нагретого спая, °С	Термо-э.д.с. термопары, мВ		Температура нагретого спая, °С	Термо-э.д.с термопары, мВ	
	медь—константан	хромель—копель		медь—константан	хромель—копель
10	0,45	0,65	90	3,7	6,2
20	0,85	1,3	100	4,2	6,95
30	1,25	2,05	110	4,6	7,7
40	1,65	2,7	120	5,0	8,45
50	2,05	3,4	130	5,4	9,2
60	2,5	4,1	140	5,8	9,9
70	2,85	4,8	150	6,45	10,7
80	3,25	5,5			

ляются превышением температуры нагретого спая над температурой холодного спая термопары (место присоединения термопары к прибору).

Температуру охлаждающей среды определяют как среднеарифметическое показаний термометров, установленных на расстоянии 1—2 м от испытуемой машины на высоте ее оси. Термометры должны быть защищены от влияния теплоты, излучаемой самой машиной и другими источниками тепла. При принудительном охлаждении машины за температуру охлаждающей среды принимают температуру газообразной или жидкой среды в месте входа в машину.

В табл. 7-16 приведены допустимые превышения температуры частей электрических машин.

2. Испытание на нагревание машин постоянного тока. Испытание на нагревание в режиме номинальной нагрузки может производиться реальной нагрузкой, для которой предназначена машина, или с помощью вспомогательных машин по схемам рис. 7-21. При испытании машин с переменной нагрузкой, например для привода прокатного стана, необходимо установить ритмичность работы стана в течение 4—5 ч. Тепловые испытания желательно проводить при нагрузках 100 и 75 % номинального значения и холостом ходе с построением зависимости превышения температуры обмоток от потерь в них.

Для машин мощностью более 100 кВт согласно ГОСТ 10159-79 допускается проводить тепловые испытания косвенным методом. Суть метода состоит в том, что определяют превышения температур и температуры частей машины при двух режимах испытаний: в режиме холостого хода с номинальным током возбуждения и режиме короткого замыкания генератора с номинальным током якоря.

Для исключения возможного самовозбуждения машин со смешанным возбуждением при проведении испытаний в режиме короткого замыкания последовательную обмотку включают так, чтобы она действовала размагничивающим образом. При испытании машин, не имеющих последовательной обмотки, используют искусственные способы, обеспечивающие поддержание устойчивой работы. В машинах, имеющих достаточные промежутки между катушками обмоток главных и добавочных полюсов, накладывают временную

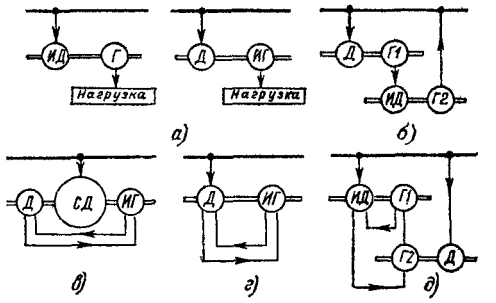


Рис. 7-21. Схемы испытаний машин под нагрузкой с применением вспомогательных машин.

а — испытание машин без возврата энергии в сеть; *б* — испытание двигателя с возвратом энергии в сеть; *в, г* — испытание генератора по схеме взаимной нагрузки с подводом энергии на покрытие потерь; *д* — испытание двигателя с применением вольтодобавочного генератора.

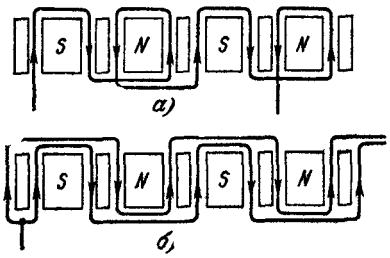


Рис. 7-22. Наложение временных намагничивающих обмоток.

а — при малом; *б* — при большом номинальном токе машины.

последовательную обмотку из гибкого изолированного провода так, чтобы она не оказывала влияния на добавочные полюса (рис. 7-22). Когда временную обмотку невозможно наложить, подбирают возбудительный генератор постоянного тока (20—40 кВт), имеющий две независимые обмотки на главных полюсах. Схема включения этого генератора показана на рис. 7-23. Обмотка возбуждения испытуемой машины питается от возбудителя *GE*. Обмотка возбудителя *LGE1* питается от независимого источника и служит для регулировки нагрузки испытуемой машины. Обмотка *LGE2* предназначена для поддержания устойчивой работы и включена параллельно компенсационной обмотке и обмотке добавочных полюсов испытуемой машины. Магнитный поток обмотки *LGE2* направлен встречно потоку обмотки *LGE1*. Превышение температуры отдельных частей машины при номинальной нагрузке определяется как сумма превы-

Таблица 7-16

Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре охлаждающей среды 40 °С (по ГОСТ 183-74)

№ п/п.	Части электрических машин	Метод измерения	Предельно допустимые превышения температуры, °С, при классе изоляционных материалов по ГОСТ 8865-70				
			A	E	B	F	H
1	Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	Сопротивления	60	70	80	100	125
		Температурных индикаторов	60	70	80	100	125
2	Обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 кВ·А или с длиной сердечника менее 1 м	Термометра	50	65	70	85	105
	Обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3, 4, 5 настоящей таблицы	Сопротивления	60	75	80	100	125
	Якорные обмотки, соединенные с коллектором						
3	Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	Сопротивления	—	—	90	110	135
4	Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	Термометра	65	80	90	110	135
		Сопротивления	65	80	90	110	135
5	Обмотки вобуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	Термометра	60	75	80	100	125
		Сопротивления	60	75	80	100	125
6	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Термометра	60	75	80	100	125
7	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создали бы опасность повреждения изоляционных или других близлежащих материалов					
8	Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с обмотками						
9	Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	Термометра	60	75	80	100	125
		Температурных индикаторов	60	75	80	100	125
10	Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	Термометра	60	70	80	90	100

Примечания: 1. Для обмоток машин переменного тока на номинальное напряжение выше 11 000 В предельно допустимые превышения температуры должны быть снижены на каждые 1000 В (полные или неполные) сверх 11 000 В на 1,5 °С при измерении термометром и на 1,0 °С при измерении температурным индикатором.

2. Основным методом измерения превышения температуры обмоток, за исключением обмоток, указанных в п. 1, является метод сопротивления. Метод термометра допускается только в тех случаях, когда метод сопротивления по каким-либо причинам не может быть применен. Если в дополнение к значениям, полученным по методу сопротивления, желательно иметь отсчет по методу термометра, то превышения температуры, измеренные в наиболее допустимой точке, не должны превышать:

65 °С для изоляции класса A
80 °С » » » E
90 °С » » » B
110 °С » » » F
135 °С » » » H

3. Предельно допустимая температура подшипника не должна превышать: для подшипников скольжения 80 °С (температура масла при этом не должна быть более 65 °С); для подшипников качения 100 °С.

шений температуры при двух указанных испытаниях.

3. Испытание на нагревание синхронных машин. Испытание на нагревание синхронных машин проводят при нормальной нагрузке или косвенным методом. Если при нормальной нагрузке невозможно установить номинальную мощность, проводят несколько испытаний при

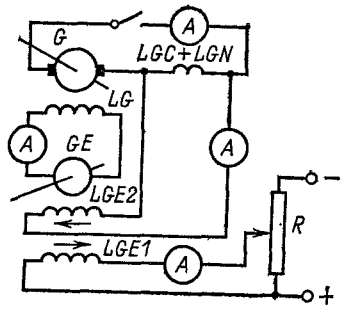


Рис. 7-23. Схема включения возбудителя при испытании машины постоянного тока в режиме короткого замыкания.

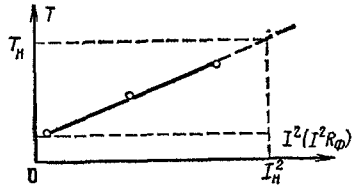


Рис. 7-24. Определение превышения температуры методом экстраполяции.

разных нагрузках при одном и том же напряжении и по возможности коэффициенте мощности. По полученным данным строят график зависимости превышения температуры T от квадрата тока или потерь $I^2R_ф$ и, экстраполируя, определяют превышение температуры при номинальном режиме работы (рис. 7-24).

Для мощных синхронных машин режим работы в качестве компенсатора является номинальным режимом. Синхронные машины, которые невозможно соединить с другими машинами, испытывают на нагревание в режиме компенсатора. Испытание на нагревание ограничивают двумя режимами: при номинальном токе якоря и номинальном токе возбуждения. Для этого машину синхронизируют с сетью и устанавливают необходимые токи в обмотках.

4. Испытание на нагревание асинхронных двигателей. Испытание на нагревание асинхронных двигателей производят, как правило, при нормальной нагрузке и номинальном напряжении. Нагрузку устанавливают по номинальному току. Если условия не позволяют установить номинальную нагрузку, то проводят испытания при холостом ходе и других значениях тока статора. Строят график зависимости превышения температуры в функции потерь в обмотке статора $3I^2R_ф$ и экстраполируют характеристику до желаемого тока.

При незначительном отклонении тока статора $I_с$ при испытаниях от номинального $I_н$ пользуются пересчетом по формуле

$$\Delta T = \left(\frac{I_н}{I_с}\right)^2 \Delta T_с,$$

где $\Delta T_с$ — превышение температуры обмотки при испытаниях.

Измерения превышений температур обмоток статора и ротора производят методом сопротивления.

7-14. ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Наиболее частой причиной вибрации машины является остаточная неуравновешенность ее вращающихся частей или неудовлет-

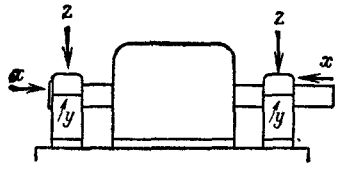


Рис. 7-25. Измерение составляющих вибрации.
x — продольная; y — поперечная; z — вертикальная.

ворительная центровка. В основном измерение вибрации производят на подшипниковых стойках или щитах в трех направлениях (составляющих): продольном, поперечном и вертикальном (рис. 7-25). Вибрацию определяют по значению двойной амплитуды в миллиметрах или микронах.

При проверке вибрации следует руководствоваться стандартами на нормы вибрации, при отсутствии таких данных — рекомендациями ПУЭ или завода-изготовителя. Согласно ПУЭ значения вибраций синхронных генераторов, компенсаторов и их возбудителей не должны превышать значений, приведенных в табл. 7-17, а асинхронных машин — в табл. 7-18.

Таблица 7-17

Допустимые значения вибрации синхронных генераторов, компенсаторов и их возбудителей

Номинальная частота вращения ротора, об/мин	3000		1500—500	1000—750	375—214	187	До 100
	Мощность 150 МВт и более	Мощность до 150 МВт					
Вибрационное смещение, мкм	30	40	70	80*	100	150	180

* Синхронные компенсаторы.

ГОСТ 20815-75 приводит допустимые значения вибрации электрических машин переменного тока с массой выше 2000 кг и частотой

Таблица 7-18

Допустимые значения вибрации асинхронных двигателей

Частота вращения, об/мин	3000	1500	1000	750 и ниже
Вибрационное смещение, мкм	50	100	130	160

вращения до 3000 об/мин (кроме гидрогенераторов, турбогенераторов, синхронных компенсаторов) при испытаниях на стендах заводов-изготовителей (табл. 7-19).

Таблица 7-19

Допустимые значения вибрации машин переменного тока

Частота вращения, об/мин	3000	1500	1000	750	600
Вибрационная скорость, мм/с	3,3	2,8	2,4	2,1	1,8
Вибрационное смещение, мкм	30	50	65	75	80

Допустимые значения вибрации для машин постоянного тока по данным электромашиностроительных заводов приведены в табл. 7-20.

Таблица 7-20

Допустимые значения вибрации машин постоянного тока

Частота вращения, об/мин	375	500	600	750	1000	1500	3000	4500
Вибрационное смещение, мкм	90	85	80	75	70	60	40	30

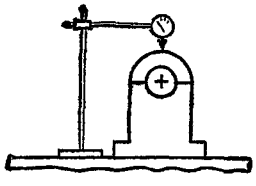


Рис. 7-26. Измерение вибрации.

Простейший способ измерения вибрации по перемещению осуществляется с помощью индикатора часового типа, укрепленного в месте, не подверженном вибрации (рис. 7-26).

Существуют приборы: виброметры, вибрографы. Наиболее распространенный прибор типа ВИП-2М; предназначен для измерения вибрации машин при ускорениях, не превышающих 5 *g*.

7-15. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Расход охлаждающего воздуха Q, м³/с, равен произведению скорости воздуха V, м/с, на площадь сечения воздухопровода, σ, м²

$$Q = V\sigma.$$

Существует множество различных способов определения расхода охлаждающего воздуха: при помощи пневмометрической трубки Пито или Прандтля, анемометром, термоанемометром, калориметрическим расходомером, измерительными коллекторами, дросселирующими диафрагмами, счетчиком газа и др. Наибольшее распространение получили способы анемометра и пневмометрической трубки.

Анемометры — приборы для измерения скорости воздушного потока, применяют, когда диаметр воздухопровода больше или равен шести диаметрам крыльчаток прибора.

Крыльчатые анемометры применяют при скоростях воздушного потока 0,5—15 м/с. Чашечные анемометры применяют при скоростях воздушного потока 5—50 м/с.

Измерение скорости воздуха при помощи анемометра производят следующим образом. Сечение воздухопровода условно разбивают на равные площади и в центре каждой производят измерение. Установив прибор в заданном месте, включают секундомер и счетный механизм прибора и через 10—20 с производят отсчет (S_2), отсчет показаний счетчика производят и до включения счетного механизма прибора (S_1). Количество оборотов крыльчатки анемометра (n) вычисляют по формуле

$$n = \frac{S_2 - S_1}{T}.$$

По прилагаемой к прибору характеристике переводят число оборотов в секунду в скорость воздушного потока, м/с.

Пневмометрическая трубка Прандтля применяется в качестве приемника динамического давления. Динамическое давление определяется как разность между полным и статическим давлениями и измеряется дифференциальными манометрами (или микроманометрами).

Наиболее распространенным является чашечный однотрубный с наклонной трубкой микроманометр ММН с пределом измерения 0—1960 Па (0—200 кгс/м² по ГОСТ 11161-71).

Ось пневмометрической трубки устанавливается навстречу направлению воздушного потока.

Скорость воздушного потока вычисляется, м/с,

$$V = \sqrt{\frac{2H_{дин}}{\rho}},$$

где $H_{дин}$ — динамическое давление, Па; ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Для условий, отличающихся от нормальных, плотность воздуха следует брать с поправками на фактическую температуру и атмосферное давление B

$$\rho = 1{,}205\frac{B \cdot 293}{101395\,(273 + t)} \approx \frac{0{,}035B}{273 + t}.$$

Новый расход охлаждающего воздуха при необходимости произвести корректировку его расхода, зная частоту вращения вентилятора, определяют как

$$Q = Q_и\frac{n}{n_и},$$

где $Q_и$, $n_и$ — измеренные расход охлаждающего воздуха и частота вращения вентилятора.

7-16. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗБЕГА РОТОРА (ЯКОРЯ) В ОСЕВОМ НАПРАВЛЕНИИ

В подшипниках скольжения между торцами вкладышей и выступами вала устанавливают определенные зазоры для обеспечения

нормальной работы подшипника. На рис. 7-27 показаны осевые зазоры в подшипниках. На одном подшипнике устанавливают равномерные зазоры, а на другом — с учетом удлинения вала при повышении температуры (удлинение составляет 0,5 мм на 1 м длины при повышении температуры вала на 40 °С).

При работе машины под влиянием магнитных сил ротор (якорь) устанавливается в положение магнитной оси. Возможны случаи, когда магнитная ось смещена относительно

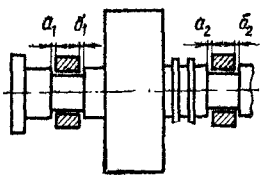


Рис. 7-27. Зазоры между торцами вкладышей и заточками вала.

ротора, тогда усилиями магнитного поля ротор (якорь) будет перемещаться в ту или другую сторону, выбирая при этом установленный зазор. Это может привести к недопустимому нагреванию подшипника. Поэтому проверяют наличие осевого зазора и магнитной симметрии. Для этого устанавливают осевые зазоры в подшипниках машины и определяют равномерность смещения ротора (якоря) относительно торцов железа статора (сердечников главных полюсов). Измерения производят мерной линейкой в нескольких местах (на машинах постоянного тока относительно каждого главного полюса) с обеих сторон машины. Среднеарифметические измерения с каждой стороны должны быть равны.

К подшипниковой стойке или фундаментной плите прикрепляют индикатор часового типа и наконечник его устанавливают в торец вала машины. Запустив машину в режиме холостого хода, производят отсчет показаний индикатора. Отключив машину от сети и при вращении ее на выбеге, не изменяя положения индикатора, прикладывают небольшое усилие вдоль оси вала то с одной стороны, то с противоположной, делают отсчеты показаний индикатора. Совпадение показания индикатора при вращении возбужденной машины со средним значением показаний при перемещении вала (якоря) без возбуждения указывает, что машина собрана удоблетворительно. Если при работе возбужденной машины ротор будет смещаться в одну сторону, то следует статор переместить в сторону, противоположную смещению ротора. Разбег ротора (якоря) в обе стороны указывается заводом-изготовителем. Если этих данных нет, то разбег ориентировочно принимают 2—4 мм для валов диаметром до 200 мм и 2 % диаметра шейки вала для валов диаметром выше 200 мм.

7-17. НАЛАДКА КОММУТАЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Оценка степени искрения. Степень искрения на коллекторе электрических машин определяется под сбегающим краем щетки в соответствии с табл. 7-21 (ГОСТ 183-74).

Если степень искрения не оговорена стандартами или техническими условиями, то она при номинальном режиме работы машины не должна превышать $1^1/_2$. Состояние коллектора и щеток машин, предназначенных для продолжительного номинального режима работы, проверяют по истечении времени, необходимого для достижения практически установившейся температуры машины, но не ранее чем через 2 ч после начала работы — для машин мощностью 100—300 кВт включительно, 8 ч

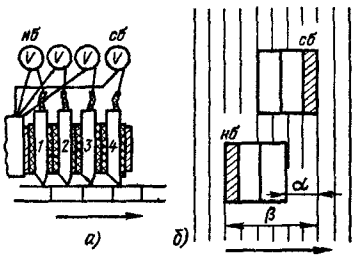


Рис. 7-28. Измерительные щетки для снятия потенциальных диаграмм.

1, 2, 3, 4 — измерительные щетки; *α* — раздвижка щеток; *β* — щеточное перекрытие; *нб* — набегающий край; *сб* — сбегающий край.

для машин мощностью 300—1000 кВт включительно и 16 ч для машин выше 1000 кВт.

2. Метод объективной оценки коммутации машин постоянного тока. Сущность его состоит в измерении напряжения на набегающем и сбегающем краях щетки или щеточного перекрытия (если на машине установлены щетки с раздвижкой).

Измерение производят с помощью специальных измерительных щеток по схеме рис. 7-28, *а*. Эти щетки должны иметь минимальную ширину контактной поверхности, т. е. немного больше межламельного расстояния. Измерительные щетки изолированы от корпуса и между собой. Измерение напряжения производят между измерительной щеткой и подвеской, на которой крепятся рабочие щеткодержатели. Если основные щетки установлены с раздвижкой, то измерительные щетки располагают, как показано на рис. 7-28, *б*, в разных щеткодержателях. Если напряжение на сбегающем крае больше, чем на набегающем, то коммутацию считают замедленной. Это свидетельствует о слабом поле добавочных полюсов. И наоборот, при большем напряжении на набегающем крае, чем на сбегающем, коммутация ускоренная, т. е. добавочные полюсы сильные. Равные напряжения на обоих краях щетки гарантируют прямолинейную коммутацию.

На рис. 7-29 приведены примерные характеристики распределения напряжения под щетками. Определение потенциальных характеристик под щетками производится как в установившихся, так и в переходных режимах. В переходных режимах измерения напряжения производят с помощью осциллографической записи. При этом записывают напряжение и ток якоря, частоту вращения, ток возбуждения и время.

Таблица 7-21

Характеристики степени искрения

Степень искрения (класс коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щетках
$1^1/_4$	Слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки	То же
$1^1/_2$	Слабое искрение под большей частью края щетки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных и вылетающих искр, допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

Практически коммутация считается удовлетворительной, когда напряжение набегающего края $\Delta U_{нб}$ несколько больше напряжения сбегающего края $\Delta U_{об}$, т. е. коммутация немного ускоренная. Абсолютные значения зависят от марки щеток и ряда других причин.

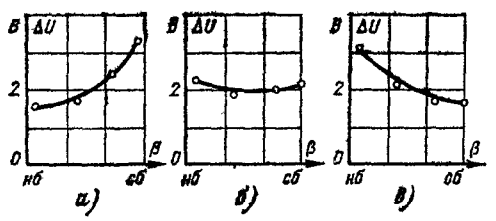


Рис. 7-29. Характеристики распределения напряжения под щетками.

а — замедленная коммутация; *б* — прямолинейная коммутация; *в* — ускоренная коммутация.

При стационарной работе машины можно пользоваться отношением

$$\frac{\Delta U_{сб}}{\Delta U_{нб}} = \frac{2}{3} \div \frac{1}{2}.$$

Описанный метод является удобным при исследовании характера коммутации в переходных режимах, когда область безыскровой работы определить невозможно.

3. Регулировка добавочных полюсов по методу области безыскровой работы. Область безыскровой работы является весьма важной характеристикой коммутационных свойств машины постоянного тока и позволяет получить определенное значение оптимального зазора добавочных полюсов. Метод регулировки добавочных полюсов с помощью области безыскровой работы получил широкое применение при наладке машин. Область безыскровой коммутации определяется следующим образом. К обмотке добавочных полюсов *LMN* присое-

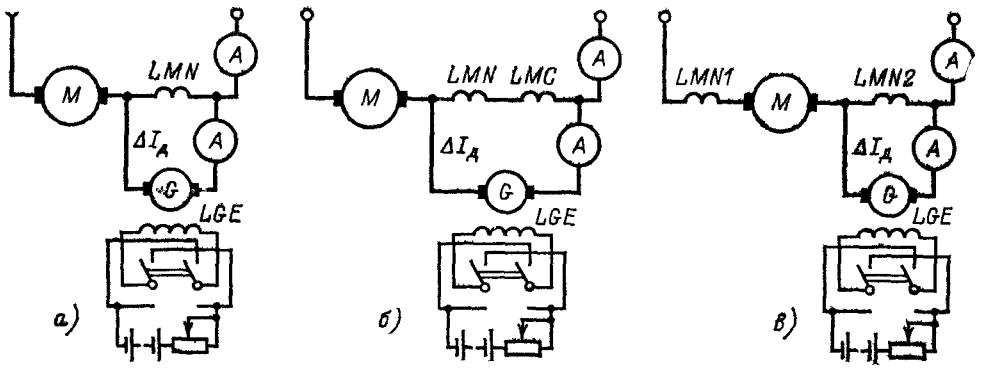
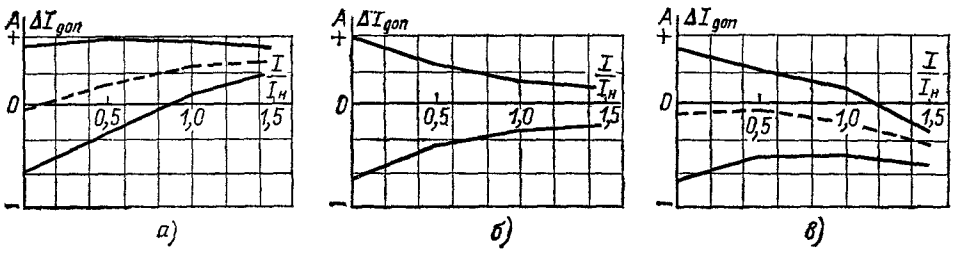


Рис. 7-30. Схемы для определения области безыскровой работы.



а) б) в)

Рис. 7-31. Область безыскровой работы.

а — слабые добавочные полюсы; *б* — добавочные полюсы отрегулированы хорошо; *в* — сильные добавочные полюсы.

диняют независимый регулируемый источник постоянного тока по схеме рис. 7-30, *а*. В машинах, у которых катушки добавочных полюсов *LMN* чередуются с катушками коммутационной обмотки *LMC*, независимый источник присоединяют на их общую цепь согласно схеме рис. 7-30, *б*. Если машина имеет обмотку добавочных полюсов, разделенную на две части *LMN1* и *LMN2*, включенные по обе стороны якоря, допускается присоединять независимый источник *G* на одну из частей (см. рис. 7-30, *в*). При заданной нагрузке машины постепенно увеличивают ток дополнительного питания $\Delta I_{доп}$ до появления первой искры под любой щеткой. Искрение наблюдают под сбегающим краем щеток. Если полярность тока добавочных полюсов совпадает с полярностью дополнительного питания, то знак дополнительного питания считают положительным $+\Delta I_{доп}$, если полярность не совпадает, то знак отрицательный $-\Delta I_{доп}$.

Область безыскровой работы определяют при токе якоря 150, 100, 75, 50, 25 % номинального значения и при холостом ходе. По полученным данным строят характеристику коммутации — область безыскровой работы (рис. 7-31) и графически определяют среднюю линию. Требуемый воздушный зазор добавочных полюсов

$$\delta' = \frac{\delta}{1 \pm \frac{\Delta I_{доп}}{I} \frac{Q}{Q-1}},$$

где δ' — новый воздушный зазор добавочных полюсов, мм; δ — воздушный зазор, при котором определена область, мм; I — ток нагрузки, для которого необходимо отрегулировать воздушный зазор добавочного полюса, А; $\Delta I_{доп}$ — соответствующий току нагрузки ток дополнительного питания, считая от средней линии области безыскровой работы до оси абсцисс, А; Q — отношение намагничивающей силы добавочных полюсов и компенсационной обмотки к намагничивающей силе якоря, вычисленной по формуле

$$Q = \frac{8pa\,(w_{доб} + w_к)}{Na_{доб}},$$

где p — число пар полюсов в машине; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; $w_{доб}$ — число витков на одном добавочном полюсе; $w_к$ — число витков компенсационной обмотки вокруг одного добавочного полюса; N — общее число проводников на якоре;

Таблица 7-22

Перечень возможных причин неудовлетворительной коммутации машин

I. Недостатки при подготовке машины

1. Щетки плохо притерты к поверхности коллектора
2. Поверхность коллектора имеет риски, борозды
3. На пластинах коллектора совсем не сняты или плохо сняты фаски
4. Между коллекторными пластинами выступает изоляция
5. На боковых поверхностях коллекторных пластин оставлена изоляция
6. Поверхность коллектора загрязнена

II. Недостатки при регулировке машин

7. Щетки смещены с нейтрального положения
8. Нарушена равномерность расстановки щеток по окружности коллектора
9. Неправильная установка щеток в радиальном направлении
10. Щетки установлены непараллельно коллекторным пластинам
11. Увеличено расстояние между коллектором и нижней кромкой обоймы щеткодержателя
12. Заедание щеток в щеткодержателях
13. Заедание деталей механизма щеткодержателей
14. Щетки слабо или сильно прижаты к коллектору
15. Неравномерное нажатие на щетки
16. Воздушные зазоры под отдельными добавочными полюсами отличаются от других
17. Неудовлетворительная разбивка главных или добавочных полюсов

III. Механические неполадки в машине

18. Деформация или местное биение пластин коллектора
19. На поверхности коллектора имеются плоские места (лыски)
20. Чрезмерно большой зазор между щеткой и обоймой щеткодержателя
21. Ослабло крепление сердечников отдельных добавочных полюсов
22. Динамический небаланс

IV. Электрические неполадки в машине

23. Плохой контакт или обрыв между обмоткой якоря и коллектором или уравнительными соединениями обмотки

Продолжение табл. 7-22

24. Коллекторные пластины замкнуты
25. Замыкание витков в цепи добавочных полюсов или компенсационной обмотке
26. Высокое межламельное напряжение
27. Намагничивающая сила добавочных полюсов не соответствует требуемым условиям работы
28. Неправильное чередование главных и добавочных полюсов
29. Несовершенное качество щеток
30. Неравномерное распределение тока между параллельно включенными щетками

V. Конструктивные недостатки машины

31. Материал токоведущих проводов щеток слишком жесткий
32. Размеры токоведущих проводов и их наконечников выбраны неправильно или они некачественно соединены
33. Неправильно выбрана марка щеток
34. Область коммутации слишком узкая
35. Ширина щетки выбрана неправильно
36. Магнитное перенасыщение сердечника добавочных полюсов

VI. Неблагоприятные условия работы машины

37. Попадание масла на поверхность коллектора и масляные пары в воздухе
38. Запыленная атмосфера
39. Машина перегружена
40. Атмосфера загрязнена газами
41. Скорость нарастания тока слишком велика
42. Машина продолжительное время работает с очень малой или нулевой нагрузкой
43. Большой пусковой ток
44. Местное взаимодействие коллектора с материалом щеток при остановке машины
45. Коллектор плохо охлаждается
46. Температура коллектора низкая

VII. Внешние неполадки

47. Вибрация из-за дефектов в системе передачи
48. Внешнее короткое замыкание или очень тяжелые пики нагрузки

$a_{доб}$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Обычно Q находится в пределах 1,2—1,4. В крупных машинах постоянного тока часто применяют двойной зазор у добавочных полюсов, воздушный зазор между полюсным наконечником и якорем δ_1, зазор между основанием сердечника добавочного полюса и станиной δ_2 за счет установленных прокладок из немагнитного материала. Кроме того, под сердечники добавочных полюсов прокладывается пакет металлических прокладок из листового железа для удобства регулировки. Для машин с двойным зазором эквивалентный зазор определяется по формуле $\delta_э = \delta_1 + k\delta_2$. Здесь k — коэффициент, зависящий от рассеяния потока добавочного полюса, геометрических размеров главных и добавочных полюсов и др. Обычно коэффициент $k = 0{,}8 \div 1{,}6$. В машинах, где имеется немагнитный зазор более 2 мм, крепление сердечника добавочного полюса к станине производится немагнитными болтами. После изменения зазора повторно определяют область безыскровой работы.

Таблица 7-23

Признаки неудовлетворительной коммутации и их причины

Признаки ухудшения работы	Возможные причины (см. табл. 7-22)
Щетки	
Искрят:	
все щетки по контактной поверхности	2, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 14, 17, 18, 24, 25, 26, 27, 29, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 47, 48
на набегающем крае	11, 17, 18, 19, 20, 22, 47
на сбегающем крае	1, 2, 7, 8, 10, 11, 14, 17, 18, 21, 23, 25, 27, 33, 35, 36, 39, 40, 48
круговой огонь	6, 26, 48
Подгорает и разрушается контактная поверхность	7, 14, 26, 27, 33, 35, 39, 40
Вибрирует, скалывается	3, 4, 9, 11, 12, 13, 15, 18, 19, 20, 22, 29, 30, 41, 42, 47
Перегревается	8, 13, 14, 23, 27, 29, 30, 39, 41
Быстро изнашивается	2, 4, 9, 11, 12, 14, 18, 20, 22, 29, 30, 38, 39, 40, 41, 42, 47
Перегревается токоведущий провод	12, 13, 15, 16, 29, 30, 40
Коллектор	
Отдельные ламели:	
подгорают	2, 3, 4, 5, 8, 14, 15, 16, 18, 19, 23, 24, 25, 27, 30, 47
приобретают разную окраску	2, 3, 24, 29, 33, 40, 41, 44, 47
Поверхность коллектора:	
чернеет	4, 8, 15, 16, 18, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 33, 39, 40
покрывается рисками, задирами, бороздами	9, 12, 13, 14, 27, 29, 30, 38, 40
нагревается	4, 14, 23, 27, 29, 30, 39, 40
покрывается пятнами	9, 14, 23, 38, 39, 40

4. Причины, вызывающие искрение. Одной из основных задач наладки коммутации машин постоянного тока является выявление причин искрения под щетками и определение путей его устранения. Неудовлетворительная коммутация может быть вызвана двумя ос-

новными группами причин: механическими факторами, влияющими на работу контакта щетка — коллектор, и электромагнитными, определяющими степень компенсации реактивной э. д. с. в коммутирующих секциях обмотки якоря.

Для удобства рассмотрения наиболее часто встречающихся неполадок вызывающие их причины сведены в табл. 7-22 и табл. 7-23.

7-18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Характеристика холостого хода определяет зависимость э. д. с. якоря E от тока возбуждения $I_в$ при постоянной частоте вращения $n_н$ и отсутствии тока в цепи якоря: $E = f(I_в)$ при $I = 0$; $n = n_н = \text{const}$.

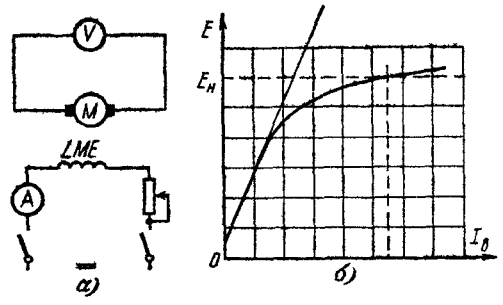


Рис. 7-32. Схема для снятия характеристики холостого хода (*а*) и характеристика холостого хода машины постоянного тока (*б*).

Характеристику холостого хода снимают по схеме рис. 7-32, *а*. При работе машины в режиме генератора якорь машины приводят во вращение от постороннего двигателя с номинальной частотой вращения, которую во время опыта поддерживают постоянной. Цепь якоря разомкнута. Ток в обмотке возбуждения устанавливают наибольший из условий допустимого напряжения на зажимах якоря (обычно не больше 120 % номинального значения), производят запись показаний E, $I_в$, n. Далее постепенно снижают ток возбуждения и делают восемь — десять отсчетов. Последний отсчет производят при $I_в = 0$.

Если во время опыта частота вращения изменялась, производят пересчет по формуле

$$E_р = E_1 \frac{n_н}{n_1},$$

где E_1, n_1 — данные опыта; $n_н$ — номинальная частота вращения; $E_р$ — расчетная э. д. с.

Характеристики холостого хода электродвигателя снимают при регулируемом напряжении якоря машины U и постоянной частоте вращения n.

Падением напряжения в якорной цепи при холостом ходе пренебрегают и считают, что $U \approx E$. Отсоединенный от производственной машины двигатель запускают вхолостую, изменением напряжения якоря устанавливают номинальную частоту вращения и при наибольшем токе возбуждения производят запись показаний приборов U, $I_в$, n. Затем ток возбуждения плавно снижают и соответственно изменяют напряжение на зажимах якоря до тех пор, пока установится номинальная частота вращения машины, и производят запись показаний. Таким методом снимают восемь — десять точек характеристики (рис. 7-32, *б*).

Если испытание электрической прочности междувитковой изоляции совмещено со снятием характеристики холостого хода, то напряжение на якоре повышают до 130 % номинального, выдерживают это напряжение в течение 3 мин и производят отсчет показаний приборов.

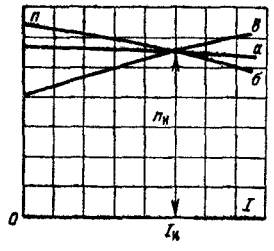


Рис. 7-33. Внешние характеристики генератора постоянного тока.

а — с одной параллельной обмоткой возбуждения; *б* — с согласно-включенной последовательной обмоткой; *в* — с встречно-включенной последовательной обмоткой.

2. Внешняя характеристика генератора представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока нагрузки I при номинальной частоте вращения $n_н$ и токе возбуждения $I_{в,н}$

$$U = f(I) \text{ при } n = n_н = \text{const};$$

$$I_в = I_{в,н} = \text{const}.$$

Генератор приводят во вращение, устанавливают номинальное значение частоты вращения, тока возбуждения, тока якоря и прогревают машину до установившейся температуры. Затем, не изменяя тока возбуждения и частоты вращения, повышают ток якоря до максимально возможного значения (желательно не менее 150 % номинального) и производят запись показаний U, I, $I_в$, n. Далее генератор постепенно разгружают и производят очередной отсчет показаний приборов. Снимают восемь — десять точек характеристики.

В некоторых случаях определяют две основные точки внешней характеристики: точку номинальной нагрузки и точку холостого хода.

Отклонения напряжения $\Delta U_н$ определяют по формуле

$$\Delta U_н = \frac{U_х - U_н}{U_н} 100\%, \qquad (7\text{-}2)$$

где $U_х$ — напряжение при холостом ходе; $U_н$ — напряжение при номинальной нагрузке.

На рис. 7-33 показаны внешние характеристики генератора.

3. Рабочая (скоростная) характеристика двигателя представляет собой зависимость частоты вращения двигателя n от тока нагрузки I при номинальных значениях напряжения

цепи якоря $U_н$ и тока возбуждения $I_{в,н}$; $n=f(I)$ при $U=U_н=\text{const}$; $I_в=I_{в,н}=\text{const}$. Предварительно двигатель прогревают номинальной нагрузкой до установившейся температуры и устанавливают номинальный ток возбуждения. Затем увеличивают нагрузку до

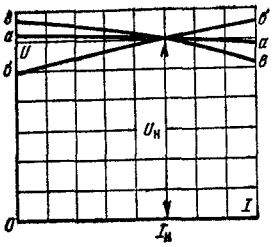
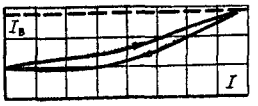


Рис. 7-34. Рабочие характеристики двигателя.

а — с одной параллельной обмоткой возбуждения; *б* — с согласно-включенной последовательной обмоткой; *в* — с встречно-включенной последовательной обмоткой.

Рис. 7-35. Регулировочная характеристика генератора.



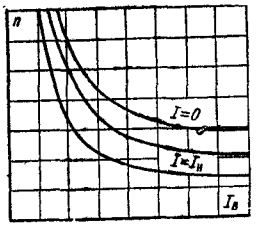


Рис. 7-36. Регулировочная характеристика двигателя.

максимально возможной (желательно не менее 150 % номинального значения) и производят запись показаний: n, I, $I_в$, U. Постепенно снижают нагрузку двигателя и производят отсчеты для шести — восьми точек. На рис. 7-34 представлены скоростные характеристики двигателя.

По данным скоростной характеристики определяют изменение номинальной частоты вращения двигателя

$$\Delta n_н = \frac{n_х - n_н}{n_н} 100\%,$$

где $n_н$ — номинальная частота вращения при номинальной нагрузке, об/мин; $n_х$ — частота вращения при холостом ходе, об/мин.

4. Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость между током возбуждения $I_в$ и током якоря I при номинальных значениях напряжения цепи якоря и частоты вращения $I_в=f(I)$ при $U=U_н=\text{const}$; $n=n_н=\text{const}$.

Примерный вид характеристики приведен на рис. 7-35. Определение характеристики желательно производить при повышении тока якоря от холостого хода до максимально возможного и при понижении его, так как из-за гистерезиса ветви характеристики не совпадают друг с другом. Перед снятием характеристики испытуемую машину прогревают номинальной нагрузкой.

Регулировочная характеристика двигателя представляет собой зависимость частоты вращения от тока возбуждения при номинальном напряжении цепи якоря (рис. 7-36).

Характеристику снимают в следующем порядке. Двигатель запускают вхолостую, устанавливают номинальные значения тока возбуждения и напряжения цепи якоря, затем создают тормозной момент на валу так, чтобы ток якоря двигателя был равен номинальному току, и регистрируют по показаниям приборов U, I, $I_в$. После этого плавно снижают ток возбуждения, сохраняя ток нагрузки, и регистрируют показания приборов.

Для реверсивных двигателей регулировочную характеристику снимают при обоих направлениях вращения.

Во время испытаний необходимо следить за тем, чтобы при снижении тока возбуждения частота вращения двигателя не превысила максимально допустимую. В условиях наладки регулировочную характеристику двигателя с независимым возбуждением снимают при холостом ходе.

7-19. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

1. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость напряжения обмотки статора U от тока возбуждения $I_в$ при номинальной частоте вращения, при отсутствии нагрузки $U=f(I_в)$, при $n=n_н=\text{const}$; $I=0$.

Характеристики можно снимать в режиме генератора и в режиме двигателя.

В режиме генератора характеристику холостого хода снимают следующим образом. Вспомогательным двигателем генератор приводят во вращение с номинальной частотой. Обмотку возбуждения присоединяют к источнику постоянного тока и устанавливают ток возбуждения, при котором напряжение обмотки статора равно 130 % номинального. Производят запись показаний приборов: линейного напряжения статора, тока возбуждения и частоты вращения или частоты напряжения статора. Затем постепенно уменьшают ток возбуждения, производят отсчет показаний приборов и таким образом снимают восемь — десять точек характеристики. Во время опыта ток возбуждения изменяют плавно и только в одном направлении. Если частота отличается от номинальной, производят пересчет напряжения $U_х$ по формуле

$$U_х = U\frac{f_н}{f},$$

где U, f — данные отсчета.

Симметричность напряжения статора проверяют измерением напряжения между всеми тремя выводами по схеме рис. 7-37, *а*. Расхождение между наибольшим и наименьшим значениями не должно превышать 1 % среднего значения. По данным измерений строят характеристику (рис. 7-37, *б*). При необходимости определения потерь холостого хода генератора производят измерение потребляемой мощности вспомогательного двигателя, затем

генератор отсоединяют от двигателя и производят повторное измерение потребляемой мощности двигателя; разность указанных двух измерений равна потерям холостого хода генератора.

Определение характеристики холостого хода в режиме двигателя производят при питании от регулируемого источника напряжения переменного тока.

После запуска двигателя устанавливают номинальное напряжение питания статора и регулируют ток возбуждения так, чтобы в обмотке статора протекал минимальный ток (по показанию амперметра в цепи статора).

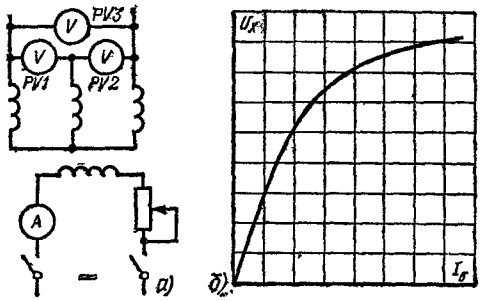


Рис. 7-37. Схема для снятия характеристики холостого хода (*а*) и характеристика холостого хода (*б*).

Производят запись показаний приборов U, $I_в$, f, затем снижают напряжение статора и аналогично снимают другие точки характеристики.

Для определения потерь холостого хода производят измерение потребляемой мощности двигателя при номинальном напряжении и минимальном токе статора. Если необходимо определить отдельно механические потери и потери в стали, снимают характеристику зависимости потребляемой мощности двигателя от приложенного к обмотке статора напряжения. Строят график. Экстраполируют характеристику до пересечения с осью ординат и производят разделение потерь (рис. 7-38). Потерями в обмотке статора из-за их незначительности пренебрегают. Более точное разделение потерь можно производить построением части характеристики при небольших напряжениях (три — пять точек) в функции квадрата напряжения. Полученная прямолинейная зависимость в месте пересечения с осью ординат дает точку разделения.

2. Характеристика трехфазного короткого замыкания генератора (к. з.) представляет собой зависимость тока статора от тока возбуждения при номинальной частоте вращения и закороченных выходных зажимах статора

$$I_к = f(I_в) \text{ при } U = 0; \quad n = \text{const}.$$

Опыт к. з. проводят по схеме рис. 7-39. Ротор генератора приводят во вращение с номинальной частотой, плавно увеличивают ток возбуждения до такого значения, при котором ток статора не превышает 150 % номинального. Измеряют ток статора, ток возбуждения и частоту вращения. Затем ток возбуждения плавно снижают и проводят пять-шесть отсчетов. При необходимости определения потерь короткого замыкания генератора производят измерение потребляемой мощности вспомогательного двигателя во время опыта короткого замыкания и вычитают из него потребляемую мощность двигателя, когда генератор отсоединен от двигателя. Потери короткого

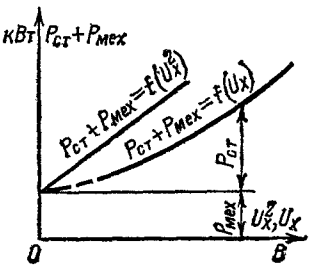


Рис. 7-38. Разделение потерь холостого хода.

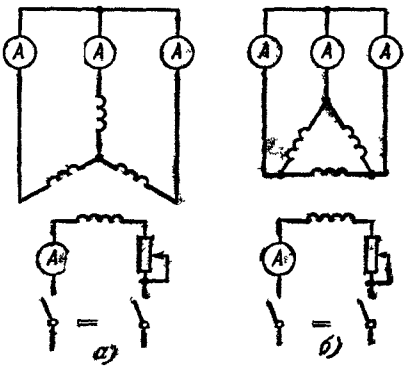


Рис. 7-39. Схема для снятия характеристики трехфазного короткого замыкания синхронной машины.

а — при соединении обмотки статора в звезду; *б* — при соединении обмотки статора в треугольник.

замыкания состоят из потерь в обмотке статора (для трехфазных машин $3I^2R_ф$) и добавочных потерь (мощность, расходуемая на вихревые токи в проводниках).

Опыт к. з. машины можно проводить в режиме двигателя. Делают это следующим образом. Запускают испытуемую машину и, если система питания позволяет, повышают частоту вращения на 10—15 % выше номинальной. После этого машину отключают от источника питания, снимают возбуждение, закорачивают обмотку статора и затем плавно увеличивают ток возбуждения до значения, при котором ток цепи статора достигает 150 % номинального. Записывают показания приборов I, $I_в$, n. Ток возбуждения остается неизменным до остановки двигателя. Опыт повторяют для пяти-шести значений тока статора. По полученным значениям тока возбуждения и статора при номинальной частоте вращения строят график (рис. 7-40). Потери определяют с помощью характеристик частоты враще-

ния при выбеге в функции времени $n = f(t)$. Характеристику снимают при различных значениях тока возбуждения и соответствующем ему токе статора. Графически построив касательную к кривой $n = f(t)$, определяют производную dn/dt. Потери к. з. вычисляют по формуле

$$P_к = \frac{J}{9{,}55}\,\frac{n_c}{9550}\,\frac{dn}{dt},$$

где $P_к$ — общие потери в машине на выбеге, кВт; J — момент инерции, кг·м²; n_c — синхронная частота вращения, об/мин.

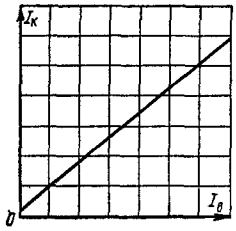


Рис. 7-40. Характеристики трехфазного короткого замыкания синхронной машины.

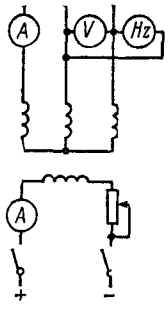


Рис. 7-41. Схема для снятия U-образной характеристики.

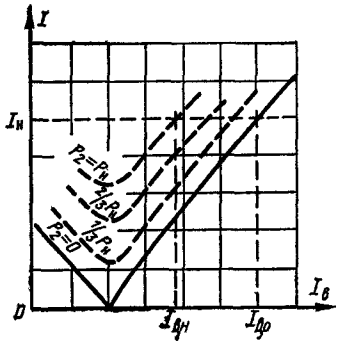


Рис. 7-42. U-образная характеристика синхронной машины.

В общие потери к. з. входят: потери в обмотке статора, равные $3I^2R_ф$, механические и добавочные.

3. U-образная характеристика представляет собой зависимость тока статора I от тока возбуждения $I_в$ при постоянных значениях частоты f и напряжения цепи статора U.

Характеристику снимают в режиме генератора или двигателя по схеме рис. 7-41. При снятии характеристики измеряют напряжение и частоту, ток статора и ток возбуждения. Для снятия характеристики при ненагруженном синхронном двигателе устанавливают наименьший ток возбуждения, при котором двигатель не выпадает из синхронизма, и производят отсчет; затем увеличивают ток возбуждения, производят очередной отсчет, и так до тока в статоре 105—110 % номинального. Аналогично снимают характеристику при нагрузке на валу двигателя, 25, 50, 75 и 100 % номинальной (рис. 7-42). При наладке привода ограничиваются снятием U-образной характеристики при холостом ходе ($P_2 = 0$; $\cos\varphi = 0$).

4. Определение номинального тока возбуждения и номинального падения напряжения методом графического построения производят в том случае, когда нет возможности создать непосредственную нагрузку или необходимо произвести анализ режимов работы при различных нагрузках. Для построения графика используют характеристику холостого хода, характеристику симметричного короткого замыкания и U-образную характеристику. Построение диаграммы можно разделить на две части:

а) Определение индуктивного падения напряжения в обмотке статора $IX_р$ и тока возбуждения $I_{в,а}$, компенсирующего реакцию якоря при номинальном токе якоря. На U-образной характеристике при $\cos\varphi = 0$ находят точку, соответствующую номинальному току статора (точка A по рис. 7-43, *а*). Влево от точки A параллельно оси абсцисс откладывают отрезок AB, равный току возбуждения $I_{в,к}$ характеристики короткого замыкания при номинальном токе статора. Из точки B проводят прямую BC параллельно касательной к начальной части характеристики холостого хода OO_1. Прямая BC пересекает характеристику холостого хода в точке C. Из точки C опускают отрезок CD, который представляет собой падение напряжения $IX_р$ на реактивном сопротивлении двигателя $X_р$ при номинальном токе статора. Отрезок DA соответствует току возбуждения $I_{в,а}$.

б) Определение номинального тока возбуждения $I_{в,н}$ и номинального падения напряжения ΔU. Построение графика производят следующим образом (рис. 7-43, *б*). Из точки 0 начала координат под углом $\varphi_н$, соответствующим номинальному коэффициенту мощности $\cos\varphi_н$, к оси абсцисс проводят вектор номинального напряжения $U_н$. Из конца вектора напряжения перпендикулярно оси абсцисс откладывают вектор падения напряжения в реактивном сопротивлении $IX_р$. Геометрическая сумма векторов $U_н$ и $IX_р$ дает вектор электродвижущей силы E. Вектор тока возбуждения $I_в$, создающий эту э. д. с., определяют по характеристике холостого хода и откладывают из начала координат под углом 90° к вектору E. Вектор тока возбуждения $I_{в,а}$, компенсирующий реакцию якоря при номинальном токе статора, откладывают в конце вектора $I_в$ параллельно оси абсцисс. Сумма векторов $I_в$ и $I_{в,а}$ равна вектору номинального тока возбуждения $I_{в,н}$. Если вектор отложить на оси абсцисс, то получим ток возбуждения в амперах. Из характеристики холостого хода определяют напряжение U_x при номинальном токе возбуждения.

Изменение напряжения ΔU в процентах определяют по (7-2).

5. Определение синхронных реактивных сопротивлений.

а) Синхронное реактивное сопротивление по продольной оси X_d определяют графически по данным характеристик холостого хода и короткого замыкания в соответствии рис. 7-44.

Ордината $U_н$ характеристики холостого хода при построении равна ординате $I_н$ характеристики короткого замыкания.

Продолжая начальную часть характеристики холостого хода до пересечения с линией $U_н$,

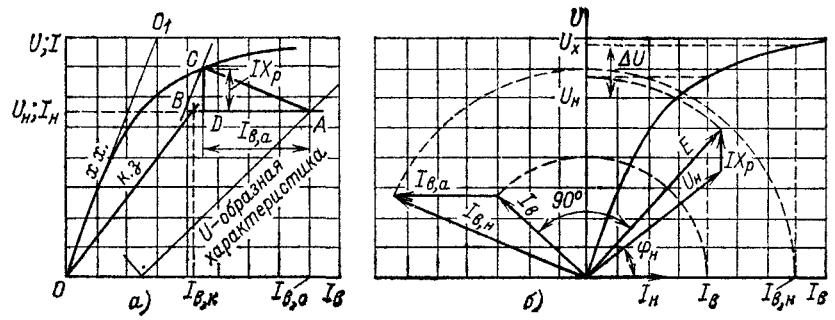


Рис. 7-43. Графическое определение номинального тока возбуждения синхронной машины.
а — определение индуктивного падения напряжения $IX_р$; *б* — определение номинального тока возбуждения $I_{в,н}$.

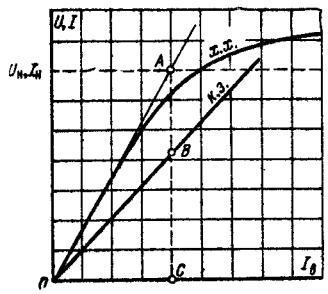


Рис. 7-44. Графическое определение реактивного сопротивления X_d.

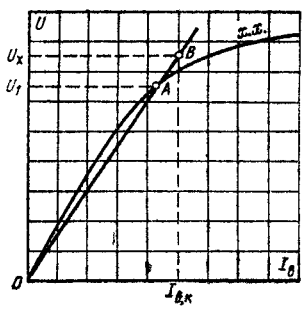


Рис. 7-45. Графическое определение реактивного сопротивления X_q.

находят точку *A*, опускают перпендикуляр *AC* на ось абсцисс и находят точку пересечения *B* с характеристикой короткого замыкания; X_d, Ом, определяют по отношению $X_d = AC/BC$.

б) Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси X_q определяют методом отрицательного возбуждения. Синхронную машину запускают двигателем и синхронизируют с питающей сетью. Ток возбуждения уменьшают до нуля, изменяют его полярность и затем постепенно увеличивают до выпадения двигателя из синхронизма, определяют ток возбуждения $I_{в,к}$ и напряжение U_1, при котором машина выпала из синхронизма.

На характеристике холостого хода (рис. 7-45) находят точку *A*, соответствующую напряжению U_1, соединяют с началом координат прямой линией. Из точки $I_{в,к}$ на оси абсцисс проводят прямую параллельно оси ординат до пересечения с линией *OA*, находят точку пересечения *B* и соответствующее ей напряжение $U_х$. Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси X_q, Ом

$$X_q = X_d \frac{U_1}{U_1 + U_х}.$$

7-20. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

1. Характеристика холостого хода асинхронного двигателя представляет собой зависимость тока статора $I_х$ и потребляемой мощности $P_х$ от напряжения $U_х$ статора при номинальной частоте $f_н$ и отсутствии нагрузки на валу двигателя

$$I_х = f(U_х); \quad P_х = f(U_х) \text{ при } f_н = \text{const};$$
$$M_2 = 0.$$

Характеристику холостого хода можно снять при наличии регулируемого источника переменного тока требуемой мощности — индукционного регулятора или синхронного генератора.

Примерная характеристика холостого хода представлена на рис. 7-46. При приемо-сдаточных испытаниях можно ограничиться определением одной точки характеристики при номинальных напряжении и частоте источника питания статора.

При снятии характеристики двигатель предварительно прогревают на холостом ходу до установившейся температуры подшипников и обмотки. Продолжительность прогрева принимается равной для двигателей мощностью до 100 кВт — 1 ч, мощностью выше 100 кВт — 2 ч. После запуска двигателя с фазным ротором контактные кольца следует закоротить. Измерения производят по схеме рис. 7-47. Для более точных измерений применяют

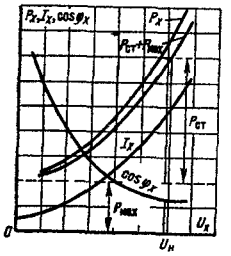


Рис. 7-46. Характеристика холостого хода асинхронного двигателя.

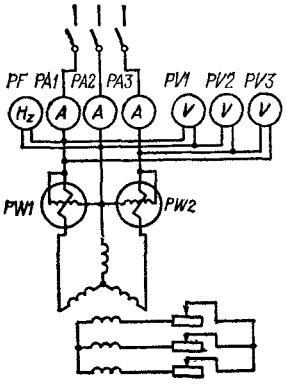


Рис. 7-47. Схема для снятия характеристик трехфазных асинхронных двигателей.

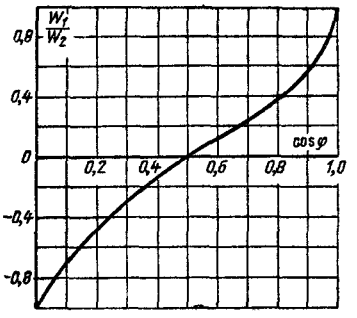


Рис. 7-48. Кривая для определения cos φ по отношению показаний двух ваттметров.

приборы класса 0,5 и ваттметры, предназначенные для измерений при низких коэффициентах мощности. Если измерение мощности производится по схеме двух ваттметров, то контроль схемы измерения можно осуществить проверкой коэффициента мощности. Значение $\cos\varphi_x$ определяют двумя способами: по формуле

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{\sqrt{3}U_x I_x}$$

или по отношению показаний вольтметров и кривой рис. 7-48. Если значения $\cos\varphi_x$ близки, то измерения правильны.

Значения напряжения и тока определяют как среднеарифметическое показание приборов

$$U_x = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}; \quad I_x = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$$

Потери холостого хода P_x состоят из потерь в стали статора $P_{ст}$, механических $P_{мех}$ и потерь в обмотке статора $P_{x,м}$.

Потери в обмотке статора вычисляют по формулам: при соединении обмоток в звезду $P_{x,м} = 3I_x^2 R_ф$; при соединении обмоток в треугольник $P_{x,м} = I_x^2 R_ф$, где I_x — линейный ток холостого хода; $R_ф$ — сопротивление одной фазы статора во время опыта.

Сумма механических потерь и потерь в стали $P_{мех} + P_{ст} = P_x - P_{x,м}$.

Для определения механических потерь и потерь в стали строят график зависимости суммы потерь $P_{мех} + P_{ст}$ от квадрата приложенного напряжения U_x^2 и экстраполируют эту зависимость до пересечения с осью ординат (см. рис. 7-38). Если при измерениях частота источника питания f отличается от номинальной $f_{ном}$, но не больше чем на ±2 %, то измеренные значения U_x, $P_{мех}$, $P_{ст}$ подлежат пересчету по формулам

$$U'_x = U_x \frac{f_{ном}}{f}; \qquad P'_{мех} = P_{мех}\left(\frac{f_н}{f}\right)^2;$$

$$P'_{ст} = P_{ст}\left(\frac{f_н}{f}\right),$$

где U'_x, $P'_{мех}$, $P'_{ст}$ — расчетные значения при номинальной частоте.

Допускается производить пересчет по приближенным формулам

$$U'_x = U_x(1 - \Delta f); \qquad P'_{мех} = P_{мех}(1 - \Delta f);$$

$$P'_{ст} = P_{ст}(1 - 1{,}5\Delta f),$$

где Δf — относительное отклонение частоты от номинального значения с учетом его знака,

$$\Delta f = \frac{f - f_н}{f_н}.$$

Ток холостого хода не нормируется.

Увеличение тока холостого хода по сравнению с каталожным значением может быть следствием увеличения воздушного зазора.

2. Характеристика короткого замыкания представляет собой зависимость тока статора $I_к$, потребляемой мощности $P_к$, коэффициента мощности $\cos\varphi_к$ и пускового момента $M_п$ от напряжения статора $U_к$ при заторможенном роторе

$$I_к = f(U_к); \quad P_к = f(U_к); \quad \cos\varphi_к = f(U_к);$$

$$M_п = f(U_к) \text{ при } n = 0 \text{ и } f_н = \text{const}.$$

Характеристику короткого замыкания снимают для двигателей мощностью до 100 кВт при токе $I_к = (3 \div 7)\, I_н$ и для двигателей выше 100 кВт при $I_к = (2{,}5 \div 4)\, I_н$. При снятии характеристики короткого замыкания питание обмотки статора производится регулируемым напряжением переменного тока номинальной частоты. На основании данных опыта производят графическое построение характеристик короткого замыкания. Примерные характерис-

тики приведены на рис. 7-49. Начальный пусковой ток $I_п$ определяется из характеристики $I_к=f(U_к)$ экстраполяцией до номинального напряжения статора $U_н$. Для этого на графике проводят касательную к точке, соответствующей наибольшему измеренному току, до пересечения с осью абсцисс и определяют напряжения $\Delta U_к$.

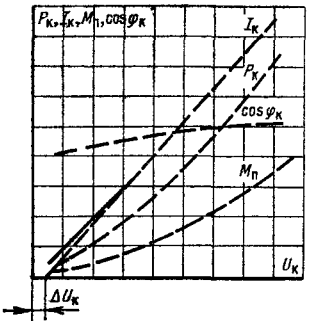


Рис. 7-49. Характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя.

Значение начального пускового тока

$$I_п = \frac{U_н - \Delta U_к}{U_к - \Delta U_к} I_к,$$

где $I_к$ — наибольшее измеренное значение потребляемого тока, А; $U_к$ — напряжение, соответствующее $I_к$, В.

Начальный пусковой момент двигателя мощностью до 100 кВт определяют, пользуясь уравновешенным рычагом, прикрепленным к валу двигателя и воздействующим на динамометр. При измерениях определяют усилия по динамометру F, длину рычага L, м, и ток статора $I_к$.

Пусковой момент, Н·м,

$$M_п = \frac{FL}{9{,}81}\left(\frac{I_п}{I_к}\right)^2 \text{ при } F \text{ в килограмм-силах;}$$

$$M_п = FL\left(\frac{I_п}{I_к}\right)^2 \text{ при } F \text{ в ньютонах.}$$

При определении пускового момента двигателя с фазным ротором в цепь обмотки ротора должно быть включено полное пусковое сопротивление.

Для двигателей мощностью выше 100 кВт пусковой момент, Н·м, определяют расчетным путем

$$M_п = 9550\frac{P_{к,м2,н}}{n_с},$$

где $P_{к,м2,н}$ — потери в обмотке ротора при номинальном напряжении, кВт; $n_с$ — синхроиная частота вращения, об/мин.

Предварительно определяют потери в обмотке ротора $P_{к,м2}$ по данным опыта

$$P_{к,м2} = P_к - P_{к,м1} - P_{ст},$$

где $P_к$ — потребляемая мощность, кВт; $P_{ст}$ — потери в стали, кВт, при напряжении $U_к$ (определяются по характеристике холостого хода § 7-19, п. 1).

Потери в обмотке статора

$$P_{к,м1} = \frac{3I_к^2 R_ф}{1000},$$

где $I_к$ — фазный ток, А; $R_ф$ — сопротивление одной фазы статора, Ом.

Потери в обмотке ротора при номинальном значении напряжения

$$P_{к,м2,н} = P_{к,м2}\left(\frac{I_н}{I_к}\right)^2.$$

При приемо-сдаточных испытаниях на объекте пусковой ток электродвигателя можно определить при питании двух фаз обмотки статора однофазным током. Измерения проводятся при поочередном включении каждой пары фаз обмотки статора. Для двигателей с фазным ротором подводимое напряжение не должно превышать 50—60 % номинального.

Пусковой ток

$$I_п = \frac{2I_к U_н}{\sqrt{3}U_к} k,$$

где $I_к$ — среднее значение тока трех измерений, А; $U_к$ — среднее значение напряжения трех измерений, В; k — коэффициент, учитывающий насыщение зубцов (при напряжении ниже номинального $k=1{,}3\div1{,}5$; если напряжение близко к номинальному, $k=1$).

По ГОСТ 183-74 допустимые отклонения пускового тока и момента относительно данных каталога составляют: начальный пусковой момент —15 %, начальный пусковой ток +20 %.

3. **Рабочие характеристики** представляют собой зависимость потребляемой мощности P_1, тока статора I, коэффициента мощности $\cos\varphi$, скольжения s, к. п. д. η и вращающего момента M от полезной мощности на валу двигателя P_2 при номинальных значениях напряжения и частоты питающей сети

$$P_1 = f(P_2); \quad I = f(P_2); \quad \cos\varphi = f(P_2);$$
$$s = f(P_2); \quad \eta = f(P_2);$$
$$M = f(P_2) \text{ при } U_н = \text{const}; \quad f_н = \text{const}.$$

Рабочие характеристики (рис. 7-50) снимают по схеме рис. 7-47 после предварительного прогрева двигателя. Первый отсчет производят при допустимой перегрузке (не менее 110 % номинального тока), и затем, снижая нагрузку, производят пять-шесть отсчетов. При измерениях определяют следующие параметры:

среднее значение линейного напряжения

$$U = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3};$$

среднее значение линейного тока

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3};$$

потребляемую мощность P_1.

Скольжение измеряют одним из методов: стробоскопическим, с помощью индуктивной

катушки, методом амперметра постоянного тока (для двигателей с фазным ротором).

Для построения рабочих характеристик производят вычисления на основании данных опыта.

Коэффициент мощности определяют по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI}.$$

Коэффициент полезного действия двигателя определяют косвенно методом отдельных потерь.

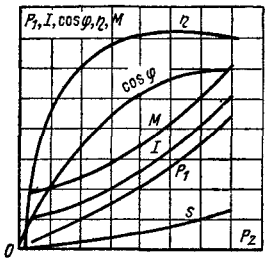


Рис. 7-50. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Потери в обмотке статора, Вт, определяют по формулам:

при соединении фаз в звезду $P_{м1}=3I^2R_ф$;

при соединении фаз в треугольник $P_{м1}=I^2R_ф$.

Потери в стали электродвигателя $P_{ст}$ и механические потери $P_{мех}$ определяют из характеристики холостого хода (см. § 7-20, п. 1).

Потери в обмотке ротора

$$P_{м2} = \frac{P_{эм}\, s\%}{100},$$

где s — скольжение, %; $P_{эм}$ — электромагнитная мощность, передаваемая ротору,

$$P_{эм} = P_1 - (P_{м1} + P_{ст}).$$

Добавочные потери принимаются 0,5 % потребляемой мощности P_1 при номинальной мощности (на валу) двигателя P_2.

При мощности, отличающейся от номинальной, добавочные потери

$$P_{доб} = 0{,}005\, P_1 \left(\frac{I_н}{I}\right)^2.$$

Мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - (P_{м1} + P_{м2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб});$$

к. п. д. электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}\,100\%.$$

Допустимые отклонения полученных значений по сравнению с данными каталога составляют:

к. п. д. для машин мощностью до 50 кВт $0{,}15(1-\eta)$;

к. п. д. для машин мощностью выше 50 кВт $0{,}10(1-\eta)$;

коэффициент мощности

$$\frac{1-\cos\varphi}{6}$$

(но не менее 0,02 и не более 0,07 по абсолютному значению);

скольжение ±20 %.

4. Коэффициент трансформации асинхронных двигателей с фазным ротором K представляет собой отношение среднего значения фазного или линейного напряжения обмотки статора U_1 к среднему значению соответствующего напряжения ротора U_2, $K=U_1/U_2$.

Измерения производят между всеми тремя фазами обмотки статора и между тремя кольцами разомкнутого неподвижного ротора.

Для двигателей с номинальным напряжением до 660 В питание статора производится номинальным напряжением, а для двигателей с номинальным напряжением выше 660 В — пониженным напряжением.

Во время опытов проверяют симметрию фаз обмотки статора и ротора. Разность между отдельными измерениями не должна превышать 1 %. Для более точного определения K дополнительно производят питание ротора пониженным напряжением при разомкнутой обмотке статора и измеряют напряжение ротора и статора.

Коэффициент трансформации определяется как среднеарифметическое обоих измерений.

5. Проверка симметричности обмотки короткозамкнутого ротора осуществляется следующим образом. Обмотку статора двигателя подключают к трехфазному источнику пониженного напряжения, чтобы не вызвать перегрева двигателя при неподвижном роторе. Затем медленно поворачивают ротор и наблюдают за показаниями амперметров цепи статора. При исправной обмотке ротора ток в цепи статора остается неизменным. В противном случае показания амперметров поочередно меняются. Колебания стрелок амперметров при этом тем больше, чем больше неисправность ротора.

У двигателей с двойной короткозамкнутой обмоткой ротора проверка симметричности обмотки ротора производится при работе двигателя под нагрузкой. Если неисправна нижняя обмотка, стрелки амперметров в цепи статора колеблются с удвоенной частотой скольжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

7-1. СНиП III-33-76. Правила производства и приемки работ. Электротехнические устройства. — М.: Стройиздат, 1977.—220 с.

7-2. **Гемке Р. Г.** Неисправности электрических машин — Л.: Энергия, 1975.—271 с.

7-3. **Правила** устройства электроустановок, ПУЭ-76, гл. 1-8. Объем и нормы приемосдаточных испытаний электрооборудования. 5-е изд. — М.: Атомиздат, 1977.—56 с.

7-4. **Жерве Г .К.** Промышленные испытания электрических машин. — Л.: Энергия, 1968.—575 с.

7-5. **Лифшиц П. С.** Скользящий контакт электрических машин. — М.: Энергия, 1974.— 272 с.

7-6. **Каминский М. Л.** Проверка и испытание электрических машин. — М.: Энергия, 1977.—104 с.

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

8-1. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

При наладке магнитного усилителя (МУ) выполняют следующие операции:

1) измерение сопротивления изоляции между обмотками и по отношению к магнитопроводу усилителя;

2) измерение сопротивления обмоток усилителя постоянному току;

3) определение полярности выводов обмоток;

4) определение соотношения числа витков обмоток;

5) проверка диодов схемы усилителя;

6) снятие характеристики управления усилителя;

7) измерение постоянной времени усилителя.

Операции по пп. 1—3 выполняют методами, применяемыми для наладки электрических машин постоянного тока. Диоды проверяют, как указано в разд. 11.

Определение соотношения числа витков обмоток управления производится измерением э. д. с., трансформируемой в обмотки при подаче на одну из рабочих обмоток (РО) пониженного напряжения переменного тока. При этом выполняются соотношения

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{w_1}{w_2};\quad \frac{E_2}{E_3}=\frac{w_2}{w_3}\text{ и т. д.}$$

Снятие характеристик управления МУ. Для проверки исправности МУ снимают «номинальную» характеристику, которую сравнивают с паспортной характеристикой МУ. При этом необходимо обеспечить номинальное напряжение питания рабочей обмотки и номинальное сопротивление нагрузки усилителя. Обмотки управления (ОУ), кроме той, в которую подается ток управления, размыкают. Характеристика снимается для двух направлений тока управления.

Если характеристика существенно отличается от приведенной в паспорте усилителя, необходимо проверить отсутствие короткозамкнутых витков в рабочих и управляющих обмотках. Для усилителей, состоящих из двух сердечников, на одну из рабочих обмоток подают переменное напряжение 5—10 В. В исправном усилителе э. д. с. во второй рабочей обмотке (трансформируемая полями рассеяния) не превышает 1 % подаваемого напряжения. При наличии короткозамкнутых витков э. д. с. будет существенно больше.

Короткозамкнутые витки в РО выявляют встречно-параллельным включением рабочих обмоток на пониженное напряжение питания. При наличии короткозамкнутых витков в рабочих обмотках в обмотке управления появляется э. д. с., превышающая 1 % подводимого напряжения.

Для измерений необходимо применять вольтметр с большим входным сопротивлением.

Существенным недостатком характеристики МУ является наличие релейного скачка при переходе характеристики через нуль тока управления. Скачок рабочего тока не должен превышать $I_н/K_i$, где K_i — кратность рабочего тока.

Для уменьшения релейного скачка характеристик применяют следующие меры:

1) при увеличенном сопротивлении нагрузки усилителя (более чем в 2—3 раза) шунтируют выход усилителя резистором;

2) снижают сопротивление цепи управления;

3) вместо операции по п. 2 применяют шунтирование обмотки управления емкостью. Емкость обратно пропорциональна числу витков ОУ.

Реальная характеристика управления магнитного усилителя снимается при всех обмотках, замкнутых на сопротивления схемы. Ток управления подается в одну из обмоток (обычно обмотку задания). Начальный ток выставляется обмоткой смещения в соответствии с требованиями САР. Как правило, эта величина выбирается в начале линейной части характеристики нереверсивного усилителя. Для реверсивных усилителей начальный ток устанавливается в середине линейной части характеристики усилителя, что позволяет получить линейную характеристику с максимальным коэффициентом усиления по току. Для снижения влияния колебаний питающего напряжения на характеристику МУ обмотку смещения питают от источника, общего с рабочими обмотками.

Измерение постоянной времени производится по переходной характеристике тока нагрузки при скачкообразном изменении тока в обмотке управления. Магнитный усилитель имеет следующую передаточную функцию:

$$H(p)=\frac{ke^{-p\tau}}{pT_{о,упр}+1},$$

где $\tau=1/2f$; $T_{о,упр}$ — постоянная времени обмотки управления; k — статический коэффициент усиления.

Постоянная времени усилителя определяется обработкой осциллограммы изменения рабочего тока усилителя, на которой должна также быть кривая изменения тока в обмотке управления. Постоянная времени равна вре-

мени от начала изменения тока в ОУ до момента достижения 63 % установившегося значения тока нагрузки. Для получения качественной осциллограммы ток нагрузки следует записывать через фильтр.

Для снижения постоянной времени в цепь ОУ вводят дополнительные резисторы, сопротивление которых не должно превышать значения, необходимого для получения наименьшей возможной постоянной времени $T_{о.упр}$, равной 1—0,5 периода питающей сети. Тот же эффект может быть получен применением гибкой положительной обратной связи. Уменьшение быстродействия усилителя достигается шунтированием обмоток управления или применением гибкой отрицательной связи, охватывающей усилитель.

Применение магнитных усилителей в качестве регуляторов систем автоматического регулирования (САР). Магнитные усилители применяют для САР с невысокими требованиями к коэффициенту усиления и быстродействию. Наиболее сложным является выбор фильтра на выходе усилителя и фильтров сигналов обратной связи. Значение постоянной времени фильтра на выходе МУ определяется допустимым уровнем пульсаций элемента САР, на вход которого подается напряжение выхода МУ. Полосовой *LC*-фильтр может быть выбран по формуле

$$L = \frac{R_{нагр}}{\omega_c}; \quad C = \frac{1}{\omega_c R_{нагр}},$$

где $R_{нагр}$ — нагрузка усилителя; ω_c — частота напряжения питания усилителя.

По этим же формулам можно ориентировочно выбрать фильтр сигнала обратной связи на входе магнитного усилителя.

Более детально вопросы наладки МУ изложены в [8-1].

8-2. СЕЛЬСИНЫ

Общие испытания: а) проверка сопротивления изоляции токоведущих цепей и обмоток сельсина относительно корпуса и относительно друг друга производится с помощью мегаомметра напряжением 100 В для сельсинов напряжением до 60 В и мегаомметра напряжением 500 В для сельсинов напряжением более 60 В. В нормальных климатических условиях (температура окружающего воздуха 25±10 °С, относительная влажность воздуха 65±15 %, атмосферное давление 867—1067 гПа) в нерабочем состоянии сельсина сопротивление его изоляции должно быть не менее 20 МОм;

б) проверка сопротивления обмоток постоянному току производится мостом постоянного тока или амперметром и вольтметром. Погрешность измерений не должна быть больше 1 %;

в) проверка значения потребляемого тока (потребляемой мощности) производится:

для сельсинов-датчиков и сельсинов-приемников — по схеме рис. 8-1 при номинальном напряжении питания;

для сельсинов-датчиков дифференциальных и сельсинов-приемников дифференциальных по схеме рис. 8-2 при максимальном значении напряжения синхронизации;

для сельсинов-приемников трансформаторных по схеме рис. 8-3 при максимальном значении напряжения синхронизации. Входное сопротивление вольтметра должно быть не менее 2000 Ом/В. Амперметр и вольтметр должны быть класса не ниже 1,5;

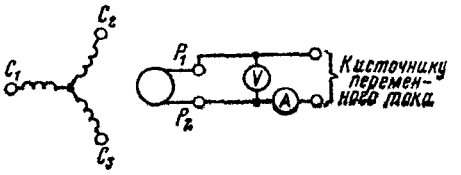


Рис. 8-1. Определение потребляемого тока для сельсинов-датчиков и сельсинов-приемников.

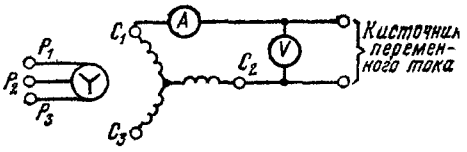


Рис. 8-2. Определение потребляемого тока для дифференциальных сельсинов-датчиков и приемников.

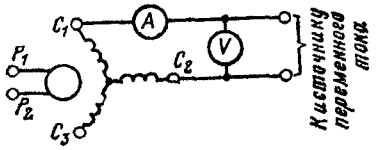


Рис. 8-3. Определение потребляемого тока для сельсинов-приемников трансформаторных.

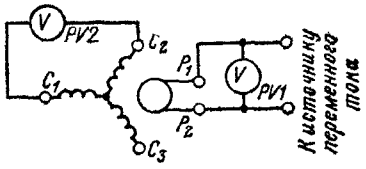


Рис. 8-4. Определение максимальных значений напряжения синхронизации.

г) проверка максимального значения напряжения синхронизации производится по схеме рис. 8-4. На однофазную обмотку подается напряжение, равное номинальному напряжению питания для сельсинов-датчиков и сельсинов-приемников, и максимальному вторичному напряжению для сельсинов-приемников трансформаторных. Измерение напряжения синхронизации производится вольтметром с входным сопротивлением не менее 2000 Ом/В. Ротор сельсина поворачивают до максимального отклонения стрелки вольтметра *PV2*. Затем ротор сельсина поворачивают на 180° и повторно измеряют максимальное значение напряжения синхронизации. Таким же способом

определяют напряжения для выводов C_2-C_3 и C_1-C_3 вторичной обмотки.

У дифференциальных сельсинов проверяется выходное напряжение на выводах P_1-P_2, P_2-P_3, P_3-P_1 трехфазной обмотки при поочередной подаче напряжения, равного максимальному напряжению синхронизации; на выводах C_1-C_2, C_2-C_3 и C_3-C_1 другой трехфазной обмотки.

Специальные испытания производятся с применением угломерного устройства, позволяющего осуществлять поворот ротора сельсина на любой угол с погрешностью не более

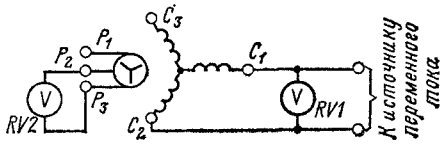


Рис. 8-5. Определение асимметрии нулевых точек и остаточных э. д. с. в нулевых точках для сельсинов-датчиков дифференциальных.

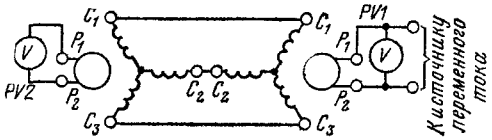


Рис. 8-6. Определение крутизны выходного напряжения сельсинов трансформаторных в системе датчик — приемник.

10 с для сельсинов классов 1—4 и не более 1 мин для сельсинов классов 5—7. К специальным исцытаниям относятся:

а) проверка асимметрии нулевых точек и остаточных напряжений в нулевых точках (производится по схеме рис. 8-5). На однофазную обмотку сельсина подается напряжение, равное номинальному напряжению питания для сельсинов-датчиков и максимальному вторичному напряжению для сельсинов-приемников трансформаторных. Поворотом ротора сельсина находится такое положение, при котором напряжение, измеряемое ламповым вольтметром *PV2* на выводах C_1-C_2 трехфазной обмотки, будет минимальным (остаточное напряжение). Показание на шкале угломерного устройства фиксируется как нулевое (первая нулевая точка). Далее ротор поворачивают примерно на 180° до такого положения, при котором показание *PV2* снова будет минимальным, и по угломеру фиксируется вторая нулевая точка. Вольтметр *PV2* подключается поочередно к выводам C_2-C_3 и C_3-C_1, и нулевые точки определяются аналогичным способом. В каждой нулевой точке по угломерной шкале отсчитывается отклонение от угла, кратного 60°. По показанию лампового вольтметра определяется остаточное напряжение. Класс точности лампового вольтметра должен быть не ниже 2,5. За асимметрию нулевых точек принимается полусумма абсолютных значений максимального положительного и максимального отрицательного отклонений угла. Асимметрия нулевых точек сельсинов-датчиков дифференциальных определяется аналогично при подаче максимального напряжения синхронизации поочередно на выводы первичной обмотки по схеме рис. 8-5;

б) проверка крутизны выходного напряжения сельсинов трансформаторных в системе датчик—приемник (производится по схеме рис. 8-6). Роторы сельсинов устанавливают в согласованное положение, ламповый вольтметр *PV2*, подключенный на зажимы выходной обмотки сельсина-приемника, показывает при этом минимальное напряжение. Затем ротор сельсина-приемника поворачивают на 5°, измеряют напряжение выходной обмотки. Класс точности лампового вольтметра должен быть не менее 2,5. Крутизна выходного напряжения определяется как отношение напряжения к углу поворота.

8-3. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

Качество переходных процессов в системах с обратной связью по частоте вращения двигателя в значительной степени зависит от выходных характеристик датчика частоты вращения.

В качестве датчика частоты вращения обычно используют тахогенераторы постоянного и переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока. При неизменном магнитном потоке возбуждения напряжение якоря генератора пропорционально частоте вращения. При постоянной частоте вращения напряжение тахогенератора содержит кроме среднего постоянного значения переменные составляющие различной частоты и амплитуды. Эти пульсации напряжения, усиливаемые элементами системы автоматического регулирования, снижают возможные при прочих равных условиях качественные показатели систем регулирования. При этом снижается коэффициент усиления системы регулирования, возникают дополнительные пульсации тока якоря приводного двигателя, ухудшаются условия коммутации двигателя.

По этим причинам в качестве тахогенераторов постоянного тока целесообразно применять специально сконструированные генераторы с более низким уровнем пульсаций. Широкое распространение в металлургическом электроприводе получили тахогенераторы постоянного тока серии ПТ, которые выполняются трех типоразмеров. Технические данные тахогенераторов приведены в табл. 8-1. Основным достоинством тахогенераторов серии ПТ является существенное снижение пульсаций выходного напряжения.

В кривой якорного напряжения могут быть выделены следующие основные пульсации:

а) зубцовые пульсации напряжения, возникающие в результате изменения магнитной проводимости зубцовой зоны при вращении якоря.

Частота зубцовых пульсаций

$$f_{зуб} = \frac{N_{я,зуб}\, n}{60},$$

где $N_{я,зуб}$ — число зубцов якоря; n — частота вращения якоря, об/мин;

Таблица 8-1

Технические данные тахогенераторов серии ПТ

Тип тахогенератора	Основные технические данные												
	P_2, кВт	U, В	I, А	n, об/мин	$i_В$, А	$U_В$, В	η, %	$r_Я$, Ом	$r_{д.п}$, Ом	$r_{ц.я}$, Ом	$r_ш$, Ом	$N_{я.зуб}$	$N_к$
ПТ-22/1*	0,115	230	0,5	2400	0,35	55	54,5	4,7	2,48	7,18	127	21	63
ПТ-22	0,046		0,2	1000	0,35		53,6	29,4	12,9	42,3			
ПТ-22	0,046		0,2	800	0,35		55,7	48,8	21,9	70,7			
ПТ-32/1	0,115		0,5	1200	0,5		61,0	4,8	2,56	7,36	94	23	69
	0,115		0,5	1000	0,5		64,2	7,37	4,22	11,59			
ПТ-32/1, ПТ-32	0,115		0,5	600	0,5		66,3	21,4	9,7	31,1			
ПТ-32/1	0,023		0,1	200	0,5		38,5	216	—	216			
ПТ-42	0,115		0,5	400	1,0		56,2	17,7	—	17,7	41,6	25	125
ПТ-42	0,0575		0,25	200	1,0		43,5	78,7	—	78,7			

* Цифра 1 в знаменателе определяет конструктивное исполнение для двигателей на подшипниках качения. Обозначения сопротивлений: $r_Я$ — якоря; $r_{д.п}$ — добавочного полюса; $r_{ц.я}$ — цепи якоря; $r_ш$ — обмотки возбуждения; $N_{я.зуб}$ — количество зубцов якоря; $N_к$ — количество коллекторных пластин.

б) полюсные пульсации напряжения, появляющиеся вследствие различия размеров и формы воздушного зазора под главными полюсами, а также изменения магнитной проводимости сердечника якоря в разных направлениях вдоль и поперек.

Полюсные пульсации содержат две гармоники $f_{р1}$ и $f_{р2}$, пропорциональные соответственно числу пар полюсов и числу полюсов:

$$f_{р1} = \frac{pn}{60}; \quad f_{р2} = \frac{2pn}{60},$$

где p — число пар полюсов магнитной системы.

Для всех тахогенераторов серии ПТ $p=2$.

В зависимости от конкретной реализации тахогенератора относительные уровни составляющих $f_{р1}$ и $f_{р2}$ могут изменяться для одного и того же типа тахогенераторов;

в) коллекторные пульсации напряжения, возникающие в результате периодического изменения числа секций в параллельных ветвях обмотки и вибрации щеток вследствие неровностей поверхности коллектора. Частота коллекторных пульсаций

$$f_к = \frac{N_к n}{60},$$

где $N_к$ — число коллекторных пластин.

Следует иметь в виду, что вибрации щеток могут являться источником пульсаций и других частот, в том числе существенно меньших $f_к$;

г) оборотные пульсации напряжения, появляющиеся в связи с неточностью сопряжения тахогенераторов с двигателем в результате эксцентриситета осей вращения двигателя и тахогенератора, а также наличия люфтов в элементах соединений. Низкочастотные оборотные пульсации напряжения создают наибольшие осложнения при наладке систем управления. Частота оборотных пульсаций

$$f_о = \frac{n}{60}.$$

Таблица 8-2

Частоты пульсаций напряжения тахогенераторов серии ПТ

Тип тахогенератора	Частота вращения n, об/мин	Основные частоты пульсаций напряжения, Гц			
		$f_о$	$f_р$	$f_{зуб}$	$f_к$
ПТ-22/1	2400	40	160	840	2520
ПТ-22	1000	16,7	67	350	1050
	800	13,4	53,5	280	840
ПТ-32/1	1200	20	80	460	1380
	1000	16,7	67	384	1150
ПТ-32/1, ПТ-32	600	10	40	230	690
ПТ-32/1	200	3,34	13,4	77	230
ПТ-42	400	6,68	26,8	167	835
	200	3,34	13,4	84	418

В табл. 8-2 приведены частоты основных пульсаций при номинальных частотах вращения тахогенераторов. При других частотах вращения частоты основных пульсаций напряжения изменяются пропорционально изменению частоты вращения тахогенератора.

В табл. 8-3 приведены уровни пульсаций напряжения тахогенераторов серии ПТ, полученные при наладке. Под уровнем пульсации подразумевается двойная амплитуда напряжения, отнесенная к среднему значению напряжения тахогенератора при данной частоте вращения.

Отклонения от линейности для тахогенераторов серии ПТ допускаются в пределах ±1 %.

Снижение пульсаций напряжения в значительной мере достигается за счет прецизионного сочленения тахогенератора с ведущим двигателем. Для обеспечения повышенных показателей, присущих тахогенераторам серии ПТ, необходимо обеспечить высокую точность обработки поверхностей двигателя, сопрягае-

Таблица 8-3

Уровни пульсаций напряжений тахогенераторов серии ПТ

Тип тахогенератора	Частота вращения, об/мин	Фактические пульсации напряжения, % среднего значения				Отклонение от линейности характеристики, %
		$f_о$	$f_р$	$f_{зуб}$	$f_к$	
ПТ-32	100	0,20	0,36	0,30	0,10	0,10
	300	0,15	0,32	0,40	0,15	0,376
	600	0,18	0,32	0,70	0,20	0,57
ПТ-32/1	300	0,08	0,43	0,54	0,25	0,11
	600	0,08	0,43	0,54	0,10	0,18
	1200	0,13	0,43	0,68	0,34	0,18
ПТ-42	100	0,16	0,36	0,60	0,32	0,10
	200	0,18	0,23	0,70	0,32	0,29
	400	0,20	0,20	0,70	0,34	0,29

мых с элементами пристраиваемого тахогенератора.

Тахогенераторы имеют два принципиально различных конструктивных исполнения. Тахогенераторы, предназначенные для сочленения с двигателем, вал которого вращается в подшипниках скольжения, выполняются на собственных подшипниках. Вал тахогенератора сочленяется с заточкой на валу двигателя. Свободно подвешенная на якоре магнитная система тахогенератора затормаживается с помощью специально предусмотренного кронштейна. Конструкция кронштейна должна исключать угловые колебания магнитной системы, одновременно обеспечивая возможность перемещения ее в осевом направлении до 5—8 мм, а в вертикальной плоскости до 0,5—1,0 мм. Для выполнения точного сопряжения тахогенератора с двигателем биение привалочной плоскости торца вала электродвигателя в радиусе 160 мм относительно оси вращения не должно быть больше 0,03 мм.

Тахогенераторы для двигателей с подшипниками качения выполняются с одним шарикоподшипником, устанавливаемым со стороны коллектора. Применяются фланцевые соединения якоря тахогенератора с валом двигателя и магнитной системы тахогенератора с подшипниковым щитом двигателя.

Наладка тахогенераторов постоянного тока производится аналогично наладке машин постоянного тока. Особое внимание обращается на качественное сочленение валов тахогенератора и двигателя, а также на надежную работу щеточного аппарата.

Влияние той или иной составляющей на динамику привода, и прежде всего на амплитуду колебания якорного тока, или частоты вращения привода, будет зависеть как от амплитуды пульсации, так и от соответствующей частотной характеристики системы регулирования привода.

Тахогенераторы переменного тока. Тахогенераторы переменного тока предназначены для применения в различных системах регулирования частоты вращения нереверсивных электроприводов.

Тахогенератор переменного тока представляет собой индукторную машину переменного тока, на статоре которой размещены два комплекта обмоток: кольцевая намагничивающая обмотка постоянного тока и трехфазная обмотка переменного тока. Ротор тахогенератора не имеет обмоток. Вращение ротора приводит к периодическому изменению магнитного потока, созданного обмоткой постоянного тока. При этом в трехфазной обмотке наводится электродвижущая сила. Трехфазное напряжение тахогенератора подается на выпрямитель непосредственно или через разделительный трансформатор с одной или несколькими группами вторичных обмоток (рис. 8-7). Выпрямленное напряжение пропорционально частоте вращения тахогенератора, частота пульсаций выпрямленного напряжения пропорциональна частоте вращения и числу зубцов ротора $N_{р.зуб}$. Благодаря высокой частоте пульсаций выпрямленное напряжение может быть сглажено с помощью фильтра с небольшой постоянной времени. Для уменьшения оборотных пульсаций применяется специальное подвесное исполнение. Статор удерживается от проворачивания вокруг оси с помощью упора. Фланец вала тахогенератора имеет центрирующий выступ и жестко крепится к полумуфте, насаженной на вал двигателя, или непосредственно к торцу вала двигателя.

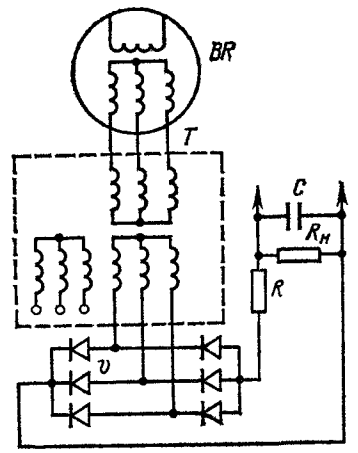


Рис. 8-7. Схема включения тахогенератора переменного тока.

BR — тахогенератор переменного тока; *T* — многообмоточный трансформатор; *V* — выпрямитель; *R*, $R_н$; *C* — элементы фильтра.

Основные технические данные тахогенераторов переменного тока приведены в табл. 8-4.

В соответствии с техническими условиями к тахогенераторам серии ТТ180 и ТТ245 предъявляют следующие основные требования:

а) обмотка возбуждения допускает длительное протекание номинального тока возбуждения, включая состояние, когда тахогенератор не вращается;

б) сопротивление изоляции обмоток тахогенератора относительно корпуса и между обмотками при нормальных климатических условиях должно быть в холодном состоянии не менее 10 МОм, в нагретом состоянии 1 МОм;

Таблица 8-4

Технические данные тахогенераторов переменного тока

Тип тахогенератора	Номинальная частота вращения, об/мин	Линейное напряжение, В	Номинальная мощность, Вт	Число периодов изменения напряжения на один оборот	Число фаз	Возбуждение		Обозначение
						Напряжение, В	Номинальный ток, А	
ТТ180-ППУ4	2000	200±20	25	14	3	60	0,6±0,06	1БХ.292.062
ТТ245-1П1У4	1000	200±20	22	46	6	60	0,5±0,08	1БХ.292.064
ТТ245-1П2У4	500	200±20	25	46	6	60	0,5±0,08	1БХ.292.064-01
ТТ245-2П2У4	200	200±20	25	46	6	60	0,5±0,08	1БХ.292.063

Примечания: 1. Шестифазная система выходного напряжения тахогенераторов серии ТТ245 образована двумя трехфазными системами напряжений, смещенными на 30° (электрических).

2. При частоте вращения n частота выходного напряжения, Гц, тахогенератора определяется по формуле $f = \frac{N_{р.\,зуб}\, n}{60}$.

в) сопротивления обмоток не должны отличаться больше чем на 2 %;

г) различия между линейными напряжениями одной трехфазной обмотки не должны превышать 1 %;

д) значения оборотных пульсаций выпрямленного напряжения тахогенератора не должны превышать:

0,15 % — при частоте вращения выше 500 об/мин;

0,2 % — при частоте вращения 500 об/мин и ниже;

е) размах пульсаций напряжений в трехфазной двухполупериодной схеме не должен превышать 20 %.

При наладке производится проверка изоляции обмоток тахогенератора мегаомметром напряжением 500 В. Зависимость линейного напряжения от тока возбуждения определяют при постоянной номинальной частоте вращения. По кривой намагничивания определяют ток возбуждения, при котором линейное напряжение достигает максимума; это значение тока возбуждения принимается как номинальное. Размах высокочастотных пульсаций выпрямленного напряжения определяется визуально по электронному осциллографу.

Некоторыми организациями разработаны специальные приставки к тахогенераторам переменного тока, которые реверсируют выпрямленное напряжение при изменении направления вращения. Благодаря этой приставке тахогенераторы переменного тока используются и для реверсивных приводов. Однако при глубоком регулировании частоты вращения начинает сказываться зона нечувствительности, присущая системе управления приставки. По этой причине для реверсивных приводов с глубоким диапазоном регулирования применять тахогенераторы переменного тока нецелесообразно.

8-4. УНИФИЦИРОВАННЫЕ БЛОЧНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛЯТОРОВ (УБСР)

Перед наладкой систем регулирования блоки УБСР должны пройти испытания на месте монтажа установки. В объем испытания входят: внешний осмотр, измерение сопротивления изоляции, испытание электрической прочности изоляции, проверка функционирования блоков. В ряде случаев тем же испытаниям подвергаются входящие в состав блоков ячейки.

Блоком здесь называется оформленный в виде конструктивной единицы узел системы регулирования, в который могут входить ячейки операционных усилителей, связи и другие ячейки, необходимые для построения данного функционального узла (блоки систем УБСР-А, АРХ и УБСР-АИ). Конструктивно оформленные в виде блоков операционные усилители, датчики тока, напряжения и другие модули УБСР называются ниже ячейками, а шкаф системы УБСР представляет собой блок, содержащий все функциональные узлы системы регулирования.

На крупных объектах с десятками и сотнями электроприводов целесообразно организовать предварительные испытания ячеек.

Проведение предварительных испытаний ячеек позволяет повысить производительность труда за счет более узкой специализации наладчика, испытывающего в этом случае ячейки одного или нескольких типов или блок с предварительно испытанными ячейками, привлечь к испытаниям ячеек и блоков большее число наладчиков и выполнить испытания в короткий срок, сосредоточив затем усилия на наладке систем регулирования и электроприводов в целом. При этом необходимо достаточное количество приспособлений и стендов, значительно превышающее потребности эксплуатации объекта, которое заказчик часто не может предоставить. Многие пусконаладочные организации располагают приспособлениями и стендами собственной конструкции и изготовления, использование которых наряду со стендами заводского изготовления, предоставляемыми заказчиком, позволяет организовать на крупных объектах предварительное испытание ячеек.

Если предварительные испытания ячеек не производятся, то возникает необходимость в испытаниях в процессе отыскания неисправно-

стей и после ремонта ячеек, отбракованных при испытаниях блоков.

В разделе дан общий подход к испытаниям основных ячеек различных унифицированных блочных систем регулирования и блоков этих систем.

Технические особенности системы УБСР-АИ. Комплектные тиристорные электроприводы (КТЭ), выпускаемые ЗПО «Преобразователь», оснащены аппаратурой регулирования, представляющей собой модификацию системы УБСР-АИ на основе аналоговых интегральных микросхем. Основными преимуществами этой системы являются большее быстродействие ячеек, их простота и малые габариты, резкое сокращение числа элементов и паек и связанное с этим повышение надежности работы.

В состав КТЭ входят ячейки операционных усилителей ЯР5 и ЯР6, связи ЯР2, датчиков тока и напряжения ЯДТ, задатчика интенсивности ЯР3, фазочувствительного выпрямителя ЯР4, множительно-делительного устройства ЯР9, выделения модуля ЯР10, функционального преобразователя ЯР8, фильтров ЯР1 и др.

Составной частью многих ячеек служит интегральный элемент ЭИ1 (рис. 8-8), включающий операционный усилитель *Э* типа К1УТ402А, цепи коррекции и защиты. Используется также модификация ЭИ2 без элементов защиты от к. з. на выходе.

Из ячеек компонуют блоки регулирования БР1, БР2, БР3 и др. Кроме того, в систему входят блоки питания регуляторов БПР, блоки датчиков БД, ББД и др.

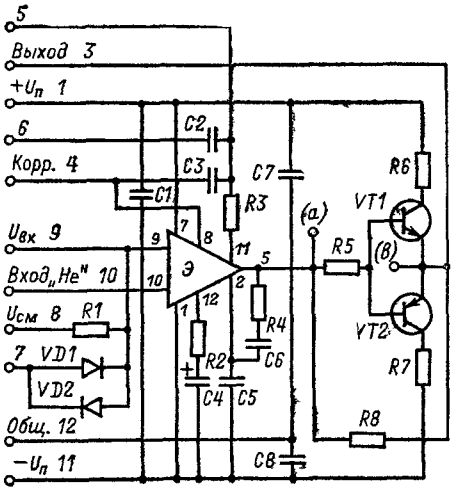


Рис. 8-8. Элементы интегральные ЭИ1 и ЭИ2.

ЯЧЕЙКИ

Ячейка фильтров ЯР1. Схема ячейки приведена на рис. 8-9. Ячейка представляет собой набор конденсаторов по 1 мкФ, которые могут быть использованы при построении *RC*-

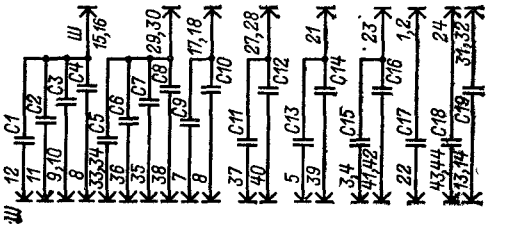


Рис. 8-9. Ячейка фильтров ЯР1.

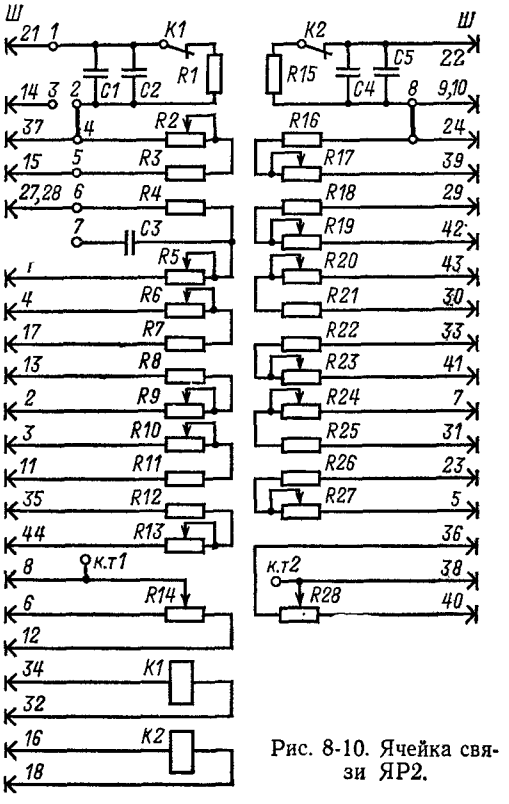


Рис. 8-10. Ячейка связи ЯР2.

фильтров, в качестве дополнительных емкостей в решающих цепях операционных усилителей-регуляторов и т. д. Необходимая емкость набирается с помощью перемычек между контактами разъема путем параллельного и последовательного соединения конденсаторов.

Заводское обозначение	Маркировка элемента интегрального	Конструктивное исполнение	Позиционное обозначение						Перемычка (а)—(в)
			R5	*R6*	*R7*	*R8*	*VT1*	*VT2*	
5ЕИ.577.251	ЭИ2	Без защиты	—	—	—	—	—	—	Имеется
5ЕИ.577.251-01	ЭИ1	С включением защиты	1	1	1	1	1	1	Нет

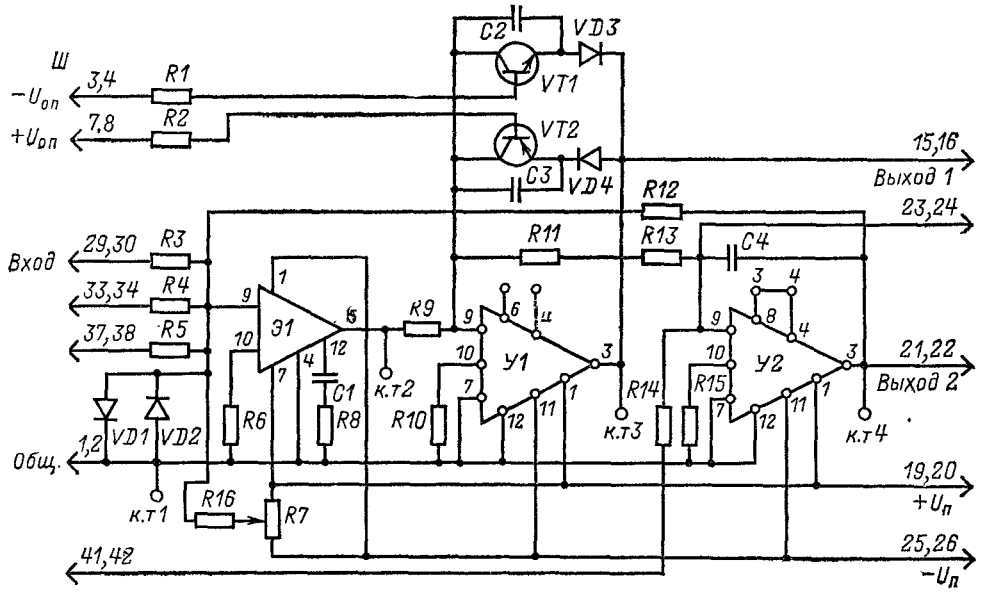


Рис. 8-11. Ячейка задатчика интенсивности ЯР3.

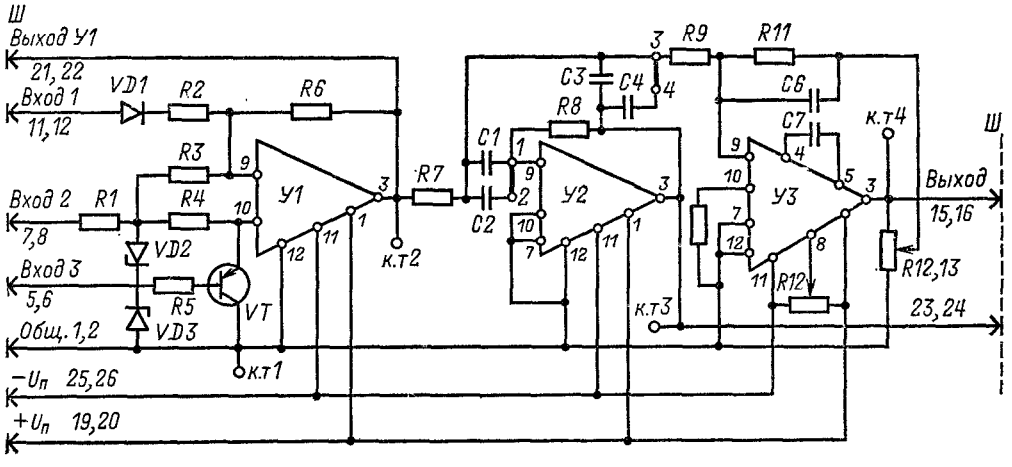


Рис. 8-12. Ячейка фазочувствительного выпрямителя ЯР4.

В варианте ЯР1А все конденсаторы соединены параллельно, образуя емкость 19 мкФ.

Ячейка связи ЯР2. Схема ячейки приведена на рис. 8-10. Ячейка содержит элементы решающих цепей для двух регуляторов в виде *R*- и *RC*-цепочек. Каждая резистивная цепь содержит переменный резистор 47 кОм, включенный последовательно с резистором 10 кОм или 100 кОм. В *RC*-цепях предусмотрено шунтирование конденсаторов *C1*, *C2* и *C4*, *C5* (по 1 мкФ) резисторами через контакты реле *K1* и *K2*. Ячейка содержит также два потенциометра 10 кОм.

Ячейка задатчика интенсивности ЯР3. Схема ячейки приведена на рис. 8-11. Задатчик интенсивности выполнен по схеме интегрозадающего устройства, которая обеспечивает возможность получения больших интервалов времени при высокой линейности отработки. Ячейка содержит инвертирующий усилитель с релейной характеристикой *Э1*, пропорциональный усилитель *У1* с узлом ограничения на транзисторах *VT1*, *VT2* и интегрирующий усилитель *У2*. Выход усилителя, являющийся выходом ячейки, через резистор обратной связи *R12* соединен со входом *Э1*. Узел ограничения предназначен для плавной регулировки времени отработки путем изменения входного напряжения интегратора, причем темп нарастания напряжения выхода задатчика интенсивности (темп разгона привода) может устанавливаться независимо от темпа снижения напряжения (темп торможения). Для этого опорные напряжения $-U_{оп}$ и $+U_{оп}$ на базах транзисторов *VT1*, *VT2* устанавливают неравными. В качестве источника опорных напряжений может быть использован блок питания регуляторов.

Технические данные ячейки

Входное напряжение, В	±10
Входное сопротивление (*R3*, *R4* или *R5*), кОм	27
Выходное напряжение, В	±10
Высокочастотные пульсации выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ	⩽50
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Время отработки, с	0,5—120
Коэффициент передачи по напряжению	1,0±0,025
Отклонение от линейности, %	±5
Напряжение питания, В	±12,6
Потребление от источника питания, мА	⩽50

Ячейка фазочувствительного выпрямителя ЯР4. Схема ячейки приведена на рис. 8-12. Усилитель *У1* выполняет роль амплитудного фазочувствительного синхронного детектора, транзистор *VT* служит коммутатором. В открытом положении транзистора (половину периода входного сигнала) усилитель *У1* работает как инвертор с единичным коэффициентом передачи. Когда транзистор закрыт (другую половину периода), *У1* работает как повторитель напряжения с единичным коэффициентом передачи. Полярность выходного сигнала определяется соотношением фаз входного (вход *2*) и коммутирующего (вход *3*) напряжений. Вход *1* предназначен для смещения нуля усилителя *У1*, причем смещение рекомендуется подавать через внешний потенциометр от источника коммутирующего напряжения.

Усилитель *У2* служит фильтром, а усилитель *У3* осуществляет масштабное преобразование напряжения выхода.

Технические данные ячейки

Максимальное входное напряжение, В	~10
Частота входного сигнала, Гц	50, 400, 100
Входное сопротивление, кОм	5
Выходное напряжение, В	±10
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Коэффициент передачи по напряжению	1,25±2,5%
Пульсация выходного напряжения на несущей частоте (двойная амплитуда), мВ	⩽50
Постоянная времени, мс:	
на частоте 50 Гц	150
на частоте 400, 1000 Гц	20
Напряжение питания, В	±12,6
Потребление от источника питания, мА	⩽50
Коммутирующее напряжение, В	12
Потребление от источника коммутирующего напряжения, мА	⩽2

Ячейка операционных усилителей ЯР5. Схема ячейки приведена на рис. 8-13. Ячейка содержит два интегральных элемента *У1*, *У2* с набором резисторов (по 10 и 100 кОм) для построения решающих цепей. Каждый интегральный элемент снабжен потенциометром установки нуля. Узел регулируемого ограничения на транзисторах *VT1*, *VT2* может быть подключен с помощью внешних перемычек к любому из интегральных элементов. Цепочки из стабилитронов *VD3*, *VD4* или диодов *VD5*, *VD6* могут быть использованы для нерегулируемого ограничения напряжения выхода любого усилителя. Конденсаторы *C3*, *C4* уменьшают влияние помех по выходным цепям усилителей, однако они сужают полосу пропускания и при необходимости могут быть отключены снятием соответствующих перемычек. Дальнейшее расширение полосы пропускания

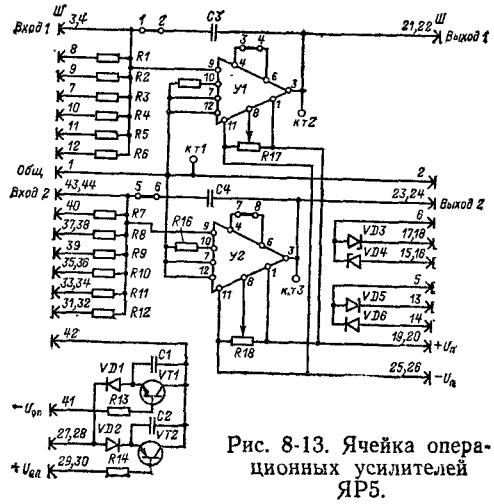


Рис. 8-13. Ячейка операционных усилителей ЯР5.

усилителей может быть достигнуто снятием перемычек *3*, *4* и *7*, *8* в цепях коррекции при условии сохранения устойчивости работы в конкретной схеме применения.

Технические данные ячейки

Напряжение питания, В	±12,6
Номинальное выходное напряжение, В	±10
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Потребление от источника питания, мА	⩽30
Диапазон регулируемого ограничения выходного напряжения, В	±(1,5÷10)
Полоса пропускания при единичном коэффициенте передачи и полном сигнале, кГц	5
Температурный дрейф, приведенный ко входу, мкВ/°С	20
Высокочастотная пульсация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ	⩽50

Ячейка операционных усилителей ЯР6. Схема ячейки приведена на рис. 8-14. Ячейка во многом аналогична ячейке *ЯР5*, однако снабжена дополнительно интегральными элементами *У3* и *У4* типа ЭИ3. Полевые транзисторы *VT3* этих элементов, включенные в цепи обратной связи операционных усилителей, представляют собой ключевые элементы, нор-

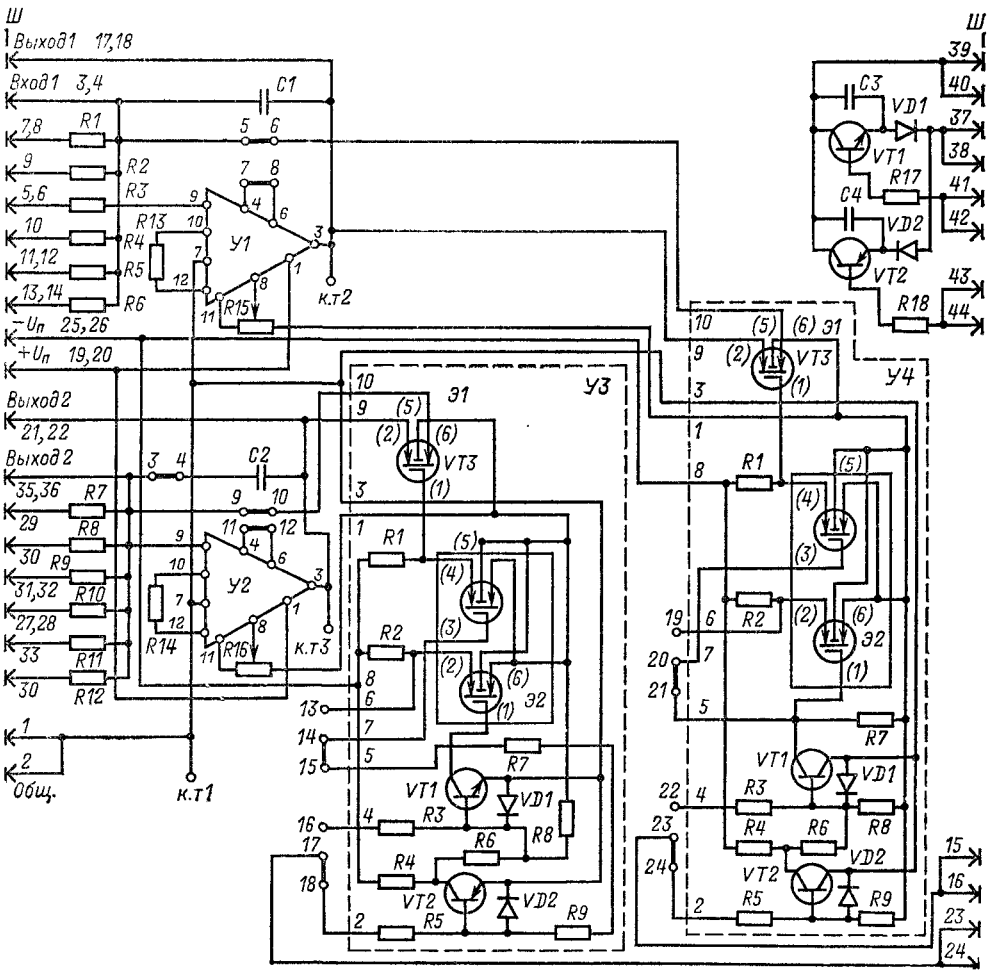


Рис. 8-14. Ячейка операционных усилителей ЯР6.

мально разомкнутые при установке перемычек *13, 14* (*19, 20*) или замкнутые при установке перемычек *14, 15* (*20, 21*). При установке перемычек *16, 17* (*22, 23*) ключи управляются сигналами положительной полярности, а при установке перемычек *17, 18* (*23, 24*) — отрицательной полярности напряжением 5—12 В. Ток управления не превышает 1 мА, частота переключений не менее 2 кГц. Сопротивление ключа в замкнутом состоянии не более 400 Ом, в разомкнутом — не менее 80 МОм. Остальные технические данные такие же, как у ячейки *ЯР5*.

Ячейка датчика тока ЯДТ. Схема ячейки приведена на рис. 8-15. Ячейка состоит из измерительного устройства, выполненного по дифференциальной схеме на трансформаторах *Т1, Т2*, и масштабного усилителя *Э4*. На первичные обмотки трансформаторов поступает напряжение питания 12 В частотой 12 кГц. Входной сигнал складывается с выпрямленным напряжением вторичных обмоток (выпрямитель *Э1*), причем ток вторичной обмотки одного из трансформаторов в зависимости от полярности входного сигнала возрастает, а другой — уменьшается. Изменение входного сигнала приводит к изменению напряжений на выходных обмотках трансформаторов, которые выпрямляются диодными мостами (микросхемы *Э2, Э3*) и с противоположной полярностью подаются на вход усилителя *Э4*. На входе усилителя включен фильтр, сглаживающий выбросы напряжения выхода измерительного устройства; коэффициент усиления регулируется с помощью резистора *R12*.

Технические данные ячейки

Напряжение питания, В	±12,6
Выходное напряжение, В	±10
Входное напряжение, мВ	±75
Входное сопротивление, Ом	5
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Уровень пульсаций напряжения выхода, мВ	⩽100
Постоянная времени, мс	0,3
Температурный дрейф напряжения выхода, мВ/°С	0,5

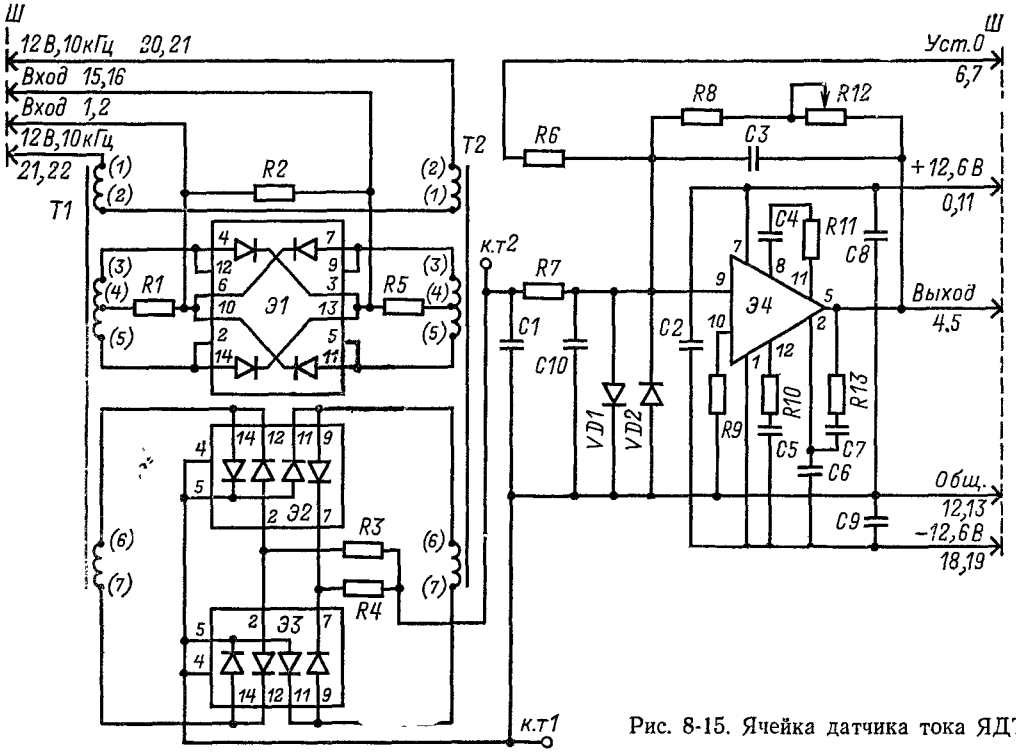


Рис. 8-15. Ячейка датчика тока ЯДТ.

На вход датчика тока обычно подают напряжение с измерительного шунта.

Для построения датчика напряжения ячейку ЯДТ используют с внешним делителем напряжения.

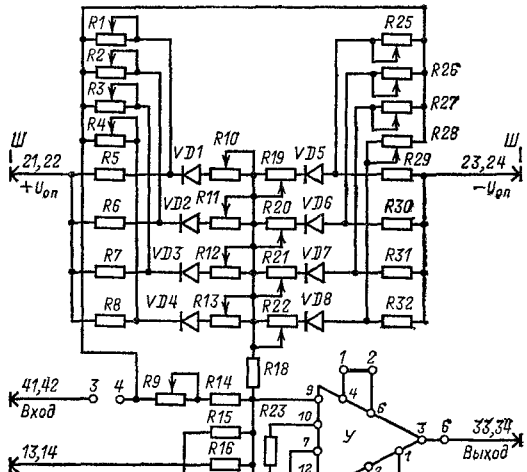


Рис. 8-16. Ячейка преобразователя функционального ЯР8.

Ячейка преобразователя функционального ЯР8. Схема ячейки приведена на рис. 8-16. Ячейка состоит из двух одноквадратных регулируемых диодных преобразователей, которые в сочетании с усилителем *У* позволяют получить необходимую нелинейную зависимость. Например, при включении диодных преобразователей в цепь обратной связи усилителя можно получить функции

$$U_{\text{вых}} = \pm K\sqrt{U_{\text{вх}}},$$

где K — коэффициент пропорциональности;

$$U_{\text{вых}} = \pm U_{\text{вых,нач}} \sin\left(\frac{\pi}{2}\,\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх,нач}}}\right);$$

$$U_{\text{вых}} = \pm U_{\text{вых,нач}}\left(1 - e^{-\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх,нач}}}}\right),$$

а при включении их во входную цепь

$$U_{\text{вых}} = \pm KU_{\text{вх}}^2 + U_{\text{вых,нач}};$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых,нач}} \cos\left(\frac{\pi}{2}\,\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх,нач}}}\right),$$

где $U_{\text{вх,нач}}$ и $U_{\text{вых,нач}}$ — начальные условия, устанавливаемые с помощью потенциометра смещения *R33*. Резисторы *R10—R13*, *R19—R22* шунтируют по мере роста входного сигнала резисторы *R9* и *R14*, включаемые в зависимости от необходимой функции в цепь обратной связи или во входную цепь усилителя. При этом ступенчато изменяется коэффициент усиления, обеспечивая аппроксимацию функции отрезками ломаной линии. Точки сопряжения отрезков устанавливаются резисторами *R1—R4*, *R25—R28*.

Технические данные ячейки

Напряжение питания, В	±12,6
Входное напряжение, В	±10
Выходное напряжение, В	±10
Входное сопротивление, кОм	⩾2
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Высокочастотные пульсации выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ	⩽50
Погрешность преобразования, %	±2,5
Постоянная времени, мкс	⩽150

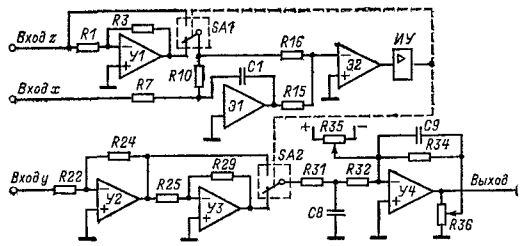


Рис. 8-17. Ячейка множительно-делительного устройства ЯР9.

Ячейка множительно-делительного устройства ЯР9. Структурная схема ячейки приведена на рис. 8-17. На входы устройства могут быть поданы три переменные x, y, z (причем $U_{вых}=-\left(\frac{kxy}{z}\right)$, или переменные x, y или x, z (k — коэффициент пропорциональности).

Маркировка ячеек	Обозначение	Включение диодов	Примечание
ЯР10	5ЕИ 577 248	VD1 ▷ ◁ VD2	Выход отрицательный
ЯР10А	5ЕИ 577 248-01	VD1 ◁ ▷ VD2	Выход положительный

Устройство основано на время-импульсном принципе.

Модулятор устройства, содержащий инвертор *У1*, интегратор *Э1*, компаратор *Э2*, импульсный усилитель *ИУ* и ключ *SA1*, выдает импульсы длительностью $\tau=x/z$, причем частота следования импульсов практически не зависит от x и z. Это достигается тем, что в качестве опорного напряжения компаратора используется то же напряжение, что и для интегратора. Импульсы модулятора управляют работой ключа *SA2*, поочередно подключающего выходы инверторов *У2*, *У3* к входу активного фильтра на усилителе *У4*. Выходные напряжения инверторов пропорциональны значению y и противоположны по знаку. Напряжение выхода устройства пропорционально, таким образом, скважности и амплитуде импульсов, поступающих на вход фильтра.

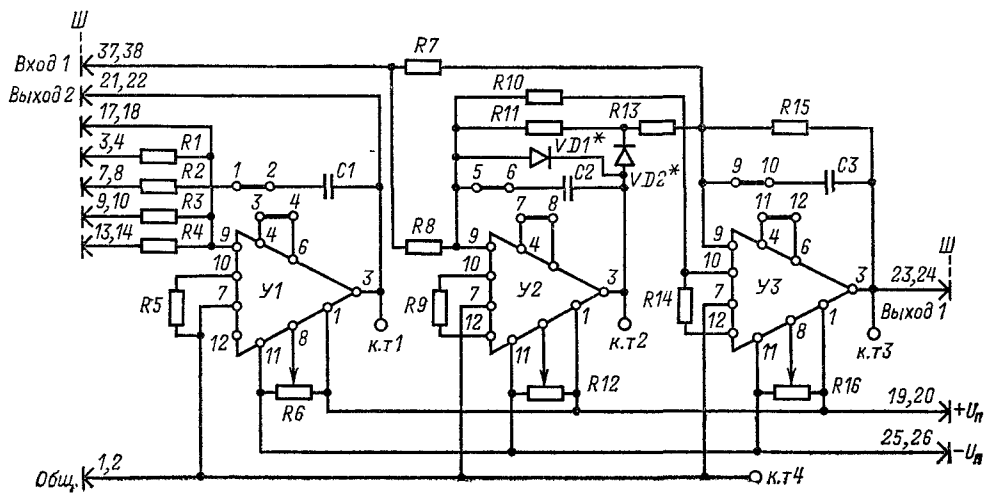
При работе в режиме умножения на вход z подается напряжение от внутреннего стабилизатора. Потенциометры *R35* и *R36* служат соответственно для установки нуля и коэффициента передачи устройства.

Технические данные устройства

Входные напряжения, В:	
по входам x, y	±10
по входу z	−(2÷10)
Входное сопротивление, кОм	1,5
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Погрешность, %	± 1
Полоса пропускания, Гц	70
Пульсации выходного напряжения, %	1
Напряжение питания, В	±12,6
Потребление тока от источника питания, мА	⩽100
Коэффициент передачи	0,1; 0,5; 1

Ячейка выделения модуля ЯР10. Схема ячейки представлена на рис. 8-18. Основную функцию в ячейке выполняют усилители *У2*, *У3*. Входной сигнал поступает через резисторы *R8* и *R7* на входы обоих усилителей. На вход *У3* подается также через *R13* напряжение выхода *У2*, которое при положительной полярности входного сигнала благодаря дио-

Рис. 8-18. Ячейка выделения модуля ЯР10.



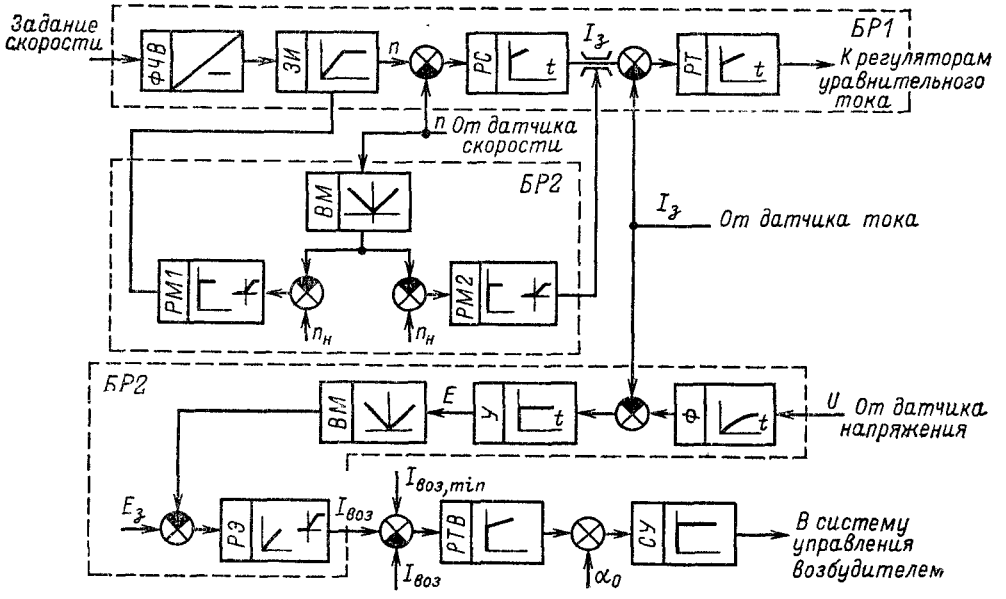


Рис. 8-19. Функциональная схема электропривода с использованием блоков регулирования БР1 и БР2.

ФЧВ — фазочувствительный выпрямитель; *ЗИ* — задатчик интенсивности; *РС* — регулятор частоты вращения (скорости); *РТВ* — регулятор тока возбуждения; *РЭ* — регулятор э. д. с.; *РМ* — регулятор мощности; *СУ* — суммирующий усилитель; *У* — усилитель; *ВМ* — выделитель модуля; *Ф* — функциональный преобразователь; *РТ* — регулятор тока.

ду *VD1* равно нулю (точнее 0,5—0,8 В), а при отрицательной — входному напряжению ячейки. Так как сопротивление *R13* вдвое меньше *R7*, а *R15* равно *R7*, напряжение выхода ячейки всегда отрицательно и равно входному напряжению. В варианте ЯР10А полярность включения диодов *VD1*, *VD2* обратная и напряжение выхода ячейки положительно. Диод *VD2* служит для компенсации ненулевого напряжения выхода *У2* в режиме ограничения. Усилитель *У1* может быть использован для усиления, инвертирования сигналов и других целей. Все усилители снабжены потенциометрами установки нуля. При необходимости полоса пропускания усилителей может быть расширена снятием соответствующих перемычек.

Технические данные ячейки

Максимальное входное напряжение, В	±10
Входное сопротивление, кОм	10
Максимальное выходное напряжение, В	±10
Сопротивление нагрузки, кОм	⩾2
Коэффициент передачи	1
Высокочастотная пульсация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ	⩽50
Погрешность преобразования, %	±2,5
Напряжения питания, В	±12,6
Потребление от источника питания, мА	50

БЛОКИ

Блок питания регуляторов БПР. Блок содержит источник питания операционных усилителей ±12,6 В, 1 А, источник питания согласующих усилителей ±24 В, 0,5 А, источник питания цепей управления и защиты КТЭ 24 В, 1,5 А. Кроме того, в блоке установлены четыре ячейки согласующих усилителей, предназначенных для усиления унифицированного сигнала ±10 В до уровня, необходимого для управления фазосдвигающим устройством, и две ячейки инвертирующих усилителей.

Амплитуда пульсаций напряжения питания операционных усилителей не более 5 мВ, коэффициент стабилизации 150, амплитуда пульсаций напряжения питания согласующих усилителей не более 20 мВ при коэффициенте стабилизации не менее 300.

Блоки датчиков БД и БВД. Блок БД содержит десять ячеек ЯДТ, две ячейки пороговых устройств ЯПУ и две ячейки генератора прямоугольных импульсов ЯП, предназначенных для питания трансформаторов измерительных устройств ячеек ЯДТ.

Блок БВД содержит четыре ячейки ЯДТ, ячейку ЯП и плату делителя напряжения до 1050 В для одной из ячеек ЯДТ.

Блоки регулирования БР1, БР2, БР3. Блок БР1 предназначен для управления скоростью реверсивного или нереверсивного привода постоянного тока в пределах до основной с обратной связью по частоте вращения, напряжению или э. д. с. двигателя. Блок обеспечивает построение однократно- и двукратноинтегрирующих систем регулирования частоты вращения с подчиненным регулированием тока якоря, в том числе одноканальных с раздельным управлением вентильными группами и двухканальных с регулированием уравнительного тока. Блок содержит также регулятор деления нагрузки для двухдвигательного привода и регулятор тока возбуждения.

Блок содержит набор ячеек и установочных элементов, объединенных в функциональные узлы. Например, узел задатчика интенсивности состоит из ячеек ЯР3 и ЯР1А (набор дополнительных конденсаторов к интегратору), а также двух потенциометров на лицевой панели блока для установки темпов разгона и замедления. Входы и выходы функциональных узлов выведены на разъемы блока. Необходимая схема собирается установкой перемычек между контактами разъемов.

Блок БР2 предназначен для совместной работы с блоком БР1 в схемах двухзонного регулирования частоты вращения и представляет собой устройство регулирования э. д. с. с подчиненным регулированием тока возбуждения двигателя и автоматической коррекцией уставки токоограничения при частоте вращения двигателя выше основной.

На рис. 8-19 приведена функциональная схема привода с двухзонным регулированием частоты вращения на базе блоков БР1 и БР2.

Блок БР3 предназначен для работы в системах регулирования, предусматривающих изменение магнитного потока двигателя в широких пределах, в качестве устройств суммирования, умножения и деления сигналов системы регулирования.

ИСПЫТАНИЯ ЯЧЕЕК

Усилители постоянного тока. Испытательная установка содержит блок питания регуляторов, например БПР для ячеек системы УБСР-АИ или ИП-6 для ячеек УБСР и источник входного сигнала, которым для ячеек УБСР-АИ может служить тот же БПР, а для ячеек УБСР — блок типа БО-1. Необходим также нагрузочный резистор, сопротивление которого является номинальным для данного типа операционного усилителя, а для ячеек УБСР, УБСР-А и АРХ также элементы решающих цепей, входной резистор, резисторы и конденсатор для цепи обратной связи. Кроме того, испытательная установка включает схему коммутации, обеспечивающую удобный переход от одной испытательной операции к другой. Примером может служить схема рис. 8-20 для испытаний усилителей типов УПТ-2, УПТ-4. Испытательная установка оснащается измерительными приборами класса 0,5 (желательно, цифровыми) и электронным осциллографом.

Испытание операционного усилителя системы УБСР включает проверку формы импульсов на вторичной обмотке трансформатора коммутирующего напряжения, измерение и и регулировку напряжения на диагонали моста модулятора, проверку диапазона балансировки нуля и при необходимости его регулировку, измерение максимального напряжения выхода при обеих полярностях сигнала. Важной операцией является измерение и регулировка коэффициента усиления на линейной части характеристики. Затем проверяют работу усилителя в схеме пропорционального усиления с $k_п=1$ и $k_п=10$, в схеме интегратора и в режиме замыкания накоротко цепи обратной связи (на отсутствие самовозбуждения). Измеряют двойную амплитуду пульсации напряжения выхода, и если она чрезмерно велика, проверяют форму импульсов на вторичной обмотке выходного трансформатора и подбирают параметры RC-цепочки, шунтирующей его первичную обмотку.

Подробнее вопросы настройки ячеек УБСР, в том числе операционных усилителей, рассмотрены в первом издании справочника.

Испытание усилителя ЯФХ-0302 (система АРХ) с параллельными высокочастотным и низкочастотным каналами производится в той же последовательности.

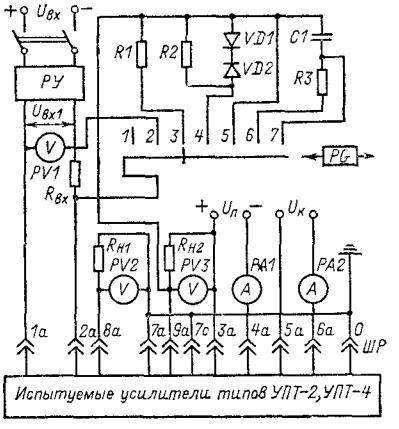


Рис. 8-20. Схема испытания операционных усилителей УПТ-2, УПТ-4.

$U_п$ — источник питания 24 В, 100 мА, коэффициент пульсаций не более 1 %; $U_{вх}$ — источник входного сигнала 24 В, 100 мА, коэффициент пульсаций не более 0,05 %; $U_к$ — источник коммутирующего напряжения прямоугольной формы 24 В, 100 мА, 1,5 кГц; *РУ* — регулировочное устройство; *PV1*, *PV2*, *PV3* — вольтметры класса 0,5 на 30 В, внутреннее сопротивление не менее 30 кОм, *PA1* — амперметр класса 0,5 150 мА; *PA2* — амперметр класса 1 100 мА, 2 кГц; *PG* — электронно-лучевой осциллограф с послесвечением и калибратором напряжения.

Усилители с непосредственной связью между каскадами, например ЯФХ-0301, проверяют и настраивают по той же программе, однако здесь отпадают операции, связанные с модулятором и трансформаторами.

Программа проверки усилителей УБСР-АИ включает проверку в схеме пропорционального усиления с $k_п=1$ и $k_п=10$ (используются резисторы решающих цепей, установленные на ячейке). Измеряют максимальное напряжение выхода обеих полярностей, двойную амплитуду высокочастотных пульсаций, диапазон балансировки нуля. Затем проверяют работу усилителя в схеме интегратора и в режиме ограничения напряжения выхода. Усилители, предназначенные для работы в схемах быстродействующих регуляторов, например во внутреннем контуре регулирования напряжения, дополнительно испытывают на отсутствие самовозбуждения в режиме работы с расширенной полосой пропускания.

Датчики тока и напряжения. Датчик тока УПТ-6 системы УБСР представляет собой пропорциональный усилитель с большим коэффициентом передачи; эта ячейка аналогична усилителю УПТ-4; ее особенностью является наличие встроенных элементов решающих це-

пей — двух входных резисторов и резистора обратной связи. Испытание датчика производят сначала при разомкнутой цепи обратной связи (проверка формы коммутирующего напряжения, напряжения на диагонали моста модулятора, пределов балансировки нуля, коэффициента усиления по напряжению). Затем на вход, имеющий больший коэффициент передачи, подают напряжение 75 мВ; напряжение на выходе при этом должно составлять 24 В±10 %. Измеряют двойную амплитуду пульсаций. Проверку повторяют при противоположной полярности напряжения. Затем на вход с меньшим коэффициентом передачи подают 187 мВ; напряжение на выходе должно составить при этом 24 В±10 %. Подключение номинальной нагрузки не должно уменьшать напряжение выхода более чем на 10 %. Измеряют двойную амплитуду пульсаций. Проверку повторяют при противоположной полярности сигнала.

Аналогичным образом испытывают ячейки датчиков тока ЯРХ-0304 и ЯРХ-0327, напряжения ЯРХ-0303 и ЯРХ-0326, а также потенциального разделителя ЯФХ-0315 системы АРХ. Все они выполнены по единой схеме и имеют $k_п=1$, за исключением датчиков тока с $k_п=5$.

Ячейку датчика тока ЯДТ системы УБСР-АИ испытывают, подавая на вход напряжение 75 мВ. Коэффициент передачи масштабного усилителя ячейки регулируют так, чтобы напряжение выхода составило 10 В, и измеряют двойную амплитуду пульсаций. Проверяют напряжение выхода и его пульсацию при противоположной полярности входного сигнала. Окончательную установку коэффициента передачи масштабного усилителя выполняют при настройке привода так, чтобы напряжение 10 В на выходе ячейки соответствовало максимально возможному при работе привода току.

Датчик напряжения УБСР-АИ выполнен на базе ячейки ЯДТ. Регулировку внешнего делителя напряжения выполняют при настройке привода таким образом, чтобы 10 В на выходе ячейки соответствовали максимально возможному напряжению.

Датчики тока и напряжения обязательно испытывают напряжением 1500 В переменного тока в течение 1 мин. Для этого соединяют между собой все контакты разъема, связанные потенциально со входной цепью ячейки, и подают напряжение между этими контактами и всеми остальными, которые также соединяют перемычками в один узел. При испытании ячеек УПТ-6 и ДН-2 к этому узлу подключают и шасси ячейки. После испытания измеряют сопротивление изоляции между теми же узлами мегаомметром 1000 В. Оно не должно быть менее 20 МОм.

Ячейки других типов, так же как усилители и датчики, проверяют на соответствие технических параметров паспортным данным.

С точки зрения унификации испытательного оборудования и методов испытаний различных ячеек большой интерес представляет опыт пусконаладочного управления треста Уралэлектромонтаж, которое применяет компенсационный метод измерений, основанный на сравнении характеристик испытуемого и эталонного элементов. На вход обоих элементов подают сигнал с выхода генератора инфранизкой частоты (ГИНЧ, ГКС). Переменное напряжение прямоугольной формы используют для измерения и регулировки коэффициентов передачи элементов, настройки необходимого темпа отработки задатчика интенсивности и т. п. Напряжение треугольной формы используют для визуального наблюдения на экране осциллографа характеристик ячеек; синхронизацию осциллографа осуществляют напряжением прямоугольной формы с выхода того же генератора.

В пусконаладочном управлении треста Севзапэлектромонтаж применяется метод, основанный на использовании фигур Лиссажу. Наиболее подходящим для этой цели является осциллограф (типа С1-19*), в котором блок горизонтальной развертки заменен усилителем горизонтального отклонения.

Значительно повышает производительность труда при испытании ячеек УБСР-АИ стенд, разработанный ЛенПЭО ВНИИПЭМ.

ИСПЫТАНИЕ БЛОКОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Стенд для испытания и настройки блоков должен включать в себя необходимые источники питания и вспомогательных напряжений (обычно той же системы, что и испытуемый блок), резисторы и потенциометры, переключатели для задания контрольных сигналов и коммутационные элементы, обеспечивающие набор испытательной схемы, например коммутационное поле со штеккерами или отдельный разъем для каждого типа блока.

Прежде всего блок испытывают напряжением 1500 В переменного тока в течение 1 мин, для чего напряжение подают между шасси блока и соединенными между собой контактами разъемов (за исключением заземляющих контактов, связанных с шасси). Отдельно испытывают цепи, связанные при работе привода с якорной цепью или цепью возбуждения двигателя (например, входные цепи датчиков). Затем к блоку подводят питание и необходимые вспомогательные напряжения. Целесообразно придать всем регуляторам пропорциональные характеристики, желательно с $k_п=1$; уровень ограничения напряжения выхода регуляторов устанавливают максимальным.

Потенциометрами установки нуля добиваются отсутствия напряжения на выходах всех усилителей канала, начиная от входа. На входы блока подают контрольные сигналы, проверяя их прохождение и преобразование по всем участкам канала регулирования. Измеряется уровень высокочастотных и низкочастотных пульсаций сигналов. Далее регуляторам придают необходимые характеристики и устанавливают расчетные параметры резисторов и конденсаторов решающих цепей, проверяя переходные функции регуляторов с помощью осциллографа при ступенчатом входном сигнале.

Рассмотрим в качестве примера испытания и настройку блока БР1 в той его части, которая показана на рис. 8-19.

Предварительно вынув ячейки и подклю-

* Снят с производства.

чив к разъемам блока розетки с предварительно напаянными перемычками, испытывают коммутацию блока повышенным напряжением. После измерения сопротивления изоляции вставляют ячейки и подключают блок к стенду или испытательной схеме. Неиспользуемые при испытании входы операционных усилителей соединяют при этом с общим проводом схемы (размыкание входных цепей приводит к уходу нуля усилителей и повышению уровня паразитных наводок).

Включают питание блока и контролируют значение и пульсацию питающих напряжений на гнездах контрольного разъема, установленного на лицевой панели блока. Все измерения выполняют относительно общей точки. Если для измерений используется электронный вольтметр или осциллограф, то измерительный провод, связанный с корпусом прибора, подключают к общей точке. Напряжения должны составлять $+12{,}6\pm0{,}1$ и $-12{,}6\pm0{,}1$ В, а двойная амплитуда пульсаций не должна превышать 15 мВ.

Включают источник питания сельсина, с которого подается входной сигнал *ФЧВ*, и при нулевом уровне сигнала потенциометром «Уст. 0» на блоке добиваются нулевого напряжения на выходе *ФЧВ*. Затем устанавливают нуль на выходе *ЗИ*. При обесточенных реле в ячейках связи регуляторов скорости и тока, размыкающие контакты которых шунтируют конденсаторы в цепях обратных связей, устанавливают нули на выходах *РС* и *РТ* с точностью до ±25 мВ. Установив максимальное напряжение выхода сельсина, потенциометром «Вход» регулируют входное напряжение *ФЧВ*, амплитудное значение которого должно составлять 8 В. При измерении значения и фазы входного сигнала напряжение выхода *ФЧВ* должно изменяться от $+10$ до -10 В.

Потенциометрами $+U_{01}$ и $-U_{01}$, расположенными на блоке, устанавливают опорные напряжения *ЗИ*, определяющие темп отработки, равными соответственно $+8\pm0{,}1$ и $-8\pm\pm0{,}1$ В. При резком повороте ротора сельсина из одного крайнего положения в другое напряжение на выходе *ЗИ* должно изменяться от $+10$ до -10 В примерно за 8 с. Осциллографом контролируют линейность отработки.

Потенциометрами $+U_{02}$ и $-U_{02}$ (на блоке) устанавливают опорные напряжения *РС* равными $+10\pm0{,}1$ и $-10\pm0{,}1$ В. Ротор сельсина устанавливают в положение, при котором напряжение выхода *РС* равно 10 В, и измеряют напряжение на выходе *ЗИ*. Отношение этих напряжений должно быть равно расчетному коэффициенту пропорционального усиления *РС* по каналу задания. Подавая регулируемое напряжение на вход обратной связи по частоте вращения, аналогичным образом измеряют $k_{р,с}$ по каналу обратной связи. Затем, установив на выходе *РС* небольшое напряжение, включают реле в ячейке связи, переводя *РС* в режим интегрирующего усилителя. Напряжение выхода должно возрасти до 10 В. Затем аналогичным образом проверяют действие бесконтактного ключа, шунтирующего цепь обратной связи *РС*.

Подавая входной сигнал через *ФЧВ*, *ЗИ* и *РС* на вход регулятора тока, измеряют коэффициент пропорционального усиления *РТ* по качалу задания. Затем, подавая регулируемое напряжение на вход обратной связи по току, измеряют коэффициент пропорционального усиления $k_{р,т}$ по каналу обратной связи. Включив реле в ячейке связи *РТ*, проверяют, интегрирует ли регулятор. Затем, отключив реле и установив сельсином напряжение 10 В на выходе *РТ*, измеряют двойную амплитуду высокочастотных и низкочастотных пульсаций, которая не должна превышать 0,2 В.

Далее блок целесообразно проверить в динамических режимах работы методом смешанного моделирования. Для этого к блоку подключают аналоговую модель силовой части электропривода, предварительно установив на ней параметры привода, для которого предназначен блок. Такие портативные модели разработаны и используются в пусконаладочном управлении треста Севзапэлектромонтаж. В ЛенПЭО ВНИИПЭМ разработана более сложная и совершенная модель силовой части привода, дающая возможность моделировать тиристорные преобразователи с различными способами управления вентильными группами и двигатели с регулируемым потоком возбуждения. Смешанное моделирование на этапе предпускового испытания блоков позволяет подавать их на монтаж с высокой степенью готовности.

Окончательная настройка блоков регулирования производится при вводе привода в эксплуатацию.

Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

8-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЯКОРНОЙ ЦЕПИ

1. Динамические параметры якорной цепи. Характер переходных процессов в электроприводах постоянного тока при неизменном токе возбуждения двигателя зависит от двух динамических параметров: электромагнитной постоянной времени якорной цепи $T_э$ и электромеханической постоянной времени привода $T_{эм}$, которые определяются по формулам, с:

$$T_э = \frac{L_{я,ц}}{R_{я,ц}}, \qquad (8\text{-}1)$$

где $L_{я,ц}$ — суммарная индуктивность якорной цепи, Гн; $R_{я,ц}$ — суммарное активное сопротивление якорной цепи, Ом;

$$T_{эм} = \frac{JR_{я,ц}}{c^2\Phi^2}, \qquad (8\text{-}2)$$

где c — конструктивная постоянная машины;

$$c\Phi = \frac{E_н}{\omega_н} = \frac{M_н}{I_н} = \frac{pN\Phi}{2\pi a};$$

$$\omega_н = \frac{\pi n_н}{30}; \qquad (8\text{-}3)$$

$E_н$ — номинальная э. д. с. двигателя, В, $I_н$ —

номинальный ток якоря двигателя, А; $\omega_н$ — номинальная угловая скорость двигателя, рад/с; $M_н$ — номинальный момент двигателя, Н·м; p — число пар главных полюсов; N — число проводников якоря; a — число пар параллельных ветвей якоря; $n_н$ — номинальная частота вращения двигателя, об/мин; Ф — магнитный поток одного полюса, Вб.

При использовании вместо угловой скорости ω, рад/с, частоты вращения двигателя n, об/мин, конструктивную постоянную c принято называть механической постоянной $c_м$

$$c = c_м = \frac{pN}{2\pi a},$$

а электрическую постоянную $c_е$ определяют из выражения

$$E = \frac{1}{60}\frac{pN}{a}\Phi n = c_е \Phi I_я;$$

$$c_е = \frac{pN}{60a} = 0{,}105\, c_м;$$

J — момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м².

В заводских формулярах на двигатели ранее приводились данные махового момента GD^2, выраженного в единицах технической системы (кгс·м²). Следует иметь в виду, что на уровне моря и широте 45° (при g = =9,81 м/с²) численное значение массы тела m, выраженное в единицах системы СИ (кг), равно численному значению веса этого тела G в единицах технической системы (кгс), и в практических расчетах при пересчете махового момента GD^2 (кгс·м²) в момент инерции J в единицах системы СИ (кг·м²) следует пользоваться формулой

$$J = \frac{GD^2}{4}.$$

Наибольшее распространение среди эмпирических формул для определения индуктивности машины получила формула Уманского — Линвилла, имеющая вид

$$L = \gamma \frac{U_н}{I_н}\frac{30}{p\pi n_н},$$

где $\gamma = 0{,}15 \div 0{,}25$ — для компенсированных машин; $\gamma = 0{,}6$ — для некомпенсированных машин; $U_н$ — номинальное напряжение, В.

Для системы генератор — двигатель индуктивность якорной цепи

$$L_{я,ц} = L_г + L_д,$$

где $L_г$, $L_д$ — индуктивности генератора и двигателя с учетом ошиновки.

Сопротивление якорной цепи с учетом нагрева

$$R_{я,ц} = 1{,}24\,(R_{я\,г} + R_{к,г} + R_{п,г} + R_{я,д} + R_{к,д} + R_{п\,д}) + R_ш,$$

где $R_{я,г}$, $R_{к,г}$, $R_{п\,г}$, $R_{я,д}$, $R_{к,д}$, $R_{п,д}$ — сопротивления обмоток якоря, компенсационной и дополнительных полюсов генератора и двигателя при 20 °С (данные заводских формуляров); $R_ш$ — сопротивление соединительных кабелей и шин, зависящее от длины, сечения, материала и рабочей температуры.

Зная $L_{я,ц}$ и $R_{я,ц}$, можно определить электромагнитную постоянную якорной цепи по формуле (8-1).

В системе управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока выпрямленное напряжение

$$U_d = aU_2 - I_d R_э - \Delta E,$$

где a — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления; U_2 — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора; I_d — выпрямленный ток; $R_э$ — эквивалентное активное сопротивление преобразователя с учетом составляющей, обусловленной анодным перекрытием; ΔE — падение напряжения на вентиле.

Например, для трехфазной мостовой схемы (Ларионова)

$$a = 2{,}34; \quad R_э = \frac{6X_{т2}}{2\pi} + 2R_{т2}.$$

По паспортным данным трансформатора можно определить приведенные к вторичной обмотке активное $R_{т2}$ и индуктивное $X_{т2}$ сопротивления трансформатора

$$R_{т2} = \frac{P_к}{3I_{1ф}^2 K^2};$$

$$X_{т2} = \sqrt{\left(\frac{U_{к,ф}}{I_{1ф}K^2}\right)^2 - R_{т2}^2},$$

где K — коэффициент трансформации; $P_к$ — мощность короткого замыкания трансформатора, Вт; $I_{1ф}$ — фазный номинальный ток первичной обмотки, А; $U_{к,ф}$ — фазное напряжение короткого замыкания, В.

Индуктивность преобразователя

$$L_{т2} = \frac{X_{т2}}{2\pi f},$$

где f — частота питающей цепи.

Эквивалентное активное сопротивление преобразователя

$$R_э \approx \frac{0{,}5\,U_к\%\, aU_2}{100\, I_н} + R_{т2},$$

где $U_к$ % — напряжение короткого замыкания по паспортным данным трансформатора, % первичного номинального напряжения.

Определение динамических параметров по приведенным выше расчетным формулам следует рассматривать как предварительное из-за неточностей расчетных формул, трудностей учета внутренних обратных связей, насыщения, отклонения реальных данных от паспортных.

Во время наладки систем автоматического регулирования динамические параметры целесообразно определять экспериментально.

Существует ряд методов экспериментального определения этих параметров, основанных на анализе переходных и частотных характеристик, отличающихся между собой характером входного возмущающего сигнала.

2. **Определение динамических параметров якорной цепи по осциллограмме якорного тока.** На рис. 8-21 представлена схема для определения постоянных времени в системе управле-

ния выпрямитель — двигатель, на рис. 8-22 — в системе генератор — двигатель. На рис. 8-23 приведена осциллограмма якорного тока двигателя, снятая при ступенчатом приложении напряжения к цепи якоря возбужденного двигателя. Горизонтальная ось совмещена с линией, соответствующей статическому току, а

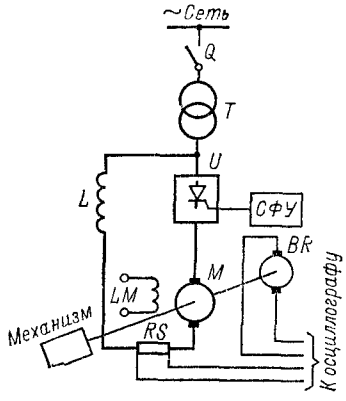


Рис. 8-21. Схема для определения постоянных времени в системе управляемый выпрямитель — двигатель.

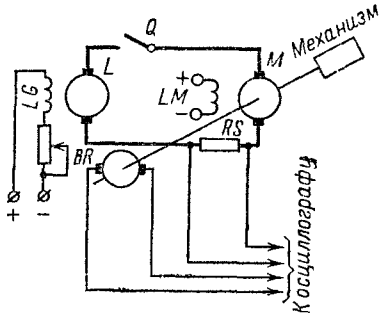


Рис. 8-22. Схема для определения постоянных времени в системе генератор — двигатель.

начало координат — с точкой начала вращения привода.

Первый способ. Разобьем ось времени на равные интервалы Δt; обозначим через I_1, I_2, I_3 любые три рядом стоящие ординаты осциллограммы, сдвинутые на Δt, тогда

$$\frac{I_3}{I_1} = b\frac{I_2}{I_1} - C,$$

где b и C — постоянные величины, $C = e^{-\frac{\Delta t}{T_э}}$; $T_э$ — электромагнитная постоянная времени якорной цепи привода

$$T_э = -\frac{\Delta t}{\ln C}. \qquad (8\text{-}4)$$

Для каждой тройки соседних ординат подсчитываются отношения I_2/I_1 и I_3/I_1; точки с этими координатами наносятся на плоскость (рис. 8-24).

Через несколько полученных таким образом точек проводится прямая, отсекающая на оси ординат отрезок, равный C. Зная C и Δt, по (8-4) определяют $T_э$. Электромеханическая

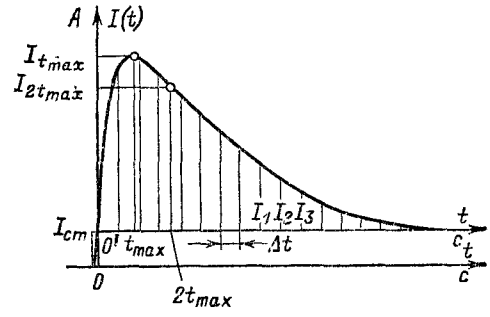


Рис. 8-23. Осциллограмма якорного тока двигателя.

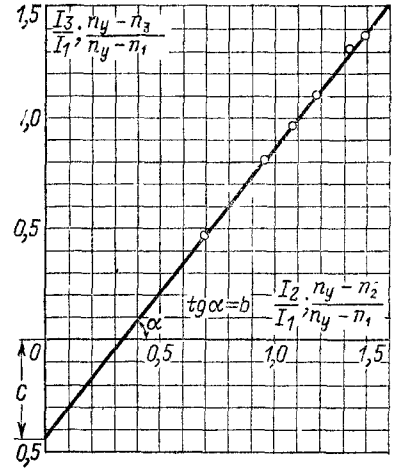


Рис. 8-24. Зависимости

$$\frac{I_3}{I_1} = b\frac{I_2}{I_1} - C \text{ и } \frac{n_y - n_3}{n_y - n_1} = b\frac{n_y - n_2}{n_y - n_1} - C.$$

постоянная времени $T_{эм}$ определяется из соотношения

$$T_{эм} = \frac{S}{I_к},$$

где S — площадь, ограниченная кривой якорного тока и прямой статического тока (рис. 8-23); $I_к$ — ток короткого замыкания

$$I_к = \frac{I^2_{t_{max}}}{I_{2t_{max}}}, \qquad (8\text{-}5)$$

где $I_{t_{max}}$ — максимальное значение тока; t_{max} — время достижения максимального значения тока; $I_{2t_{max}}$ — значение тока в момент $2t_{max}$.

Второй способ. Для характерных точек осциллограммы якорного тока (рис. 8-23) t_{max}, $2t_{max}$ и значений ординат $I_{t_{max}}$ и $I_{2t_{max}}$ справедливы следующие соотношения:

$$\left.\begin{aligned} \frac{t_{max}}{T_э} &= \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}; \\ \frac{I_{2t_{max}}}{I_{t_{max}}} &= \frac{1}{p_1 - p_2}\left(\frac{p_1}{e^{p_1 - p_2}} \ln \frac{p_2}{p_1} - \right. \\ &\left. - e^{\frac{p_2}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}} \right), \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}6)$$

где $p_{1,(2)} = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{v}}$;

$$v = \frac{T_{эм}}{T_э}.$$

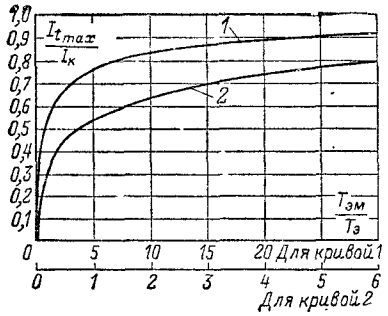


Рис. 8-25. График зависимости $\frac{I_{t_{max}}}{I_к}$ от $\frac{T_{эм}}{T_э}$.

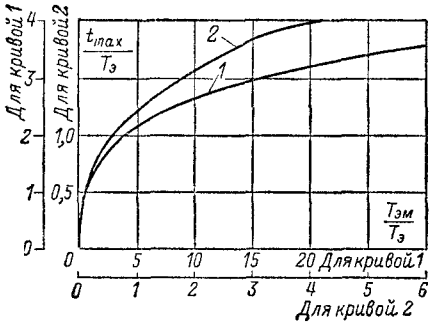


Рис. 8-26. График зависимости $\frac{t_{max}}{T_э}$ от $\frac{T_{эм}}{T_э}$.

По аналитическим формулам (8-6) построены графики зависимости $I_{t_{max}}/I_к$ и $t_{max}/T_э$ в функции отношения $T_{эм}/T_э$ (рис. 8-25, 8-26).

Для удобства пользования графиками начальные участки кривых даны в укрупненном масштабе (кривые 2).

Из изложенного вытекает методика определения постоянных времени. Определяют $I_к$ по (8-5). На графике рис. 8-25 по отношению $I_{t_{max}}/I_к$ определяют $T_{эм}/T_э$. Затем по графику рис. 8-26 определяют $t_{max}/T_э$. Зная $T_{эм}/T_э$, $t_{max}/T_э$ и t_{max}, находят значения $T_{эм}$ и $T_э$.

Для определения электромагнитной постоянной времени $T_э$ достаточно иметь осцилло-

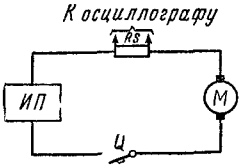


Рис. 8-27. Схема подключения цепи якоря двигателя к источнику питания.

ИП — регулируемый источник питания.

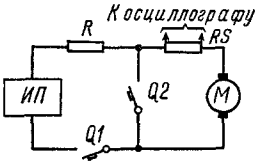


Рис. 8-28. Схема закорачивания якорной цепи двигателя.

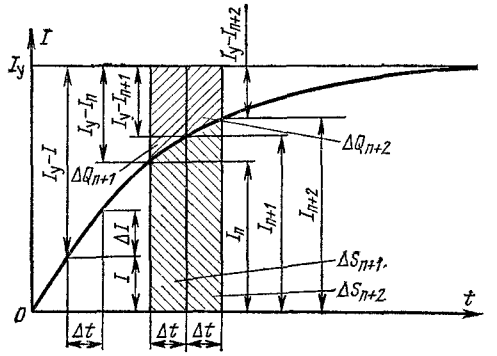


Рис. 8-29. Осциллограмма якорного тока при отсутствии возбуждения двигателя.

грамму якорного тока, снятую на заторможенном двигателе без возбуждения при подключении цепи якоря к источнику напряжения (рис. 8-27) или при замыкании накоротко цепи якоря, по которой до замыкания протекал постоянный ток (рис. 8-28). При этом протекание тока должно быть кратковременным.

Вся осциллограмма (рис. 8-29) разбивается на элементарные участки, и для каждой трапеции определяется I, Δt, ΔI

$$T_э \approx \frac{(I_y - I)\,\Delta t}{\Delta I}.$$

Этот способ приемлем для системы генератор — двигатель, где кривая якорного тока достаточно гладкая. Для систем управляемый выпрямитель — двигатель $T_э$ более точно определяется на основании следующих формул:

$$T_э \approx \frac{(\Delta S_{n+2} - \Delta S_{n+1})}{2I_{n+1} - (I_{n+2} + I_n)};$$

$$T_э \approx \frac{\Delta Q_{n+1}}{(I_y - I_n) - (I_y - I_{n+1})} = \frac{\Delta Q_{n+1}}{I_{n+1} - I_n},$$

где $I_у$ — установившееся значение тока; I_n, I_{n+1}, I_{n+2} — соседние ординаты; ΔS_{n+1}, ΔS_{n+2}, ΔQ_{n+1} — элементарные площади (рис. 8-29).

Найденные значения $T_э$ на разных участках осциллограммы позволяют определить зависимость электромагнитной постоянной времени от якорного тока. Если индуктивность якорной цепи не меняется, формула может быть упрощена

$$T_э = \frac{\Sigma \Delta Q_n}{I_у},$$

где $\Sigma\Delta Q_n$ — сумма элементарных площадей.

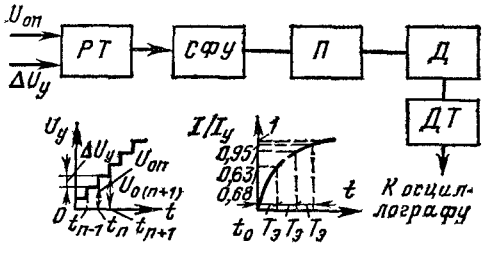


Рис. 8-30. Структурная схема испытаний при последовательных ступенчатых приращениях управляющего сигнала.

РТ — пропорциональный регулятор тока; *СФУ* — система фазового управления; *П* — преобразователь; *Д* — двигатель; *ДТ* — датчик тока.

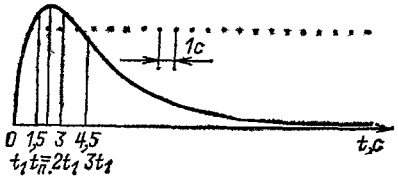


Рис. 8-31. Осциллограмма динамического тока якоря двигателя.

Элементарные площади могут быть определены как площади трапеции или прямоугольника. Разбиение осциллограммы в пределах (0÷0,98) $I_у$ на 15 участков оказывается достаточным для практических расчетов.

В установках управляемый выпрямитель—двигатель постоянного тока индуктивность может существенно зависеть от якорного тока. В этом случае осциллографирование якорного тока целесообразно проводить при небольших последовательных ступенчатых приращениях управляющего сигнала системы фазового управления, считая на каждом участке индуктивность постоянной. На рис. 8-30 приведена структурная схема испытаний для приводов с системой управления, выполненной на аналоговых блоках. При этом возбуждение на двигателе отсутствует. Для определения электромагнитной постоянной времени можно воспользоваться соотношениями характерных точек: времени $t=T_э$ соответствует ток I, равный 0,63 $I_у$; времени $t=2T_э$ — 0,86$I_у$; времени $t=3T_э$ — 0,95$I_у$. Можно воспользоваться еще одним способом определения $T_э$ и $T_{эм}$ [8-8] по осциллограмме тока

$$T_э = -\frac{1}{p_1 + p_2}; \quad T_{эм} = -\frac{p_1 + p_2}{p_1 p_2}, \tag{8-7}$$

где p_1, p_2 — корни характеристического уравнения двигателя.

На осциллограмме динамического тока якоря (рис. 8-31) выбирается произвольный отрезок времени t_1 на первой трети длительности изменения тока. Для моментов t_1, $2t_1$, $3t_1$ замеряются соответственно мгновенные значения динамического тока якоря $i_д(t_1)$, $i_д(2t_1)$, $i_д(3t_1)$ и определяются p_1, p_2

$$p_{1,(2)} = \frac{\ln\left\{\frac{i_д(2t_1)}{2i_д(t_1)} \pm \sqrt{\frac{i_д(3t_1)}{i_д(t_1)} - \frac{3}{4}\left[\frac{i_д(2t_1)}{i_д(t_1)}\right]^2}\right\}}{t_1}. \tag{8-8}$$

По (8-7) находят $T_э$ и $T_{эм}$.

В реальных приводах динамические параметры могут меняться в зависимости от значения тока или угла поворота якоря. Опытным путем установлено, что наибольшее приближение к усредненным значениям $T_э$ и $T_{эм}$ получается при выборе такого момента t_1, для которого перегиб кривой тока находится примерно между t_1 и $2t_1$.

Следовательно, наиболее верно можно вычислять $T_э$ и $T_{эм}$, используя дополнительно размер площади, охватываемой кривой динамического тока якоря и осью времени. Для точки момента перегиба $t_п$ кривой тока

$$\frac{i_д(2t_п)}{i_д(t_п)} = \frac{S_п}{S_o}, \tag{8-9}$$

где $S_п$ — площадь под кривой динамического тока якоря от момента $t_п$ до окончания переходного процесса; S_o — полная площадь под той же кривой.

С учетом (8-9) выражение (8-8) принимает вид

$$p_{1,(2)} = \frac{\ln\left\{\frac{S_п}{2S_o} \pm \sqrt{\frac{i_д(3t_п)}{i_д(t_п)} - \frac{3}{4}\left(\frac{S_п}{S_o}\right)^2}\right\}}{t_п}. \tag{8-10}$$

Выражения (8-7) и (8-10) являются общими для любых соотношений, однако если двигатель — звено колебательное, то $T_э$ и $T_{эм}$ определяются так:

$$T_э = \frac{t_o}{2\pi} \operatorname{tg} \pi \frac{t_п}{t_o};$$

$$T_{эм} = \frac{t_o}{\pi} \sin 2\pi \frac{t_п}{t_o},$$

где t_o — момент времени, когда динамический ток якоря меняет свое направление, при этом $i_д(t_o) = 0$ (рис. 8-32).

3. **Определение динамических параметров якорной цепи по осциллограмме частоты вращения.** Осциллограмма частоты вращения, представленная на рис. 8-33, снимается при скачкообразном приложении на-

пряжения к якорной цепи двигателя постоянного тока по схемам рис. 8-21 и 8-22

$$T_{эм} = \frac{S}{n_y} = \frac{\sum_{j=1}^{k} \Delta S_j}{n_y},$$

где n_y — установившаяся частота вращения двигателя; S — площадь, ограниченная кривой частоты вращения и линией n_y; ΔS_j — элементарная площадь.

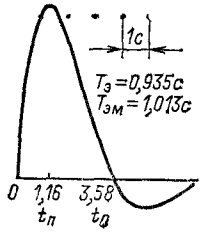


Рис. 8-32. Осциллограмма динамического тока якоря двигателя, если двигатель — звено колебательное.

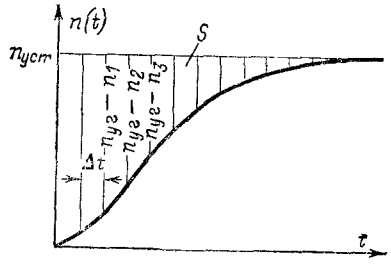


Рис. 8-33. Осциллограмма частоты вращения двигателя.

Ось времени разбивается на равные интервалы Δt; для каждой тройки ординат n_1, n_2, n_3 определяются величины

$$\frac{n_y - n_3}{n_y - n_1}; \quad \frac{n_y - n_2}{n_y - n_1}.$$

Точки с координатами $\frac{n_y - n_3}{n_y - n_1}$ и $\frac{n_y - n}{n_y - n_1}$ наносятся на плоскость, через несколько полученных таким образом точек проводится прямая (см. рис. 8-24), уравнение которой

$$\frac{n_y - n_3}{n_y - n_1} = b\frac{n_y - n_2}{n_y - n_1} - C.$$

Из графика определяется C

$$T_э = \frac{\Delta t}{\ln C}.$$

В качестве динамических параметров якорной цепи могут рассматриваться величины ω_n — угловая частота недемпфированных колебаний и ξ — коэффициент демпфирования колебаний, однозначно связанные с величинами $T_э$ и $T_{эм}$,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{T_э T_{эм}}}; \quad \xi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_{эм}}{T_э}}.$$

Практически коэффициент демпфирования ξ изменяется в пределах 0,5—2. Величины ω_n и ξ можно определить, пользуясь семейством кривых рис. 8-34.

На осциллограмме частоты вращения двигателя (рис. 8-35) находят точки, для которых величина $1 - n/n_y$ равна $2/e$, $3/e^2$, $4/e^3$ (e=2,72), и соответствующие им величины t_1, t_2, t_3.

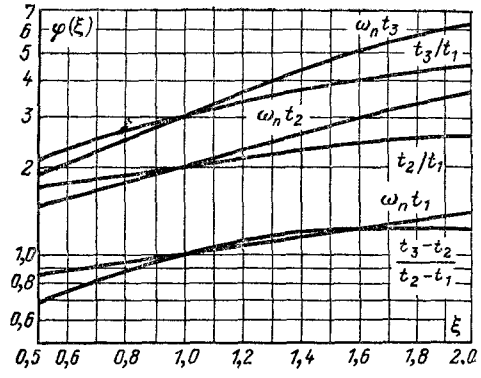


Рис 8-34. Семейство кривых для определения ω_n и ξ.

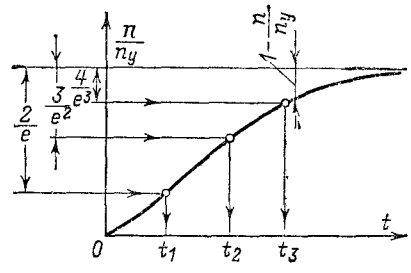


Рис. 8-35. Осциллограмма частоты вращения двигателя при $0{,}5<\xi<2$.

Зная t_1, t_2, t_3, по кривым t_3/t_1, t_2/t_1, $(t_3-t_2)/(t_2-t_1)$ (рис. 8-34) находят значение ξ. Определив ξ и зная t_1, t_2, t_3, по кривым $\omega_n t_1$, $\omega_n t_2$, $\omega_n t_3$ рис. 8-34 находят значения ω_n. Для определения ω_n и ξ достаточно двух кривых. Использование для этой цели шести кривых дает возможность произвести контроль определяемых величин ω_n и ξ. Теоретически так определять можно во всей области изменения ξ от 0 до ∞, а практически с достаточной точностью в области $0{,}5<\xi<2$. При снятии осциллограммы частоты вращения двигателя в системах управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока ток холостого хода должен быть непрерывным, и когда индуктивность якорной цепи насыщается, скачки якорного напряжения должны быть такими, чтобы бросок якорного тока не менял существенно индуктивность цепи.

4. Определение динамических параметров привода постоянного тока по осциллограмме якорного тока и частоты вращения. Ниже излагается еще одна методика определения со-

противления $R_э$, индуктивности якорной цепи, приведенного к валу двигателя момента инерции J, электромагнитной $T_э$ и электромеханической $T_{эм}$ постоянных времени электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения [8-9].

Область применения методики ограничена следующими условиями: якорный ток должен быть непрерывным; двигатель работает с неизменным потоком возбуждения; момент холостого хода привода принят равным нулю ($M_х=0$); индуктивность и электромагнитная постоянная времени определяются для ненасыщенных элементов главной цепи двигателя.

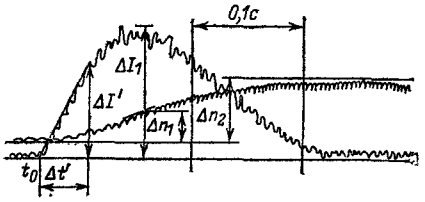


Рис. 8-36. Осциллограмма якорного тока $I=f(t)$ и частоты вращения $n=\varphi(t)$ двигателя.

Методика дает простые расчетные соотношения, не требует применения номограмм и обеспечивает удовлетворительную точность в определении всех динамических параметров привода по одной осциллограмме $n=\varphi(t)$ и $I=f(t)$ (рис. 8-36).

Скачкообразным увеличением напряжения преобразователя (выпрямителя) $\Delta U_в$ при разомкнутой системе регулирования производится подразгон двигателя от частоты вращения n_0 до частоты вращения $n_0+\Delta n_2$.

Величины n_0 и $\Delta U_в$ рекомендуется выбирать такими, чтобы максимальный динамический ток ΔI_1 не превышал номинальный ток двигателя, а частота вращения $n_0+\Delta n$ не превышала номинальную частоту вращения двигателя.

На осциллограмме (рис. 8-36) фиксируются три характерных момента времени: t_0 — начало процесса, подача напряжения $\Delta U_в$; t_1 — момент достижения максимума динамического тока ΔI_1 и приращения частоты вращения Δn_1; t_2 — момент, когда привод приходит в состояние, близкое к установившемуся. Момент t_2 может быть зафиксирован не раньше, чем Δn достигнет 0,95 $\Delta n_у$. При этом запаздывание в фиксации t_2 не вносит погрешности в определение параметров привода, так как площадь, описываемая кривой $I=f(t)$ на участке $\Delta n>0{,}95\,\Delta n_у$, становится весьма малой по сравнению с площадью, описываемой той же кривой на участке $0<\Delta n<0{,}95\,\Delta n_у$.

Параметры определяются по следующим формулам (В·с; Ом; Гн; кг·м² и соответственно):

$$c_м\Phi=\frac{\Delta U_в}{\Delta\omega_2}=\frac{30\,\Delta U_в}{\pi\Delta n_2};$$

$$R_э=\frac{c_м\Phi\,\frac{30}{\pi}(\Delta n_2-\Delta n_1)}{\Delta I_1};$$

$$L_э=\frac{\Delta U_в\,\Delta t'}{\Delta I'};$$

$$J=\frac{9{,}55\,c_м\,\Phi}{\Delta n_2}\sum_{i=1}^{i=k}\Delta I_i\,\Delta t_i;$$

$$T_э=\frac{L_э}{R_э}=\frac{\Delta n_2}{\Delta n_2-\Delta n_1}\,\frac{\Delta I_1}{\Delta I'}\,\Delta t';$$

$$T_{эм}=\frac{JR_э}{c_м^2\Phi^2}=\frac{\Delta n_2-\Delta n_1}{\Delta n_2}\,\frac{\sum_{i=1}^{i=k}\Delta I_i\,\Delta t_i}{\Delta I_1},$$

где $\sum_{i=1}^{i=k}\Delta I_i\Delta t_i$ — площадь, описываемая кривой $I=f(t)$ в интервале t_0-t_2, разбитом на

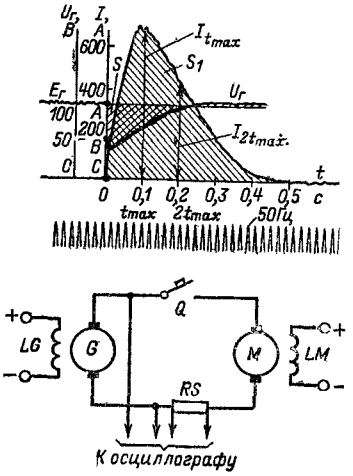


Рис. 8-37. Схема и осциллограмма якорного тока и напряжения генератора при замыкании автомата Q.

k отрезков; ΔI_i — средний ток в интервале времени Δt_i; $\Delta t'/\Delta I'$ — котангенс угла наклона касательной к кривой $I=f(t)$ в точке t_0.

5. Определение динамических параметров по осциллограмме якорного тока и напряжения питания. На рис. 8-37 представлены схема и осциллограммы тока и напряжения генератора после замыкания якорной цепи. При этом

$$R_{я,ц}=R_г+R_д=\frac{E_г}{I_к},\qquad (8\text{-}11)$$

где $E_г$ — э. д. с. генератора; $I_к$ — ток короткого замыкания, определяемый из осциллограммы рис. 8-37 по (8-5);

$$L_{я,ц}=L_г+L_д=T_э\,(R_г+R_д),$$

где $L_{я,ц}$ — суммарная индуктивность якорной цепи.

Для раздельного определения индуктивностей генератора и двигателя используется

осциллограмма напряжения на зажимах генератора (рис. 8-37)

$$\frac{AB}{BC}=\frac{L_г}{L_д}=k;$$

$$L_д=T_э\frac{R_г+R_д}{k+1};\ L_г=kL_д.$$

Для разделения сопротивлений якорной цепи можно использовать соотношение $R_г=S/S_1$ с учетом фактических масштабов, где S—площадь между прямой $E_г$ и кривой $U_г=f(t)$; S_1 — площадь, ограниченная кривой якорного тока и нулевой линией.

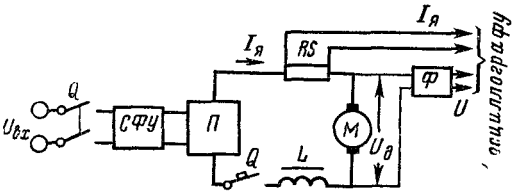


Рис. 8-38. Схема для определения электромагнитной постоянной времени якоря двигателя.

СФУ — система фазового управления; *П* — преобразователь; *Ф* — фильтр.

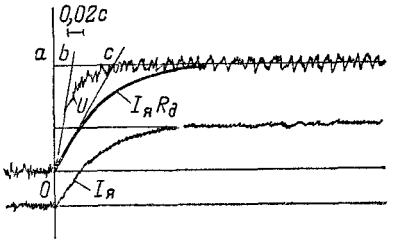


Рис. 8-39. Осциллограмма напряжения и тока цепи якоря в схеме управляемый преобразователь — двигатель.

Из этой же осциллограммы сопротивление $R_г$ можно определить по формуле

$$R_г=\frac{E_г-U_{г,t_{max}}}{I_{t_{max}}},$$

где I_{tmax} — максимальный якорный ток; $U_{г,tmax}$ — напряжение генератора в момент максимального якорного тока.

Наиболее простым методом определения сопротивлений $R_д$ и $R_г$ является метод амперметра и вольтметра. При неподвижном двигателе с разомкнутой цепью возбуждения измеряются приложенное напряжение $U_д$ и ток $I_д$ в якорной цепи

$$R_д=\frac{U_д-\Delta U_щ}{I_д};\ R_г=\frac{E_г-U_д-\Delta U_щ}{I_д},$$

где $E_г$ — напряжение генератора до замыкания якорной цепи; $U_д$ — напряжение якоря двигателя; $\Delta U_щ$ — падение напряжения на щетках одного якоря; $\Delta U_щ=2$ В.

При экспериментальном определении параметров в системе управляемый выпрямитель — двигатель надо следить, чтобы ток холостого хода на установившейся скорости был непрерывным. Тогда суммарное сопротивление $R_{я,д}$ может быть определено по (8-11). Напряжение $E_г$ определяется по показанию вольтметра в конце разгона привода. Падением напряжения в преобразователе, вызванным током холостого хода, можно пренебречь без существенной ошибки в определении $E_г$.

Суммарная индуктивность якорной цепи может быть определена аналогично, как для системы генератор — двигатель. Но поскольку кривая напряжения содержит переменную составляющую, то по результатам непосредственного осциллографирования на участке, содержащем индуктивность, нельзя судить о ее значении, как это делалось в системе Г—Д при разделении индуктивностей. Здесь рекомендуется следующий способ: на неподвижный двигатель, у которого отключена обмотка возбуждения, подается скачком напряжение; осциллографируются ток и напряжение на якоре двигателя через фильтр с постоянной времени $T_ф$ (рис. 8-38). Постоянная времени фильтра $T_ф$ выбирается такой, что пульсирующая составляющая напряжения на выходе практически отсутствует. Масштабы при осциллографировании выбираются так, чтобы ординаты установившегося значения напряжения и тока (рис. 8-39) на осциллограммах были одинаковы,

$$R_д=\frac{U_{д,у}-\Delta U_щ}{I_{я,у}},$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения в щетках, равное 2 В; $U_{д,у}$, $I_{я,д}$ — установившееся значение напряжения и тока якоря двигателя.

Постоянная времени якоря двигателя

$$T_д=\frac{L_д}{R_д}=\frac{\operatorname{tg}\alpha T_ф}{\operatorname{tg}\alpha_1 R_д},$$

где $L_д$, $R_д$ — индуктивность и активное сопротивление якоря двигателя; $T_ф$—постоянная времени фильтра в цепи шлейфа напряжения при осциллографировании; $\operatorname{tg}\alpha$ — тангенс угла наклона кривой напряжения при $t=0$; $\operatorname{tg}\alpha_1$ — тангенс угла наклона кривой якорного тока при $t=0$.

Постоянную времени $T_д$ можно определить для проверки другим способом

$$T_д=T_ф+\frac{S}{U_{д,у}},$$

где S — площадь, заключенная между кривой напряжения и тока, В·с; $U_{д,у}$ — установившееся значение якорного напряжения, В.

Зная $T_д$, определяем $L_д=T_дR_д$.

Аналогично можно определить параметры дросселя и компенсационной обмотки двигателя.

Индуктивность якорной цепи на линейном участке кривой намагничивания двигателя может быть определена измерением активного и полного сопротивления цепи на переменном токе промышленной частоты 50 Гц (рис. 8-10).

$$L=\frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2-\left(\frac{P}{I^2}\right)^2}}{2\pi f},$$

где U, I — действующее значение напряжения и тока; f — частота; P — активная мощность.

Пренебрегая активной составляющей падения напряжения получаем:

$$L = \frac{U}{I \cdot 2\pi f}.$$

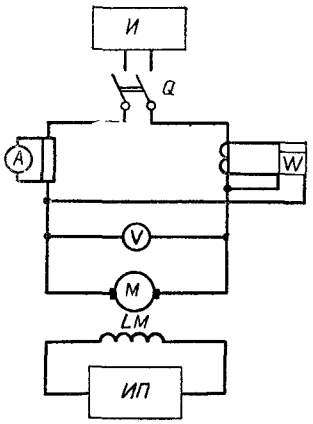


Рис. 8-40. Определение индуктивности якорной цепи на переменном токе.

И — источник переменного тока; *ИП* — регулируемый источник постоянного тока.

6. Определение динамических параметров якорной цепи по частотной характеристике. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает изменение амплитуды колебаний частоты вращения двигателя при изменении задающей частоты колебаний. Чтобы получить амплитудно-частотную характеристику, например для схемы управляемый выпрямитель — двигатель, на вход системы сеточного управления преобразователя подается синусоидальный сигнал заданной частоты. С помощью пикового вольтметра на выходе тахогенератора измеряется амплитуда колебаний частоты вращения.

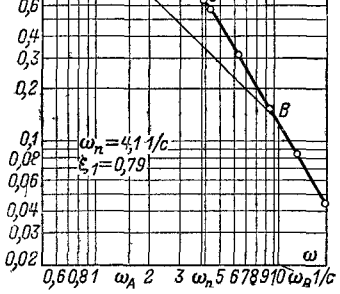


Рис. 8-41. Амплитудно-частотная характеристика двигателя в логарифмическом масштабе.

На рис. 8-41 представлена амплитудно-частотная характеристика в логарифмическом масштабе. На характеристике выберем две точки A и B таким образом, чтобы прямая, проходящая через эти точки, имела наклон 45°. Соответствующие точкам A и B значения частоты обозначим ω_A и ω_B. Недемпфированная частота ω_n определяется делением пополам отрезка $AB = \lg \omega_B - \lg \omega_A$. Коэффициент демпфирования ξ определяется по вертикальному отрезку CD. Отрезок считается положительным, если точка характеристики C располагается ниже точки D,

$$CD = \lg 2\xi.$$

Отсюда определяется величина ξ.

7. Определение момента инерции. Момент инерции электропривода можно определить разными способами. Рассмотрим некоторые из них.

а) Метод свободного выбега, основанный на том, что вся кинетическая энергия, запасенная во вращающихся частях отключенного от сети привода, расходуется за время самоторможения τ на покрытие потерь холостого хода (х. х.)

$$J\frac{\omega^2}{2} = \int_0^{\tau} P_x\, d\tau, \qquad (8\text{-}12)$$

где J — момент инерции привода; ω — угловая скорость $\left(\omega = \frac{\pi n}{30}\right)$ привода в начале торможения, рад/с; P_x — мощность потерь х. х.

Для данного привода экспериментально снимаются кривая $\omega = f(t)$ падения угловой скорости во время самоторможения (из опыта свободного выбега), где t — текущее время, и кривая $P_x = \varphi(\omega)$ — изменения мощности потерь х. х., по которым строится зависимость $P_x = \psi(t)$ — мощности потерь х. х. от времени торможения. Графическое интегрирование этой кривой определяет работу A, затраченную на преодоление потерь и равную правой части уравнения (8-12), что позволяет вычислить значение момента инерции

$$J = \frac{2A}{\omega^2}.$$

Если снимается только часть кривых за время между τ_1 и τ_2 при начальной ω_1 и конечной ω_2 угловых скоростях, то изменяются пределы интегрирования и (8-12) принимают вид

$$J\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} = \int_{\tau_2}^{\tau_1} P_x\, d\tau.$$

Рассмотренный метод является одним из наиболее точных, однако практическое применение его ограничено сложностью графического интегрирования. По этой причине отдается предпочтение упрощенной методике. Она основывается на том, что при самоторможении привода его динамический момент все время уравновешивается моментом потерь х. х.

$$J\frac{d\omega}{d\tau} = M_x. \qquad (8\text{-}13)$$

Значение производной в уравнении (8-13) находят графически построением касательной к кривой выбега $\omega=f(t)$ при данной угловой скорости ω (рис. 8-42). Пересечение с осью абсцисс этой касательной и перпендикуляра, опущенного из точки касания, определяет так называемое условное время выбега T, с учетом которого

$$\frac{d\omega}{d\tau}=\frac{\omega}{T}.$$

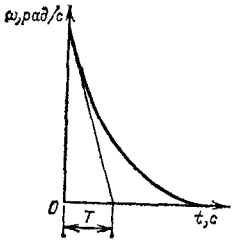


Рис. 8-42. Графическое построение касательной к кривой выбега $\omega=f(t)$.

Для начальной точки кривой выбега величины M_x при угловой скорости ω находят по параметрам х. х. привода перед его отключением

$$M_x=\frac{r_x}{\omega}. \qquad (8\text{-}14)$$

Из (8-13) и (8-14) получают

$$J=P_x\frac{T}{\omega^2}.$$

Приближенный характер данной методики определения J обусловлен неопределенностью положения касательной к кривой выбега. Для повышения точности расчет J выполняют для нескольких точек кривой $\omega=f(t)$ и рассчитывается средний результат.

б) В системах подчиненного регулирования можно сформировать постоянный динамический ток. На осциллограмме частоты вращения, снятой при разгоне привода, может быть указан такой участок, где частота вращения изменяется по линейному закону. Тогда, кг·м²,

$$J=\frac{9{,}55c_M\Phi}{\Delta n}I_{дин}\Delta t,$$

где $\Delta n=n_2-n_1$ — перепад частоты вращения на линейном участке за время Δt, об/мин; $I_{дин}$ — динамический ток, определяемый на осциллограмме тока, А; $c_M\Phi$ — постоянная двигателя, В·с.

в) Момент инерции можно определить, пользуясь формулой (8-2),

$$J=\frac{T_{эм}(c_M\Phi)^2}{R_{я,ц}},$$

где $c_M\Phi$ определяется по (8-3); $T_{эм}$ и $R_{я,ц}$ определяются опытным путем по методикам, описанным выше .

Изложенные способы позволяют выбрать тот или иной способ в зависимости от конкретных требований и условий.

Если привод, например, не имеет тахогенератора, то постоянные времени определяются по осциллограммам якорного тока при неподвижном и вращающемся двигателе.

Для контроля динамические параметры якорной цепи целесообразно определить несколькими способами.

8-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

1. Динамические параметры цепи возбуждения. Схема замещения цепи возбуждения машин постоянного тока приведена на рис. 8-43.

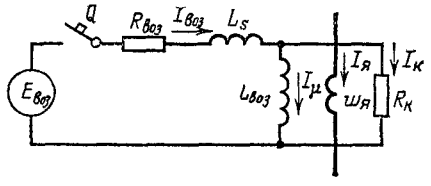


Рис. 8-43. Схема замещения цепи возбуждения машины постоянного тока.

Эквивалентное активное сопротивление цепи возбуждения $R_{воз}$ является суммой сопротивления обмотки возбуждения, сопротивления проводов и внутреннего сопротивления источника питания. Если питание обмотки возбуждения осуществляется от выпрямительного устройства, то в сумму эквивалентного сопротивления входит сопротивление, учитывающее анодное перекрытие преобразователя.

Индуктивность основного потокосцепления $L_{воз}$ учитывает составляющую общего потока обмотки возбуждения, сцепленную с якорем машины. Ее значение существенно зависит от характера насыщения магнитопровода. Для обмотки возбуждения с полюсами, соединенными последовательно, индуктивность, Гн, определяется

$$L_{воз}=2pw_{воз}\frac{\Delta\Phi}{\Delta I_{воз}},$$

где $w_{воз}$ — число витков одного полюса; $2p$ — число полюсов; $\Delta\Phi$ и $\Delta I_{воз}$ — приращение потока, Вб, и тока возбуждения, А, на рассматриваемом участке кривой намагничивания.

Если кривая намагничивания задана в виде зависимости э. д. с. машины от тока возбуждения $E=f(I_{воз})$ при постоянной фиксированной частоте вращения $n_{фик}$, индуктивность обмотки возбуждения

$$L_{воз}=\frac{120aw_{воз}\Delta E}{n_{фик}N\Delta I_{воз}},$$

где a — число пар параллельных ветвей якоря; N — число проводников якоря.

Индуктивность L_s представляет собой сумму индуктивности рассеяния, характеризующей ту часть потока обмотки возбуждения, которая не сцеплена с якорем машины, и индуктивности источника питания $L_п$.

По данным электромашиностроительных заводов поток рассеяния обмотки возбуждения

принимается равным 18 % номинального значения основного потокосцепления

$$L_s = 2pw_{\text{воз}} \frac{0{,}18\Phi_{\text{н}}}{I_{\text{воз.н}}} + L_{\text{п}}.$$

Индуктивность рассеяния от насыщения практически не зависит.

Сопротивление $R_{\text{к}}$ характеризует демпфирующее действие вихревых токов, которые наводятся в магнитопроводе электрической машины. Рассматриваемая схема замещения (рис. 8-43) достаточно точно описывает процессы для электрических машин с шихтованным ярмом.

Трудность математического описания влияния вихревых токов в машинах с нешихтованным ярмом состоит в том, что вихревые токи протекают не в каких-либо определенных контурах, а распределяются с неодинаковой плотностью по различным направлениям во всем объеме массивного стального ярма.

Для машин с нешихтованным ярмом эквивалентное сопротивление вихревых токов приближенно может быть определено по формуле

$$R_{\text{к}} = \frac{\pi\rho}{4\Delta}\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right) w_{\text{воз}}^2,$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление стали, равное $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см; a, b — размеры поперечного сечения ярма станины, см; Δ — половина эквивалентной длины части силовой линии, проходящей по нешихтованной части магнитопровода (длина $АБ$ на рис. 8-44), см.

Постоянная времени контура вихревых токов для нешихтованного ярма

$$T_{\text{к}} = \frac{4\Delta ab}{\pi\rho\delta\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)},$$

где $\delta = \delta_0 + \frac{\Delta_1}{\mu}$; μ — магнитная проницаемость стали; Δ_1 — половина длины силовой линии, проходящей по железу ($А$, $Б$, $В$, $Г$ на рис. 8-44); δ_0 — воздушный зазор.

В соответствии со схемой замещения (рис. 8-43) динамика тока возбуждения и магнитного потока описывается следующими передаточными функциями:

$$H_1(p) = \frac{I_{\text{воз}}}{U_{\text{воз}}} = \frac{\frac{T_{\text{к}}p + 1}{R_{\text{воз}}}}{T_{\text{к}}T_s p^2 + (T_{\text{к}} + T_{\text{воз}} + T_s)p + 1} = \frac{\frac{T_{\text{к}}p + 1}{R_{\text{воз}}}}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1};$$

$$H_2(p) = \frac{C}{T_{\text{к}}p + 1},$$

где $C = d\Phi/dt$ — тангенс угла наклона кривой намагничивания;

$$T_1 T_{\text{я}} = T_{\text{к}} T_s; \quad T_1 + T_2 = T_{\text{к}} + T_{\text{воз}} + T_s;$$

$T_{\text{воз}} = L_{\text{воз}}/R_{\text{воз}}$ — постоянная времени основного потокосцепления; $T_{\text{к}} = L_{\text{воз}}/R_{\text{к}}$ — постоянная времени контура вихревых токов; $T_s = L_s/R_{\text{воз}}$ — постоянная времени потока рассеяния.

При определенных условиях на динамику процессов цепи возбуждения оказывает влияние реакция якоря, проявляющееся в том, что при всяком изменении якорного тока в цепи обмотки возбуждения наводится электро-

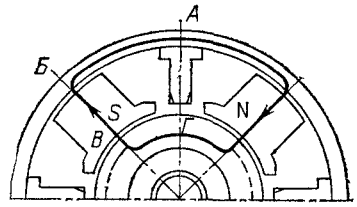


Рис. 8-44. Магнитная система машины постоянного тока.

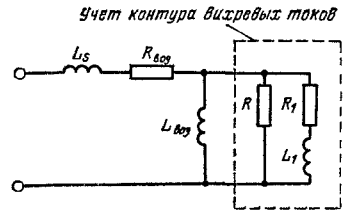


Рис. 8-45. Схема замещения цепи возбуждения машины постоянного тока с уточненным контуром вихревых токов.

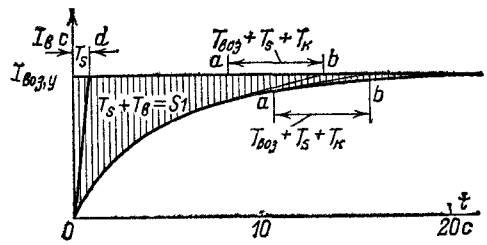


Рис. 8-46. Осциллограмма тока возбуждения двигателя типа 2МП-8500-250.

движущая сила, вызывающая изменение тока возбуждения. Результирующий эффект действия реакции якоря может быть приближенно оценен некоторой м. д. с. $w_{\text{р}}I_{\text{я}}$ ($I_{\text{я}}$ — ток якоря, $w_{\text{р}}$ — эквивалентные витки реакции якоря).

Для машин с нешихтованным ярмом рассмотренная схема замещения (рис. 8-43) может быть уточнена добавлением еще одной ветви, шунтирующей индуктивность основного потокосцепления (рис. 8-45).

2. Экспериментальное определение динамических параметров цепи возбуждения. Существует ряд способов экспериментального определения динамических параметров цепи возбуждения.

1. Первый способ пригоден для двигателей и генераторов постоянного тока. В цепи

обмотки возбуждения неподвижной машины или (для генераторов) в условиях установившейся частоты вращения осциллографируется ток возбуждения при мгновенном подключении источника напряжения к цепи возбуждения.

В качестве источника напряжения должен использоваться генератор, мощность которого значительно больше мощности обмотки возбуждения для исключения влияния параметров генератора.

По осциллограмме тока возбуждения рис. 8-46 для схемы замещения (рис. 8-43)

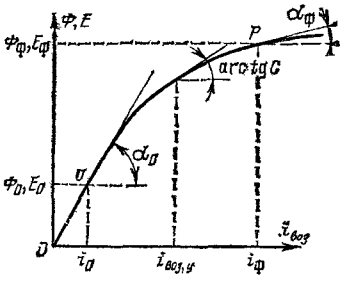


Рис. 8-47. Кривая намагничивания $\Phi=f(i_{воз})$; $E=\varphi(i_{воз})$.

определяются параметры цепи. Площадь осциллограммы, заключенная между линией установившегося значения и кривой тока возбуждения, численно равна $T_s+T_{воз}$ (установившееся значение тока принимается за единицу). Проводится касательная в начальной точке кривой нарастания тока возбуждения. Отрезок *cd*, отсекаемый касательной на линии установившегося значения, равен T_s. На достаточном удалении от начала координат проводится касательная к кривой тока возбуждения. Отрезок *ab*, отсекаемый этой касательной на линии установившегося значения, приблизительно равен $T_{воз}+T_s+T_к$.

Точка считается достаточно удаленной, если отрезки, отсекаемые касательными в точках, расположенных за рассматриваемой точкой, равны между собой.

Если величина $T_s+T_{воз}=s_1$ определяется достаточно точно по осциллограмме, то раздельное определение T_s и $T_{воз}$ затруднительно из-за неточностей, связанных с определением T_s. Определение T_s и $T_{воз}$ можно выполнить по соотношениям, полученным из многочисленных экспериментальных данных на заводах электропромышленности,

$$T_{воз}=\frac{s_1}{1+K};\quad T_s=KT_{воз};$$

$$K=0{,}18\frac{\Phi_н}{\Phi_1}\frac{I_1}{I_н}=0{,}18\frac{E_н}{E_1}\frac{I_1}{I_н},$$

где $E_н$ и $\Phi_н$ — номинальные значения э. д. с. и магнитного потока двигателя; E_1 и Φ_1 — установившиеся значения э. д. с. и магнитного потока двигателя при осциллографировании.

По этим данным могут быть определены $T_{воз}$, T_s, $T_к$. Значение тока возбуждения при проведении опыта должно соответствовать линейному участку кривой намагничивания. Далее $T_{воз}$, T_s, $T_к$ должны быть скорректированы для фактического тока возбуждения в соответствии с кривой намагничивания реальной схемы питания цепи возбуждения (рис. 8-47)

$$T_{s,ф}=\frac{L_s+L_п}{R_{воз}+R_п};\quad T_{к,ф}=T_к\frac{\operatorname{tg}\alpha_ф}{\operatorname{tg}\alpha_0};$$

$$T_{воз,ф}=T_{воз}\frac{R_{воз}}{R_{воз}+R_п}\frac{\operatorname{tg}\alpha_ф}{\operatorname{tg}\alpha_0},$$

где $L_п$, $R_п$ — индуктивность и активное сопротивление источника питания; α_0 — угол наклона кривой намагничивания во время опыта; $\alpha_ф$ — угол наклона кривой намагничивания в рабочей точке.

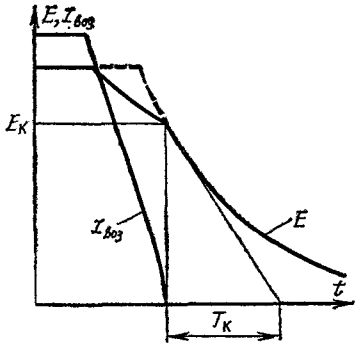


Рис. 8.48. Осциллограмма э. д. с. и тока возбуждения при размыкании цепи возбуждения.

2. Второй способ определения постоянной времени вихревых токов $T_к$ в соответствии со схемой замещения (рис. 8-43) пригоден для генераторов и двигателей. Для генераторов устанавливается ток возбуждения, соответствующий линейному участку кривой намагничивания. Осциллографируется э. д. с. генератора при резком отключении обмотки возбуждения от источника питания. На кривой спада э. д. с. (рис. 8-48) находят такой участок, где касательные в разных точках отсекают на оси ординат практически равные отрезки (относительно проекции точки касания). Длина такого отрезка принимается за значение $T_к$.

Этот опыт можно проводить и для двигателя при работе его на выбеге (обмотка возбуждения и цепь якоря двигателя отключены). Если момент трения мал, то за время эксперимента снижение частоты вращения можно не учитывать.

С помощью снятой осциллограммы (рис. 8-48) можно определить параметры контура вихревых токов в соответствии со схемой замещения цепи возбуждения машины постоянного тока с уточненным контуром вихревых токов (рис. 8-45). Снятая кривая э. д. с. рассматривается в виде двух экспонент

$$E=C_1e^{-\frac{t}{T_1}}+C_2e^{-\frac{t}{T_2}}.$$

При этом

$$\left.\begin{aligned} T_1 + T_2 &= T_{к1} + T_{к2} + T_{кз}\ ; \\ T_1 T_2 &= T_{к1} T_{к2}; \\ -\frac{C_1}{T_1} - \frac{C_2}{T_2} &= -\frac{E(0)}{T_{к1}}\ ; \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}15)$$

где $T_{к1} = \frac{L_{воз}}{R}$; $T_{к2} = \frac{L_1}{R_1}$;

$$T_{кз} = \frac{L_{воз}}{R_1};$$

C_1, C_2, T_1, T_2 определяются экспериментально. Для этого полученная осциллограмма э. д. с. (рис. 8-48) строится в полулогарифмическом масштабе на рис. 8-49.

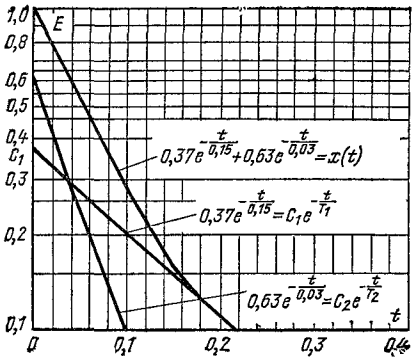


Рис. 8-49. Осциллограмма спада э. д. с. в полулогарифмическом масштабе.

Начальное значение э. д. с. принято за единицу $E(0)=1$. Начиная с какого-то времени осциллограмма рис. 8-49 принимает прямолинейный характер. Продолжив прямолинейную часть до пересечения с осью ординат, находим C_1.

Тангенс угла наклона равен

$$\frac{\lg e}{T_1} = \frac{\lg x_1(t_2) - \lg x_1(t_1)}{t_2 - t_1},$$

где $x_1(t_1)$, $x_1(t_2)$ — ординаты выделенной экспоненты при t_1 и t_2.

Вычитая из ординат осциллограммы $x(t)$ рис. 8-49 ординаты экспоненты $C_1 e^{-\frac{t}{T_1}}$, получаем прямую линию, отображающую вторую экспоненту $C_2 e^{-\frac{t}{T_2}}$ в полулогарифмическом масштабе.

Аналогично предыдущему определяем ее начальное значение C_2 и соответствующую постоянную времени T_2.

Решая систему уравнений (8-15), можно определить $T_{к1}$, $T_{к2}$, $T_{кз}$, а зная величину $L_{воз}$, можно определить L_1, R_1, R.

3. Третий способ определения эквивалентных витков реакции якоря пригоден для двигателей постоянного тока любой мощности при работе на любом участке кривой намагничивания.

Для определения эквивалентных витков реакции якоря двигателя выполняется опыт включения якорной цепи к источнику питания с фиксированным напряжением при номинальном токе возбуждения двигателя (рис. 8-50).

Одновременно осциллографируется ток якоря $i_я$, ток возбуждения двигателя $i_{воз,д}$, напряжение генератора $u_г$.

По осциллограмме якорного тока $i_я$ и приращения тока возбуждения $\Delta i_{воз}$ (рис. 8-51) можно определить эквивалентные витки реакции якоря в следующей последовательности:

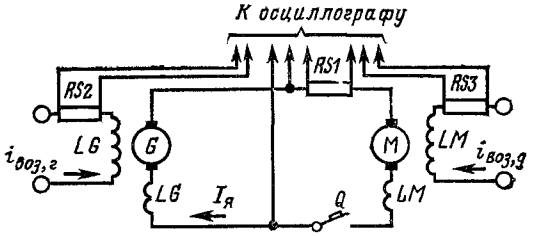


Рис. 8-50. Схема определения эквивалентных витков реакции якоря.

а) графически определяется площадь, ограниченная кривой якорного тока и осью абсцисс,

$$\sum_{j=0}^{m} i_{я,j}\,\Delta t,$$

где m — число шагов разбиения при графическом суммировании;

б) графическим суммированием строится кривая

$$f(t) = \sum_{i=0}^{i} \Delta i_{воз\ i}\,\Delta t,$$

где $\Delta i_{воз,i}$ — отклонение тока возбуждения от установившегося;

в) графическим суммированием определяется площадь, ограниченная кривой $f(t)$ и линией установившегося значения тока возбуждения $i_{воз,у}$,

$$\sum_{j=0}^{n} f(t)_j\,\Delta t,$$

где n — число шагов разбиения при графическом суммировании;

г) по данным пп. «а» и «в» определяется число эквивалентных витков реакции якоря по формуле

$$w_р = \frac{R_{воз} \sum_{j=0}^{n} f(t)_j\,\Delta t}{2p\omega_{воз} C \sum_{j=0}^{m} i_{я,j}\,\Delta t},$$

где $R_{воз}$ — сопротивление цепи возбуждения, Ом; Δt — интервал разбиения, с; p — число

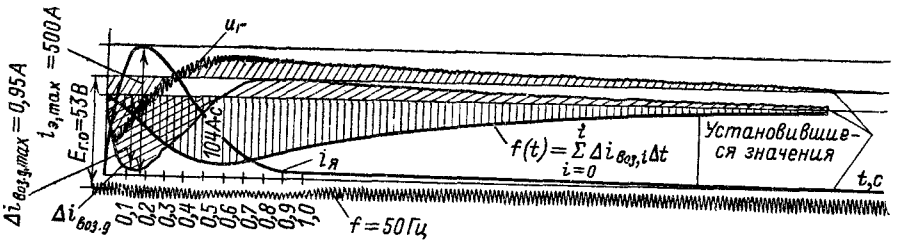


Рис. 8-51. Осциллограмма переходного процесса при включении якорной цепи.

пар полюсов; $w_{воз}$ — число витков одного полюса; C — тангенс угла наклона кривой намагничивания (рис. 8-47) в точке, соответствующей току возбуждения $i_{воз,у}$, Вб/А.

4. Четвертый способ определения реакции якоря применяется только к генератору при работе его на линейном участке кривой намагничивания. Необходимо иметь осциллограммы э. д. с. генератора, напряжения на зажимах генератора и тока якоря, снятых при замыкании якорной цепи (рис. 8-50).

Графическим суммированием элементарных площадей определяется площадь, ограниченная кривой якорного тока и осью абсцисс, $\sum_0^n i_я \Delta t$ и площадь, заключенная между кривой э. д. с. генератора и кривой напряжения на зажимах двигателя,

$$\sum_0^n (E_{г,0} - u_г)\,\Delta t;$$

$$w_{р,г} = \frac{-\sum_0^n (E_{г,0} - u_г)\,\Delta t}{k_1 \sum_0^n i_я\,\Delta t} + \frac{R_г}{k_1},$$

где $R_г$ — активное сопротивление цепи возбуждения, Ом; $\operatorname{tg}\alpha_1 = k_1$ — тангенс угла наклона кривой холостого хода на линейном участке (рис. 8-47), В/А.

8-7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

1. **Электромашинный усилитель.** При выполнении наладочных работ возникает необходимость уточнения динамических параметров электромашинного усилителя. Наиболее просто определение динамических параметров осуществляется с помощью переходных характеристик напряжения усилителя, снятых при работе усилителя на холостом ходу и в режиме работы на активную нагрузку.

В режиме работы на холостом ходу структурная схема электромашинного усилителя представляется двумя инерционными звеньями, охваченными жесткой отрицательной обратной связью (рис. 8-52). Первое инерционное звено включает в себя обмотки управления *LA1* и компенсационную *LA*, второе — короткозамкнутую цепь усилителя. Жесткая отрицательная обратная связь обусловлена действием размагничивающего потока, который вызывается потерями в стали якоря, замедленной коммутацией тока и сдвигом щеток в короткозамкнутой цепи.

В режиме работы на активную нагрузку в электромашинном усилителе дополнительно проявляется действие размагничивающих потоков за счет неполной компенсации реакции якоря, рассеивания компенсационной обмотки и лобовых частей обмотки якоря.

В связи с этим в структурной схеме электромашинного усилителя (рис. 8-53) дополнительно появляются жесткая и гибкая отрицательные обратные связи. Коэффициент жесткой обратной связи x_1 зависит от нагрузки и степени компенсации реакции якоря; коэффициент гибкой обратной связи x_2 практически от этих параметров не зависит.

Динамическими параметрами электромашинного усилителя являются: коэффициенты усиления k_A и постоянные времени T_A всех обмоток управления и компенсационной обмотки, коэффициент усиления k_q и постоянная времени T_q короткозамкнутой цепи усилителя, коэффициенты отрицательных обратных связей x_0, x_1, x_2.

Определение k_A и T_A производится по схеме рис. 8-54, причем по этой схеме определяется T_{A1} для обмотки управления *LA1* и k_{A2} для обмотки управления *LA2*. Поперечная цепь усилителя разомкнута и подключена к вольтметру *PV2* и осциллографу, накоротко замкнута обмотка *LA1*. Коэффициент усиления $k_{A2}=\Delta E_q/\Delta U_{A2}$. Величины ΔE_q и ΔU_{A2} определяются непосредственным измерением приращения напряжений с помощью вольтметров *PV2* и *PV1*. Постоянная времени T_{A1} определяется графически из осциллограммы спадания э. д. с. E_q при отключении цепи управления рубильником *S*. Для устранения влияния индуктивности обмотки *LA2* последовательно с ней включено активное сопротивление $R_{доп}$, значение которого больше чем в 10 раз превосходит сопротивление самой обмотки.

Постоянные времени остальных обмоток управления определяют аналогично, причем накоротко замыкается только та обмотка, для которой определяется постоянная времени. Постоянная времени компенсационной обмотки *LA* определяется при шунтирующем сопротивлении $R_ш$, установленном при наладке для компенсации реакции якоря.

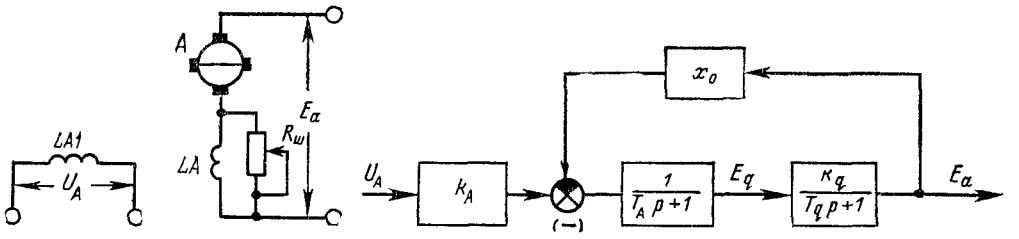


Рис. 8-52. Структурная схема электромашинного усилителя при холостом ходе.
k_A — коэффициент усиления по напряжению первого инерционного звена; T_A — суммарная постоянная времени обмоток управления и компенсационной; E_q — э. д. с. короткозамкнутой цепи; k_q — коэффициент усиления по напряжению второго инерционного звена; T_q — постоянная времени короткозамкнутой цепи; x_0 — коэффициент отрицательной обратной связи по напряжению.

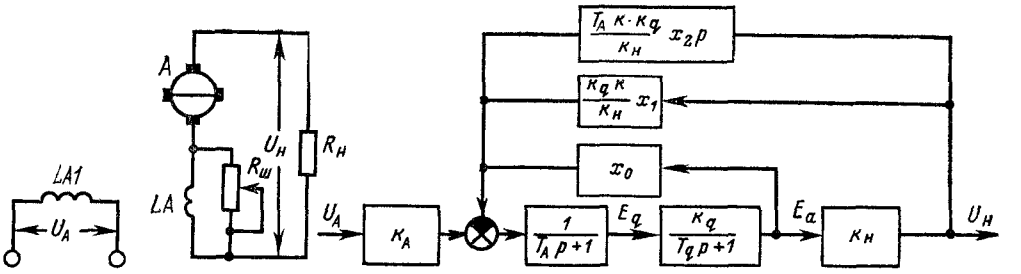


Рис. 8-53. Структурная схема электромашинного усилителя при активной нагрузке.
$k_н$ — коэффициент; $k_н = \frac{R_н}{R_a + R_к + R_{д,п} + R_н}$, где $R_н$, R_a, $R_к$, $R_{д,п}$ — сопротивление соответственно нагрузки, обмоток якоря и переходного контакта щеток, компенсационной и дополнительных полюсов усилителя; k — коэффициент; $k = \frac{R_a}{R_a + R_к + R_{д,п} + R_н}$; x_1, x_2 — коэффициенты соответственно жесткой и гибкой отрицательных обратных связей по напряжению.

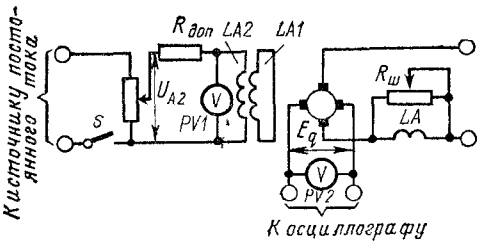


Рис. 8-54. Схема для определения k_A и T_A.

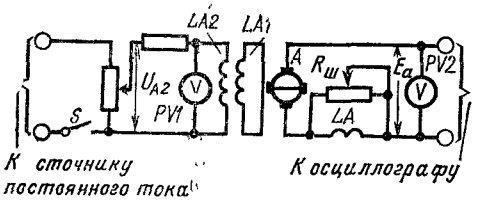


Рис. 8-55. Схема для определения k_q, T_q и x_0.

Для нахождения k_q, T_q и x_0 снимается осциллограмма спадания э. д. с. E_a по схеме рис. 8-55 при отключении цепи управления рубильником S, причем может быть использована любая обмотка управления. На оси ординат осциллограммы (см. рис. 8-56) от-

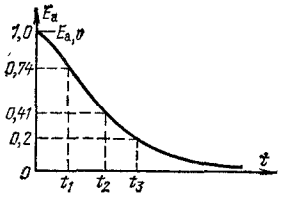


Рис. 8-56. Осциллограмма спадания э. д. с. E_a при отключении цепи питания обмотки управления.

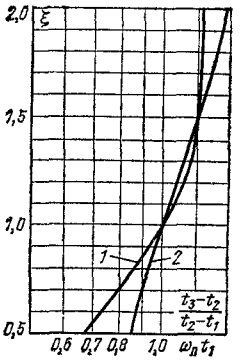


Рис. 8-57. Зависимости:

$1 - \xi = f\left(\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}\right)$;

$2 - \xi = f(\omega_n t_1)$.

кладывают отрезки, равные 0,2; 0,41 и 0,74 начального значения E_{a0}, и определяют соответствующие им значения t_3, t_2 и t_1. По отношению $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$ из кривой *1* рис. 8-57 определяют ξ_0 и по кривой *2* для найденного значения ξ_0 находят $\omega_{n0} t_1$, затем $\omega_{n0} = \omega_{n0} t_1 / t_1$.

В теории автоматического регулирования параметр ξ называется коэффициентом демп-

фирования, параметр ω_n — угловой частотой недемпфированных колебаний.

Для нахождения k_q, T_q, x_0 пользуются формулами

$$T_q = \frac{T_A}{2\omega_{n,0}\,\xi_0 T_A - 1};$$

$$k_q = \frac{k_0\,\omega_{n,0}^2\,T_y\,T_q}{k_{A1}};$$

$$x_0 = \frac{\omega_{n.0}^2\,T_A T_q - 1}{k_q};\quad k_0 = \frac{\Delta E_a}{\Delta U_A};$$

$$T_A = T_{A1} + T_к,$$

где T_{A1}, $T_к$ — постоянная времени первой обмотки управления $LA1$ и компенсационной обмотки LA соответственно.

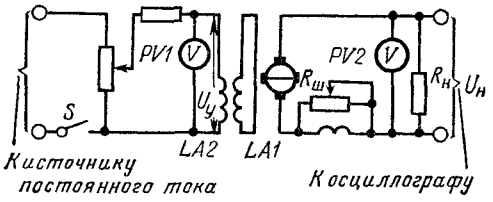


Рис. 8-58. Схема для определения x_1 и x_2.

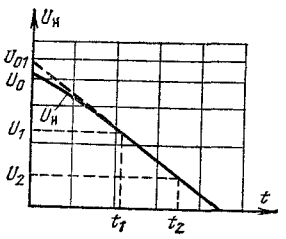


Рис. 8-59. Осциллограмма спадания напряжения электромашинного усилителя при отключении цепи питания обмотки управления.

Для определения коэффициентов обратных связей x_1 и x_2 используется осциллограмма спадания напряжения $U_н$ электромашинного усилителя, снятая по схеме рис. 8-58 при работе усилителя на активное сопротивление нагрузки, равное сопротивлению нагрузки налаживаемой схемы. Осциллограмму строят в полулогарифмическом масштабе (рис. 8-59). При достаточно больших значениях времени t график имеет вид прямой. Эту прямую продолжают до пересечения с осью ординат (точка U_{01}). На линейной части кривой $U_н$ произвольно выбирают два значения напряжения U_1 и U_2; определяют соответствующие им значения t_1 и t_2.

Эквивалентные постоянные звеньев усилителя T_1 и T_2 определяют по формулам

$$T_2 = \frac{t_2 - t_1}{\ln U_2 - \ln U_1};\quad T_1 = T_2\frac{U_{01} - U_{02}}{U_{01}}.$$

Искомые x_1 и x_2 определяют по формулам

$$x_1 = \frac{T_A T_q\left(\omega_n^2 - \omega_{n0}^2\right)}{kk_q^2};$$

$$x_2 = \frac{T_q\left(2\xi\omega_n - 2\xi_0\,\omega_{n,0}\right)}{kk_q^2};$$

$$\omega_n^2 = \frac{\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)^2}{4};$$

$$2\xi\omega_n = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}.$$

При работе электромашинного усилителя на нагрузку возникающие внутренние отрицательные обратные связи влияют на переходный процесс в противоположных направлениях: жесткая связь уменьшает эквивалентные постоянные усилителя, гибкая — увеличивает.

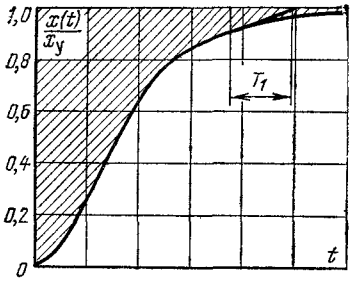


Рис. 8-60. Переходная характеристика звена высокого порядка.

2. **Приближенное определение постоянных времени звеньев высокого порядка.** Описываемый метод применим при условии: звено линейно, переходная характеристика звена монотонна, известен порядок звена.

Линейное звено n-го порядка, имеющее монотонную переходную характеристику, может быть аппроксимировано n последовательно соединенными звеньями первого порядка. Каждое такое звено имеет свою постоянную времени T_i. Монотонная переходная функция (характеристика) звена n-го порядка может быть представлена в виде

$$x(t) = x_y\left(1 - \sum_{i=1}^{n} A_i\,e^{-\frac{t}{T_i}}\right).$$

Площадь, ограниченная кривой переходной характеристики звена высокого порядка, осью ординат и прямой x_y (на рис. 8-60 заштрихована), пропорциональна сумме постоянных времени звеньев первого порядка

$$\sum_{i=1}^{n} T_i = \frac{S}{m_t\,m_x\,x_y},$$

где m_t — масштаб времени; m_x — масштаб выходной величины x.

Приближенное значение постоянных времени, когда истинные значения их ненамного отличаются друг от друга, находится как

$$T = \sum_{i=1}^{n} T_i/n.$$

При большом различии истинных значений постоянных времени сначала выделяется наибольшая постоянная времени T_1, затем определяются остальные постоянные как

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i - T_1}{n-1}.$$

В области $x(t) \geqslant 0{,}9x_y$ постоянная времени T_1 звеньев первого порядка имеет наибольшее значение и определяется методом касательной, проведенной через точку характеристики в этой области.

Для повышения точности расчета целесообразно находить T_1 как среднее арифметическое значение тангенса угла наклона нескольких касательных, проведенных через разные точки кривой $x(t)$.

8-8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

В линеаризованных автоматических системах регулирования под динамическими параметрами понимаются коэффициенты дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы привода. Динамические параметры звеньев, к которым в основном относятся постоянные времени, могут быть определены по экспериментально снятым частотным характеристикам. В зависимости от используемой аппаратуры могут сниматься амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики или только амплитудно-частотные характеристики. Построение экспериментально снятых частотных характеристик удобнее всего производить в полулогарифмическом масштабе (масштаб по оси ординат линейный, по оси абсцисс логарифмический); по оси абсцисс откладывается текущее значение частоты ω, 1/с, по оси ординат — значения $L(\omega) = 20 \lg k$, дБ, для логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) и $\varphi(\omega)$ в электрических градусах — для логарифмической фазочастотной характеристики (ЛФЧХ) (k — экспериментально найденное отношение амплитуд выходного и входного сигналов, а φ — разность фаз этих сигналов при фиксированных значениях частоты ω).

Для минимально-фазовых звеньев, как известно, существует однозначная зависимость между ЛАЧХ и ЛФЧХ, что позволяет определять динамические параметры звеньев, используя только ЛАЧХ.

На рис. 8-61 приведена упрощенная структурная схема экспериментального определения частотных характеристик звена. На вход исследуемого звена *ИЗ* от инфранизкочастотного генератора переменного тока *ГС* с регулируемой частотой и амплитудой подается синусоидальное напряжение U_1. При изменении частоты входного сигнала измеряются амплитуда выходного напряжения U_2 и его фазовый сдвиг φ относительно входного напряжения при каждом фиксированном значении частоты генератора ω. Измерение частоты производится частотомером *Hz*, амплитуды входного и выходного сигналов — соответственно пиковыми вольтметрами *PV1* и *PV2* или с помощью электронного осциллографа, разность фаз — фазометром φ или также с помощью электронного осциллографа. Зависимости $U_{2max}/U_{1max} = f_1(\omega)$ и $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = f_2(\omega)$ позволяют построить ЛАЧХ и ЛФЧХ исследуемого звена. Здесь ω — угловая частота напряжения генератора *ГС*, подаваемого на вход *ИЗ*.

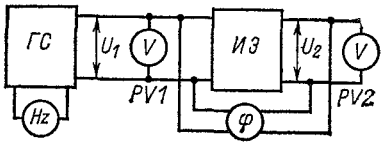


Рис. 8-61. Упрощенная структурная схема экспериментального определения частотных характеристик звена.

Путем аппроксимации экспериментально снятых ЛАЧХ могут быть найдены частоты сопряжения ω_c асимптотических характеристик, по которым определяются постоянные времени *ИЗ* $T = 1/\omega_c$. По экспериментально снятым ЛФЧХ найденные значения частот сопряжения ω_c могут быть уточнены.

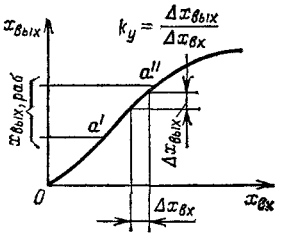


Рис. 8-62. Статическая характеристика исследуемого звена.

Ниже приводятся рекомендации по экспериментальному определению частотных характеристик.

1. Экспериментальное определение частотных характеристик целесообразно проводить одновременно со снятием статических характеристик отдельных звеньев или системы регулирования.

2. Частотные характеристики должны сниматься в рабочей зоне статической характеристики (например, участок $a'a''$ на рис. 8-62). Если статическая характеристика в рабочей зоне существенно нелинейна, т. е.

$$k_y = \frac{\Delta x_{вых}}{\Delta x_{вх}} \neq \text{const},$$

то производится ее линеаризация и частотная характеристика снимается для каждого линеаризованного участка в отдельности. В этом случае постоянная времени звена будет определяться для каждого участка статической характеристики звена.

3. При определении частотной характеристики на вход звена должны подаваться сиг-

налы такой амплитуды, чтобы колебания напряжения на выходе звена находились в пределах линейной зоны, для которой справедливо равенство $k_y = \text{const}$.

4. Если исследуемое звено имеет несколько входов, эквивалентное сопротивление которых влияет на его динамические параметры, то для этих входов следует создать режим, близкий к рабочему. Так, например, неиспользуемые при эксперименте обмотки управления магнитных усилителей должны быть подключены к активным сопротивлениям, эквивалентным установленным в рабочей схеме.

5. К исследуемому звену должна быть подключена рабочая нагрузка.

6. Если мощность генератора сигналов, используемого для снятия частотных характеристик, недостаточна для исследуемого звена, снимается частотная характеристика группы последовательно соединенных звеньев (включая необходимое звено) и частотная характеристика вспомогательных звеньев; при этом мощность входа первого из вспомогательных звеньев не должна превышать мощность генератора сигналов. Путем графического вычитания экспериментально снятых характеристик определяется частотная характеристика исследуемого звена.

7. При снятии частотной характеристики группы последовательно соединенных звеньев следует контролировать, чтобы колебания напряжения на выходе каждого звена находились в пределах линейной зоны его статической характеристики.

8. При использовании в качестве измерителя амплитуды электронного осциллографа на его входе рекомендуется установить *RC*-фильтр; постоянная времени должна быть не менее чем на порядок меньше наименьшей ожидаемой постоянной времени исследуемого звена.

Экспериментально снятые частотные характеристики могут быть использованы как для определения динамических параметров звеньев (после аппроксимации ЛАЧХ), так и для анализа и синтеза замкнутых автоматических систем регулирования.

Пусконаладочными управлениями Главэлектромонтажа применяется несколько типов малогабаритных переносных приборов для экспериментального определения частотных характеристик.

1. Измеритель логарифмических частотных характеристик ИЛЧХ-5; разработан Челябинским политехническим институтом. Позволяет определять ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев и автоматических систем регулирования компенсационным методом с помощью встроенных приборов. В результате эксперимента для каждого значения частоты входного сигнала измеряется отношение амплитуд выходного и входного сигналов исследуемого звена в децилогах (десятая часть логарифма, равная 2 дБ) и разность фаз выходного и входного сигналов исследуемого звена в градусах.

Схемой прибора предусмотрено наличие постоянной составляющей напряжения генератора сигналов, позволяющей снимать частотные характеристики в рабочей зоне статической характеристики звена.

Технические данные ИЛЧХ-5.

Диапазон частот генератора сигналов, рад/с	0,625—1280
Амплитуда переменной составляющей выходного напряжения, В	0—8
Постоянная составляющая выходного напряжения, В	0—10
Максимальный ток нагрузки, мА	100
Внутреннее сопротивление, Ом	2—4
Пределы измерений:	
амплитуды, В	0—250
фазы	0—360°
Потребляемая мощность от сети 220 В, 50 Гц, В·А	30
Габариты, мм	180×330×410
Масса прибора, кг	6

2. Генератор инфранизких частот ГИНЧ-2; разработан Свердловским отделением ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. Позволяет определять только ЛАЧХ звеньев и автоматических систем регулирования. Выходное напряжение генератора сигналов кроме синусоидальной имеет также треугольную и прямоугольную форму; также предусмотрено наличие постоянной составляющей напряжения генератора сигналов, позволяющей снимать частотные характеристики в рабочей зоне статической характеристики звена. Для определения частотных характеристик выход ГИНЧ-2 подключается на вход исследуемого звена или системы регулирования. При каждом фиксированном значении частоты синусоидального входного сигнала с помощью электронного осциллографа с послесвечением или с памятью замеряется амплитуда сигналов на входе и выходе исследуемого звена. Для построения ЛАЧХ на график наносится точка $L(\omega) = 20 \cdot \lg k$ (k — отношение амплитуд выходного и входного сигналов).

Технические данные ГИНЧ-2

Диапазон частот генератора, Гц	0,01—100
Амплитуда переменной составляющей выходного напряжения, В	0—10
Постоянная составляющая выходного напряжения, В	0—10
Максимальный ток нагрузки, мА	80
Потребляемая мощность от сети 220 В, 50 Гц, В·А	15
Габариты, мм	340×240×210
Масса прибора, кг	10

3. Генератор командных сигналов ГКС (в микросхемном исполнении); разработан ЛенПЭО ВНИИПЭМ и серийно выпускается Московским опытным заводом электромонтажной техники. Аналогично прибору ГИНЧ-2 позволяет определить только ЛАЧХ звеньев и автоматических систем регулирования. Технические данные ГКС приведены в § 1-14.

Для определения динамических параметров звеньев экспериментально снятые ЛАЧХ должны быть аппроксимированы.

Наиболее точно динамические параметры звеньев определяются при наличии как ЛАЧХ,

так и ЛФЧХ, так как частоты сопряжения аппроксимированных ЛАЧХ соответствуют частоте перегиба ЛФЧХ.

Для звеньев 1-го порядка (апериодических, форсирующих) частоту сопряжения ЛАЧХ ω_c удобно находить по ЛФЧХ; при ω_c фазовый сдвиг $\varphi=45°$. При известном значении ω_c от точки a ЛАЧХ (рис. 8-63) откладывается отрезок ab, равный $\Delta L=3$ дБ. Точка b является точкой сопряжения прямых с наклонами 0 и 20 дБ/дек. При правильно определенной частоте ω_c проведенные прямые с наклонами 0 и 20 дБ/дек должны являться асимптотами экспериментальной ЛАЧХ.

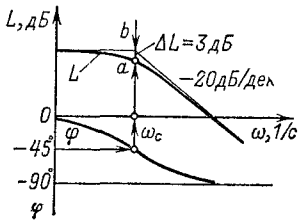


Рис. 8-63. Аппроксимация логарифмической амплитудной частотной характеристики апериодического звена 1-го порядка.

При наличии лишь экспериментальной ЛАЧХ вначале проводится асимптота с наклоном 0 дБ/дек, и на ней находится частота сопряжения ω_c в точке, которая отстоит от экспериментальной ЛАЧХ на $\Delta L=3$ дБ. Из найденной точки проводится прямая с наклоном 20 дБ/дек, которая при правильно найденной ω_c должна быть асимптотой экспериментальной ЛАЧХ.

По найденной для аппроксимированной ЛАЧХ частоте сопряжения ω_c определяется постоянная времени звена $T=\dfrac{1}{\omega_c}$ в секундах.

Для апериодических звеньев 2-го порядка, имеющих передаточную функцию

$$H(p)=\frac{k}{(T_1p+1)(T_2p+1)},$$

аппроксимация ЛАЧХ производится в следующем порядке (рис. 8-64): проводится горизонтальная асимптота ob; точка b определяется из условия отклонения асимптоты ob от экспериментальной ЛАЧХ на $\Delta L_1=3$ дБ; из точки b проводится асимптота bd с наклоном 20 дБ/дек до пересечения с асимптотой dl, проведенной с наклоном 40 дБ/дек; если в точке d $\Delta L_2=3$ дБ, аппроксимацию можно считать удовлетворительной.

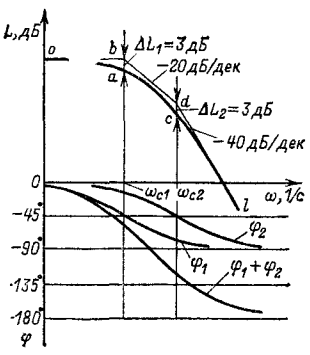


Рис. 8-64. Аппроксимация логарифмической амплитудной частотной характеристики апериодического звена 2-го порядка.

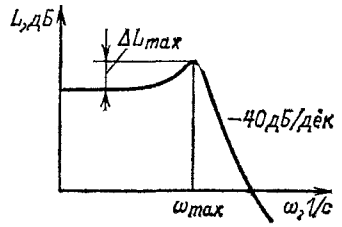


Рис. 8-65. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика колебательного звена.

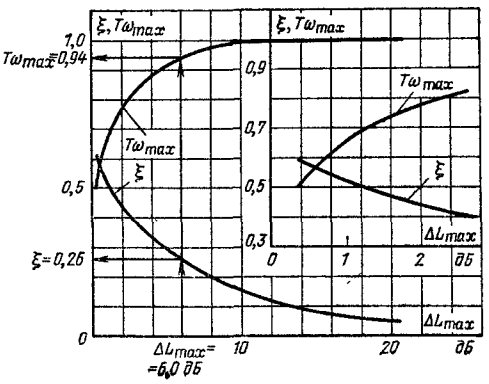


Рис. 8-66. Зависимости $\xi=f(\Delta L_{max})$ и $T\omega_{max}=f(\Delta L_{max})$.

При наличии экспериментальной ЛФЧХ найденные по ЛАЧХ частоты сопряжения ω_{c1} и ω_{c2} могут быть проверены и уточнены. Для этого по найденным значениям ω_{c1} и ω_{c2} с помощью шаблона строятся расчетные ЛФЧХ каждого из апериодических звеньев (шаблон изготовляется из прозрачного материала в том же масштабе частот и градусов, что и экспериментальная ЛФЧХ) и затем методом графического сложения находится расчетная ЛФЧХ апериодического звена 2-го порядка. Если во всем диапазоне частот расчетная ЛФЧХ отличается от экспериментальной не более чем на 5°, то аппроксимацию ЛАЧХ можно считать удовлетворительной. В противном случае найденные значения частот сопряжения уточняются.

По найденным значениям ω_{c1} и ω_{c2} определяются постоянные времени

$$T_1=\frac{1}{\omega_{c1}};\quad T_2=\frac{1}{\omega_{c2}}.$$

Для колебательных звеньев, имеющих передаточную функцию

$$H(p)=\frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1},$$

определяются постоянная времени T и коэффициент демпфирования ξ, который зависит от максимального «всплеска» ЛАЧХ, ΔL_{max}: ΔL_{max} в свою очередь зависит от $T\omega_{max}$, где T — постоянная времени исследуемого звена, ω_{max} — частота, при которой ЛАЧХ достигает своего максимального значения.

Параметры T и ξ для колебательного звена определяются следующим образом:

а) по экспериментальной ЛАЧХ (рис. 8-65) определяют значения ΔL_{max} и ω_{max};

б) по кривой $\xi=f(\Delta L_{max})$ (рис. 8-66) определяют значение ξ;

в) по кривой $T\omega_{max}=f(\Delta L_{max})$ определяют значение $T\omega_{max}$;

г) определяют значение постоянной времени

$$T=\frac{T\omega_{max}}{\omega_{max}}.$$

Зависимости, приведенные на рис. 8-66, построены расчетным путем.

В. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

8-9. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Современные многоконтурные системы автоматического регулирования (САР) электроприводов постоянного тока строятся по подчиненному принципу контроля координат (рис. 8-67).

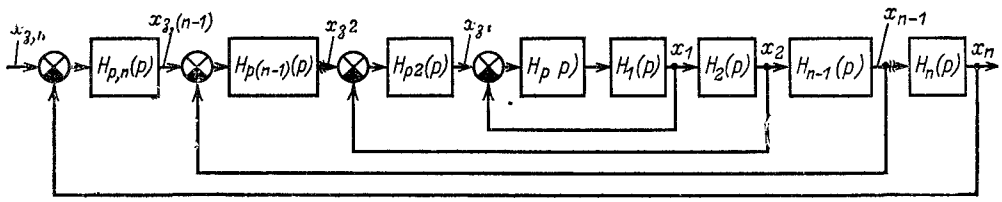


Рис. 8-67. Структурная схема многоконтурной системы подчиненного регулирования.

Количество контуров регулирования выбирается исходя из следующих условий:

а) необходимого числа контролируемых координат — тока и напряжения якоря, частоты вращения двигателя, тока или потока возбуждения, э. д. с. двигателя, положения механизма и т. д.;

б) наличия больших инерционностей в контуре, так как каждый внутренний контур уменьшает число больших постоянных времени объекта регулирования во внешнем контуре; для простоты реализации передаточной функции регулятора каждый контур должен включать не более двух больших постоянных времени.

Каждый контур САР структурно состоит из двух последовательно включенных звеньев: объекта регулирования и регулятора. Регуляторы включены каскадно. На входе регулятора каждого из контуров регулирования сравниваются заданное $x_{з.i}$ и истинное x_i значения контролируемого параметра, а выходное напряжение регулятора служит задающим сигналом для последующего внутреннего контура. При таком построении структурной схемы достаточно просто осуществляется ограничение контролируемой координаты каждого контура путем ограничения выходного сигнала регулятора предыдущего контура; изменение этой координаты определяется настройкой внешнего контура.

Оптимизация каждого контура заключается в выборе передаточной функции и параметров регулятора, обеспечивающих с учетом возможных ограничений требуемые показатели настройки контура, которые при единичной обратной связи определяются передаточной функцией разомкнутого контура $H_{раз}(p)$. Передаточная функция регулятора $H_р(p)$ определяется из соотношения

$$H_р(p)=\frac{H_{раз}(p)}{H_о(p)},$$

где $H_о(p)$ — передаточная функция объекта регулирования контура.

В системах подчиненного регулирования используется понятие «компенсация постоянных времени объекта регулирования», что соответствует выбору передаточной функции регулятора, обратной по отношению к передаточной функции объекта регулирования (абсолютная компенсация неосуществима, так как для мгновенного изменения выходной координаты инерционного звена на его вход необходимо подать сигнал бесконечного значения). Вместе с тем все инерционности объекта регулирования не компенсируются из-за их физической природы, нецелесообразности по соображениям помехоустойчивости или требуемого быстродействия контура.

К некомпенсируемым относятся постоянные времени функциональных элементов системы управления и постоянные времени фильтров в ее каналах, а также эквивалентная постоянная времени внутреннего подчиненного контура. Некомпенсируемые постоянные времени малы по сравнению с компенсируемыми, поэтому первые называются малыми, а вторые — большими.

Малые некомпенсируемые постоянные времени могут быть заменены эквивалентной ве-

личиной T_μ, которая приближенно определяется суммированием малых постоянных времени контура при условии, что последовательно с этими малыми инерционностями включено интегрирующее звено или инерционное звено с постоянной времени $T \gg T_\mu$.

Величина T_μ определяет быстродействие и помехоустойчивость контура. Чем меньше T_μ, тем больше быстродействие контура и меньше его помехоустойчивость.

Передаточная функция разомкнутого контура $H_{раз}(p)$ должна включать инерционное звено с некомпенсируемой постоянной времени T_μ; кроме того, $H_{раз}(p)$ зависит от принятого критерия оптимизации.

Среди существующих критериев оптимизации наибольшее распространение нашел Betrags Optimum. В отечественной практике этот критерий получил название технического или модульного оптимума. Согласно этому оптимуму

$$H_{раз}(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)},$$

что соответствует колебательному переходному процессу в замкнутом контуре с коэффициентом демпфирования $\xi = \sqrt{2}/2$; запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ при этом составляет 63°. Наличие интегрирующего звена в передаточной функции обеспечивает астатизм контура 1-го порядка; такой контур также называется однократноинтегрирующим.

Переходная функция характеризуется следующими показателями: перерегулирование $\sigma = 4{,}3$ %, время достижения первого максимума $t_{max} = 6{,}3T_\mu$, время первого достижения установившегося значения (время первого согласования) $t_c = 4{,}7T_\mu$, время регулирования (время вхождения в зону ошибки ±2 %) $t_p = 8{,}4T_\mu$.

Если к точности регулирования контура предъявляются повышенные требования, применяется критерий оптимизации Symmetrische Optimum (симметричный оптимум). Согласно этому оптимуму

$$H_{раз}(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)} \frac{4T_\mu p + 1}{4T_\mu p},$$

т. е. в отличие от оптимизации контура по модульному оптимуму добавляется пропорционально-интегральное звено с коэффициентом усиления пропорциональной части $k = 1$ и постоянной времени $T = 4T_\mu$.

Наличие в контуре двух интегрирующих звеньев обеспечивает астатизм контура 2-го порядка; такой контур также называется двукратноинтегрирующим. Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ при этом составляет 37°. Переходная функция характеризуется следующими показателями: $\sigma = 43{,}4$ %; $t_{max} = 6{,}3T_\mu$; $t_c = 3{,}1T_\mu$; $t_p = 16{,}5T_\mu$. При введении в канал задания фильтра с постоянной времени $T_ф = 4T_\mu$ контур будет иметь следующие показатели: $\sigma = 8{,}1$ %; $t_c = 7{,}6T_\mu$; $t_p = 13{,}3T_\mu$.

При наличии в объекте регулирования инерционного звена настройка контура по симметричному оптимуму затруднена ввиду сложности реализации требуемой передаточной функции регулятора. В этом случае при условии, что $T > 4T_\mu$ (T — постоянная времени инерционного звена), возможна настройка контура по приближенному симметричному оптимуму; при этом передаточная функция разомкнутого контура

$$H_{раз}(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)} \times \frac{4T_\mu p + 1}{4T_\mu p} \frac{Tp}{Tp + 1}.$$

Такая настройка является промежуточной между оптимизацией контура по симметричному и модульному оптимумам и приближается к настройке по симметричному оптимуму с уменьшением отношения $4T_\mu / T$.

Приведенные выше соотношения для показателей переходной функции справедливы для контура с единичной обратной связью. При наличии в канале обратной связи малых инерционностей показатели переходной функции контролируемой координаты будут отличаться от показателей выходного сигнала цепи обратной связи.

В этом случае для настройки контура по модульному оптимуму с точки зрения регулирования контролируемой координаты передаточная функция разомкнутого контура должна быть следующей:

$$H(p) = \frac{1}{B_0 p (T'_\mu p + 1)},$$

где

$$B_0 = \Sigma T_{\mu,пр} + \Sigma T_{\mu,обр} + \sqrt{(\Sigma T_{\mu,пр} + \Sigma T_{\mu,обр})^2 + (\Sigma T_{\mu,обр})^2};$$

$\Sigma T_{\mu,пр}$ — сумма малых постоянных времени в прямом канале контура; $\Sigma T_{\mu,обр}$ — то же в обратном канале контура; T'_μ — эквивалентная малая постоянная времени контура при наличии малых инерционностей в обратном канале,

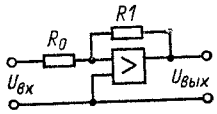
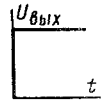
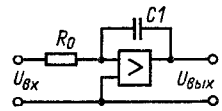
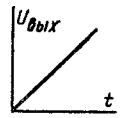
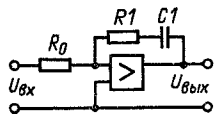
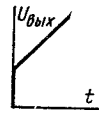
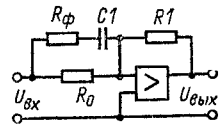
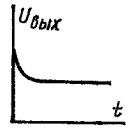
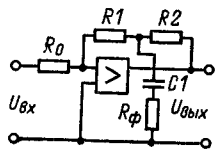
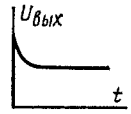
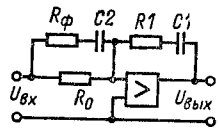
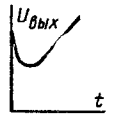
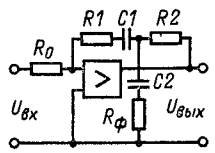
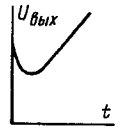
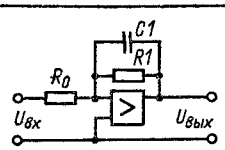
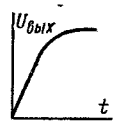
$$T'_\mu = \frac{B_0 - \Sigma T_{\mu,обр}}{2}.$$

Значение T'_μ определяет показатели настройки контура.

Реализация требуемых передаточных функций регуляторов осуществляется с помощью аналоговых операционных усилителей включением во входные цепи и цепи обратных связей усилителей резисторов и конденсаторов. В табл. 8-5 приведены динамические характеристики основных типов регуляторов, применяемых в автоматических системах регулирования электроприводов.

Таблица 8-5

Схема регуляторов, выполняемых на операционных усилителях

Тип регулятора	Схема его реализации	Переходная функция	Передаточная функция
П (пропорциональный)			$H(p) = -\frac{R_1}{R_0}$
И (интегральный)			$H(p) = -\frac{1}{T_1 p}$; $T_1 = R_0 C_1$
ПИ (пропорционально-интегральный)			$H(p) = -\frac{T_2 p + 1}{T_1 p}$; $T_2 = R_1 C_1$; $T_1 = R_0 C_1$
ПД пропорционально-дифференциальный (пассивный)			$H(p) = -\frac{R_1 (T_1 p + 1)}{R_0}$; $T_1 = R_0 C_1$; R_Φ — для помехоустойчивости; $R_\Phi \ll R_0$
ПД пропорционально-дифференциальный (активный)			$H(p) = -\frac{(R_1 + R_2)(T_1 p + 1)}{R_0}$; $T_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1$; $R_\Phi \ll R_1; R_2$
ПИД пропорционально-интегрально-дифференциальный (пассивный)			$H(p) = -\frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{T_3 p}$; $T_1 = R_0 C_2$; $T_2 = R_1 C_1$; $T_3 = R_0 C_1$; $R_\Phi \ll R_0$
ПИД пропорционально-интегрально-дифференциальный (активный)			$H(p) = -\frac{R_1 + R_2}{R_0}\frac{(T_1 p+1)(T_2 p+1)}{T_3 p}$; $\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \gg 1$; $T_1 = (R_1 + R_2) C_1$; $T_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_1$; $T_3 = R_0 C_1$; $R_\Phi \ll R_1, R_2$
Апериодическое звено (активное)			$H(p) = -\frac{R_1}{R_0}\frac{1}{T_1 p + 1}$; $T_1 = R_1 C_1$

8-10. НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ТОКА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Настройка регулятора тока якорной цепи без учета влияния э. д. с. Настройке токового контура обычно предшествует экспериментальное определение динамических параметров якорной цепи. Структура контура тока представлена на рис. 8-68.

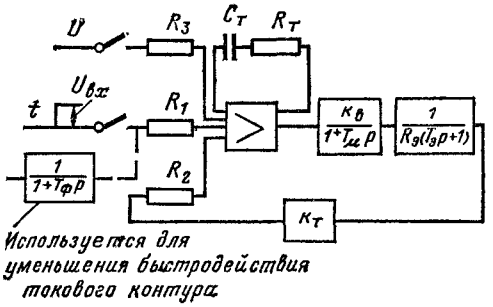


Рис. 8-68. Структура контура якорного тока.

$R_э$, $T_э$ — сопротивление и электромагнитная постоянная времени якорной цепи; $k_в$, $k_т$ — коэффициенты усиления преобразователя и датчика тока; $T_μ$ — сумма малых постоянных времени.

Правильная настройка регулятора тока является необходимым условием получения надлежащего качества переходных процессов в замкнутой системе регулирования частоты вращения двигателя, положения и в других структурах. Быстродействие токового контура определяет предельно возможное быстродействие контура скорости привода. Выбору при наладке подлежат значения сопротивлений резисторов R_2, $R_т$ и емкости конденсатора $C_т$. В данном параграфе рассматривается методика выбора значений в предположении, что э. д. с. двигателя не оказывает существенного влияния на качество динамических процессов токового контура.

Последовательность определения параметров регулятора токового контура:

а) задаются емкостью конденсатора $C_т$. Обычно $C_т$ выбирают в пределах 0,2—1 мкФ;

б) сопротивление резистора $R_т$ выбирается из условия $R_т=T_э/C_т$, где $T_э$ — электромагнитная постоянная времени якорной цепи. Выполнение этого условия обеспечивает компенсацию электромагнитной постоянной времени;

в) ориентировочно определяют сопротивление резистора

$$R_2 = \frac{2T_μ k_в k_т}{C_т R_э}; \qquad (8\text{-}16)$$

г) вычисленное по (8-16) сопротивление R_2 должно быть экспериментально проверено, так как все составляющие, входящие в указанную формулу, могут быть определены неточно;

д) собирают схему токового контура.

Отключают цепь возбуждения двигателя, отключают обратную связь по частоте вращения;

е) на регулятор тока через резистор $R_з$ подают такой входной сигнал U, чтобы по якорной цепи протекал начальный непрерывный ток для исключения влияния зоны нечувствительности на характер переходного процесса;

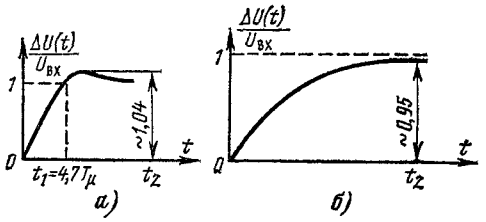


Рис. 8-69. Переходный процесс $ΔU(t)$ для выходной величины датчика тока.

а — оптимальная настройка; *б* — апериодическая настройка.

ж) затем входной сигнал скачком увеличивают подачей сигнала $U_{вх}$. При этом установившееся значение якорного тока соответственно увеличивается. По осциллографу, присоединенному к выходу датчика тока, наблюдают переходный процесс изменения тока. Сопротивление R_2 считается правильно выбранным, если перерегулирование выходного значения находится на уровне 5—8 % установившегося. Если перерегулирование окажется больше, сопротивление R_2 необходимо увеличить, и наоборот, если перерегулирование меньше 5 %, соответственно R_2 необходимо уменьшить;

з) оптимальное быстродействие оказывается при этом в том случае, если время нарастания выходной величины до первого установившегося значения около $4{,}7T_μ$ (рис. 8-69). Значение $T_μ$ (малая постоянная времени токового контура) зависит от способа исполнения системы фазового управления, числа фаз преобразователя и инерционности датчика тока. По экспериментальным данным $T_μ$ обычно составляет 4—10 мс. Если $R_т/C_т<T_э$, т. е. имеет место недокомпенсация электромагнитной постоянной времени $T_э$, время нарастания якорного тока возрастает по сравнению с $4{,}7T_μ$. Когда динамические параметры якорной цепи неизвестны, целесообразно значение $R_тC_т$ выбирать заведомо большим, чем $T_э$. Незначительная перекомпенсация не приводит к существенному искажению переходного процесса. Если перекомпенсация окажется существенной, переходный процесс оказывается искаженным по сравнению с кривой 2-го порядка, приведенной на рис. 8-69. В этом случае необходимо уменьшить $R_т$;

и) при проведении эксперимента входной сигнал устанавливается таким, при котором якорный ток равен 0,3—0,4 номинального значения. Время нахождения двигателя под током должно быть по возможности минимальным во избежание повреждения коллектора. Обратная связь по частоте вращения при проведении эксперимента обязательно должна

быть отключена во избежание аварийного нарастания частоты вращения;

к) в отдельных случаях по условиям работы установки приходится ограничивать быстродействие токового контура. Уменьшение быстродействия может быть достигнуто увеличением сопротивления R_2. Однако следует иметь в виду, что при этом возрастает искажающее влияние э. д. с. двигателя. Поэтому более предпочтительно уменьшение быстродействия выполнять за счет установки дополнительного фильтра на входе замкнутого токового контура. Характер переходного процесса при уменьшенном быстродействии должен быть апериодическим;

л) постоянная времени эквивалентной инерционности замкнутого токового контура $T_т$ определяется по следующим формулам:

при оптимальной настройке

$$T_т = 2T_μ;$$

при апериодической настройке

$$T_т = \frac{R_2 C_т R_э}{k_в k_т}.$$

Из данных переходного процесса для тока (рис. 8-69) при оптимальной настройке

$$T_т = 2T_μ = \frac{2t_1}{4{,}7},$$

где t_1 — время достижения первого установившегося значения.

При апериодической настройке

$$T_т = \frac{t_2}{3},$$

где t_2 — практическое время достижения установившегося процесса, т. е. время достижения 95 % $U_у$.

2. Настройка регулятора тока с учетом влияния э. д. с. Влияние э. д. с. двигателя сказывается на росте колебательности и уменьшении коэффициента усиления токового контура в замкнутом состоянии.

Переходный процесс токового контура при ступенчатом входном сигнале, полученный с учетом влияния э. д. с. двигателя (при включении возбуждения двигателя), отличается от процесса, полученного без учета влияния э. д. с. двигателя (при отключенном возбуждении двигателя) тем, что уменьшается установившееся значение якорного тока и растет относительное перерегулирование якорного тока.

Степень уменьшения установившегося значения якорного тока зависит от эквивалентной постоянной интегрирования токового контура B и электромеханической постоянной времени привода $T_{эм}$. Коэффициент усиления токового контура в замкнутом состоянии при этом будет равен

$$\frac{1}{k_т}\,\frac{1}{1+B/T_{эм}}, \text{ где } B = \frac{C_т R_2 R_э}{k_в k_т}.$$

Колебательность переходного процесса якорного тока возрастает с ростом отношения $T_э/T_{эм}$. Чем это отношение больше, тем больше перерегулирование якорного тока.

Уменьшение коэффициента усиления контура якорного тока может быть скомпенсировано соответствующим увеличением усиления в контуре частоты вращения. В то же время повышенная колебательность токового контура ограничивает возможное быстродействие контура частоты вращения.

Влияние э. д. с. сказывается не только на качестве переходного процесса токового контура, но и на уровне установившегося значения динамического тока при разгоне привода «под отсечку», т. е. в режиме, когда регулятор частоты вращения находится в насыщении, а привод нагружен статическим моментом. Опуская промежуточные выкладки, приведем формулы для якорного тока и его динамической составляющей в указанном режиме:

установившееся значение якорного тока

$$I_{я,у} = \frac{I_з + I_{ст}\,B/T_{эм}}{1 + B/T_{эм}};$$

установившееся значение динамического тока

$$I_{дин,у} = \frac{I_з - I_{ст}}{1 + B/T_{эм}},$$

где $I_з$ — заданное значение тока, определяемое уровнем токоограничения; $I_{ст}$ — статическое значение тока, определяемое моментом сопротивления.

Из приведенных формул видно, что влияние э. д. с. двигателя приводит к уменьшению динамического тока, что в свою очередь приводит к недоиспользованию привода. В частности, это явление существенно сказывается на работе нажимных устройств широкополосных станов и на главных приводах обжимных станов.

Опыт внедрения систем подчиненного регулирования свидетельствует о том, что для современных быстродействующих систем фазового управления при $4T_э < T_{эм}$ не возникает настоятельной необходимости компенсации влияния э. д. с. вообще, так как ухудшение характера переходного процесса при этом незначительно. В этом случае настройку токового контура обычно выполняют при неподвижном двигателе по методике, изложенной в п. 1.

Если $4T_э > T_{эм}$ и система фазового управления достаточно быстродействующая, так что выполняется условие

$$\frac{1}{2T_μ} > \frac{1}{\sqrt{T_э T_{эм}}},$$

настройку токового контура целесообразно выполнять не по техническому, а по симметричному оптимуму. При этом параметры токового регулятора выбираются из следующих соотношений:

$$R_т C_т = 4T_μ; \quad \frac{R_т}{R_2} = \frac{T_э R_э}{k_в k_т \cdot 2T_μ}.$$

Переходная характеристика токового контура будет характеризоваться перерегулированием, близким к 43 %.

Для снижения перерегулирования на входе токового контура устанавливают фильтр с постоянной времени $4T_μ$ (рис. 8-70).

В результате установки дополнительного фильтра эквивалентная постоянная времени замкнутого токового контура будет равна $4T_μ$,

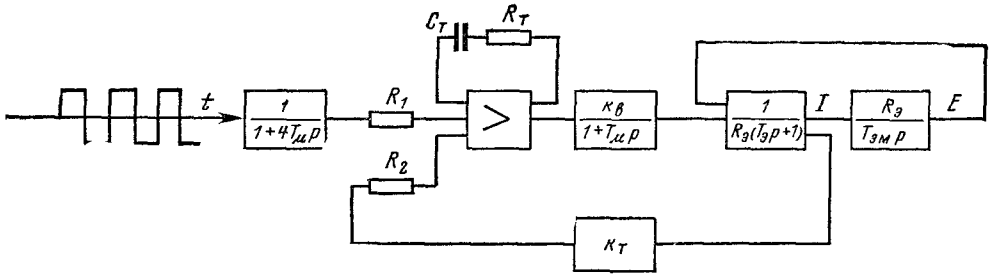


Рис. 8-70. Структура контура якорного тока при учете влияния э. д. с.

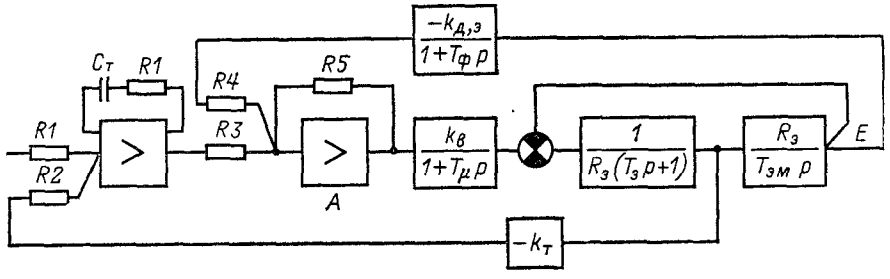


Рис. 8-71. Структура контура якорного тока с компенсацией влияния э. д. с.

а не $2T_\mu$, как это имеет место при настройке без учета влияния э. д. с. двигателя.

Следует иметь в виду, что в режиме работы привода «на упор» будет иметь место увеличение якорного тока в $(1+B/T_{эм})$ раз по сравнению с заданием, определенным с учетом влияния э. д. с. Однако, так как при настройке по симметричному оптимуму B устанавливается меньшей, чем при настройке по модульному оптимуму, увеличение якорного тока будет незначительным. По этой причине предварительную настройку токового контура на симметричный оптимум можно выполнять на неподвижном двигателе.

При настройке токового контура по симметрическому оптимуму влияние колебаний напряжения питающей сети на динамику привода уменьшается.

В практике электропривода получили распространение структуры, в которых компенсация влияния э. д. с. осуществлена с помощью аппаратов, например приведенные в [8-17].

На рис. 8-71 представлена структурная схема, в которой удачно решена задача компенсации влияния э. д. с. двигателя. На усилитель A подается сигнал, пропорциональный э. д. с. двигателя, и выходное напряжение регулятора тока. Усиление по входу от регулятора тока можно принять равным единице, а усиление по входу от датчика э. д. с. при полной компенсации э. д. с. тогда должно быть равно $1/k_{д,э}k_в$. Здесь $k_{д\,э}$ — коэффициент передачи датчика э. д. с.; $k_в$ — коэффициент передачи преобразователя.

Принимая во внимание малость величины T_μ, организовывать узел компенсации ее влияния нецелесообразно.

В то же время датчик э. д. с. двигателя имеет в своем составе инерционное звено $\frac{k_{д,э}}{1+T_ф p}$. Постоянная времени $T_ф$ равна электромагнитной постоянной времени участка якорной цепи, с которого снимается сигнал обратной связи по напряжению. Наличие инерционности в датчике э. д. с. приводит к некоторому небалансу в компенсации э. д. с. Компенсировать инерционность датчика э. д. с. нецелесообразно, так как при этом возрастут пульсации частоты 300 Гц (в шестипульсных схемах выпрямления силового преобразователя) в сигнале э. д. с., могущие нарушить нормальную работу суммирующего усиления. Иногда вместо сигнала, пропорционального э. д. с., используется сигнал, пропорциональный напряжению двигателя.

Когда возбуждение привода не меняется, вместо сигнала э. д. с. может использоваться сигнал от датчика частоты вращения.

3. Настройка П-регулятора частоты вращения. Структурная схема системы регулирования частоты вращения приведена на рис. 8-72. Прежде всего необходимо отметить, что представленная структура не охватывает все реальные схемы, так как она не отражает в полной мере способ сопряжения фазовых характеристик системы управления преобразователей. Предполагается, что режим прерывистых токов преобразователя исключен, т. е. рассматривается реверсивная схема с непрерывным уравнительным током.

Иногда в цепях обратной связи по частоте вращения устанавливается фильтр с постоянной времени $T_{ф.с}$ в несколько миллисекунд для уменьшения высокочастотных пульсаций тахогенератора. Кроме того, инерционность цепи обратной связи по частоте вращения возрастает при наличии потенциометра, шунтирующего якорную цепь тахогенератора, с кото-

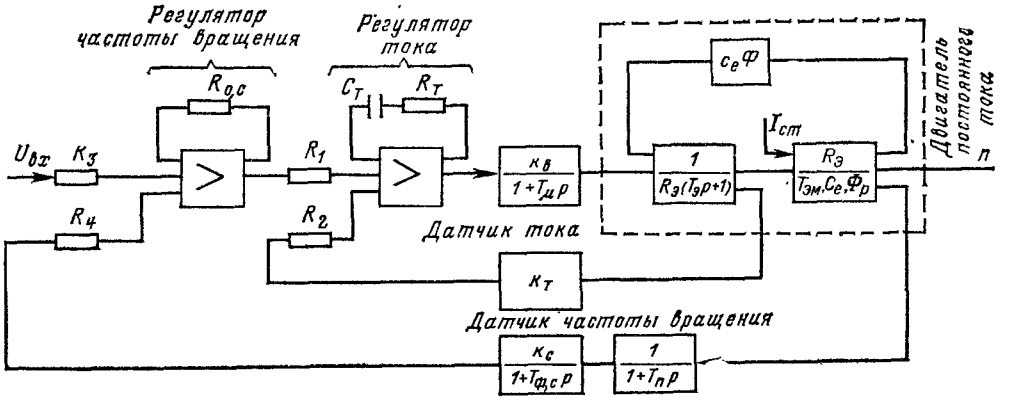


Рис. 8-72. Структурная схема двухконтурной системы регулирования с пропорциональным регулятором частоты вращения.

$T_{ф.с}$, $T_μ$, $T_п$ — постоянные времени фильтров системы фазового управления, датчика частоты вращения; $k_в$, $k_т$, $k_с$ — коэффициенты усиления.

рого снимается сигнал обратной связи по частоте вращения. Постоянная времени $T_п$ этого контура может достигать 5—6 мс.

Таким образом, контур частоты вращения обычно содержит в своем составе инерционность токового контура и инерционность в цепи обратной связи.

При настройке подобной системы регулирования центральным вопросом является выбор коэффициента усиления регулятора частоты вращения. Опыт эксплуатации показывает, что обычно значение коэффициента усиления регулятора частоты вращения не удается поднять выше, чем при настройке по техническому оптимуму. При усилениях больших, чем по техническому оптимуму, возрастает колебательность системы регулирования до недопустимого уровня, в том числе из-за пульсации тахогенератора. Повышенные пульсации якорного тока вызывают рост активных потерь мощности, ухудшают условия коммутации двигателей, понижают надежность преобразователей.

Коэффициент усиления регулятора частоты вращения при настройке по техническому оптимуму

$$k_{р.с} = \frac{R_{о.с}}{R_4} = \frac{1}{2T_{μ.с}} \frac{R_1}{R_2} \frac{k_т}{k_с} T_{эм} c_e \Phi \frac{1}{R_э};$$

$$T_{μ.с} = T_т + T_{ф.с} + T_п.$$

С другой стороны, по условиям ведения технологического процесса зачастую нет необходимости в большом быстродействии контура частоты вращения. В этом случае коэффициент усиления выставляется меньшим, чем по модульному оптимуму.

Чем выше при прочих одинаковых условиях коэффициент усиления, тем выше быстродействие системы, меньше уровень просадок частоты вращения при приложении момента сопротивления. Однако рост коэффициента усиления, как уже указывалось, сопряжен с ростом влияния помех. На рис. 8-73 приведены амплитудно-частотные характеристики для частоты вращения и якорного тока, позволяющие оценить влияние помех. Основным источником помех является тахогенератор. Как известно, в кривой выходного напряжения тахогенератора содержатся пульсации пяти частот (см. § 8-3): $f_{зуб}$, $f_{р1}$, $f_{р2}$, $f_к$, $f_о$. Из этих составляющих наибольшие неприятности вызывают, как известно, полюсные $f_{р1}$ и $f_{р2}$, оборотные $f_о$,

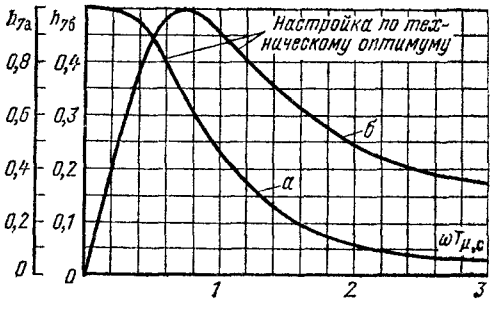


Рис. 8-73. Амплитудно-частотные характеристики для частоты вращения (*а*) и якорного тока (*б*). Регулятор скорости пропорциональный.

$$а - \left|\frac{n(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)}\right| \frac{R_э k_с}{R_4} = h_{7а};$$

$$б - \left|\frac{I(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)}\right| \frac{R_э k_с R_э T_{μ.с}}{R_4 T_{эм} c_e \Phi} = h_{7б}.$$

а иногда и зубцовые $f_{зуб}$, лежащие в зоне частоты, при которых пульсации тока близки к максимальным. Влияние той или иной составляющей пульсаций зависит, с одной стороны, от ее амплитуды, а с другой — от частоты вращения двигателя привода и, разумеется, от характера амплитудно-частотной характеристики якорного тока привода.

На лучших отечественных тахогенераторах постоянного тока типа ПТ суммарный уровень

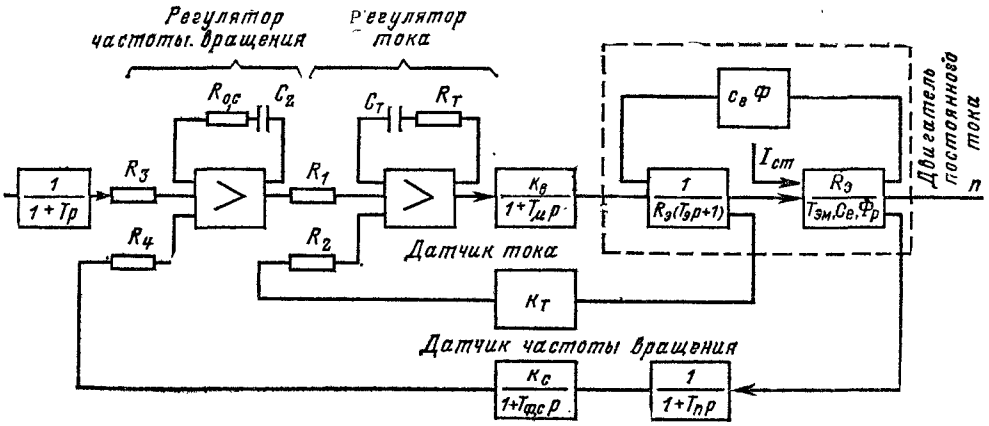


Рис. 8-74. Структурная схема двухконтурной системы регулирования с пропорционально-интегральным регулятором частоты вращения.

$T_{ф,с}$, $T_μ$, $T_п$ — постоянные времени фильтров системы фазового управления и частоты вращения; T — постоянная времени входного фильтра; $k_в$, $k_т$, $k_с$ — коэффициенты усиления.

пульсаций $f_{р1}$, $f_{р2}$, $f_о$ практически достигает 0,5 %. Высокочастотные пульсации $f_{зуб}$ и $f_к$ приводят к загрублению регулятора частоты вращения. Суть явления загрубления состоит в том, что вследствие действия высокочастотных помех происходит уменьшение среднего значения выходного напряжения регулятора, так как регулятор имеет нелинейную характеристику с ограничением. Это эквивалентно уменьшению коэффициента усиления.

При хорошем качестве тахогенераторов и низком уровне других помех удается исключить из канала обратной связи все фильтры и соответственно поднять усиление. В отдельных случаях удается даже применять пропорционально-дифференциальный регулятор частоты вращения (ПД-регулятор), позволяющий еще больше увеличить коэффициент усиления без существенного изменения запаса по фазе в системе регулирования. Следует иметь в виду, что повышению коэффициента усиления регулятора частоты вращения иногда препятствуют высокочастотные колебания в кривой якорного тока и частоты вращения, обусловленные влиянием сил упругих связей, например на приводах главных приводов широкополосных прокатных станов и моталок.

4. Настройка ПИ-регулятора частоты вращения. Широкое развитие непрерывных быстроходных технологических агрегатов с высокими требованиями синхронизации частоты вращения между отдельными машинами, входящими в агрегат, обусловливает применение астатических характеристик регулирования по входной величине и по возмущающему воздействию. Для получения нулевого статизма в контур регулирования скорости привода вводится пропорционально-интегральный регулятор частоты вращения двигателя (РС) (рис. 8-74).

Астатические системы регулирования также применяют и для одиночных приводов по условиям удобства управления и получения максимальной производительности.

Непрерывные станы горячей прокатки и реверсивные обжимные станы являются примерами установок, где целесообразно применение астатических регуляторов частоты вращения привода.

Наибольшее распространение получила настройка регулятора частоты вращения по симметричному оптимуму. Эта настройка характеризуется выполнением следующих соотношений:

$$R_{о,с} C_2 = 4T_{μ,с};$$

$$C_2 R_4 \frac{R_1}{R_2} \frac{k_т}{k_с} \frac{T_{эм} c_e Φ}{R_э} = 8T^2_{μ,с};$$

$$T_{μ,с} = T_т + T_{ф,с} + T_п,$$

где $T_т$ — постоянная времени эквивалентной инерционности токового контура; $T_п$ — постоянная времени контура потенциометра в цепи обратной связи по частоте вращения; $T_{ф.с}$ — постоянная времени фильтра обратной связи по частоте вращения.

Настройка регулятора РС выполняется в такой последовательности:

а) шунтируется конденсатор C_2;

б) $R_{о,с}$ выбирается таким, при котором перерегулирование частоты вращения и при ступенчатом входном сигнале равняется примерно 5—8 % установившегося значения;

в) определяется эквивалентное быстродействие контура частоты вращения; время достижения первого значения установившейся частоты вращения

$$t_н \approx 4{,}7T_{μ,с}, \text{ отсюда } T_{μ,с} \approx \frac{t_н}{4{,}7};$$

г) по уточненному значению $T_{μ,с}$ определяется емкость конденсатора

$$C_2 = \frac{4T_{μ,с}}{R_{о,с}};$$

д) расшунтируется конденсатор C_2 и проверяется реакция контура частоты вращения на ступенчатый входной сигнал (перерегулирование должно быть 43—50 % установившегося значения);

е) для уменьшения перерегулирования со стороны задания устанавливается фильтр на входе с постоянной времени, равной $4T_{\mu.с}$;

ж) при проведении экспериментов по пп. «б» и «д» привод должен вращаться с какой-то начальной частотой вращения n_0, сигнал задания должен быть таким, чтобы частота вращения увеличивалась. Выполнение этого условия необходимо для исключения влияния способа сопряжения фазовых характеристик на динамику привода.

Необходимо также следить, чтобы был исключен прерывистый режим на холостом ходу привода, например за счет выбора n_0 (меняется при этом $M_х$).

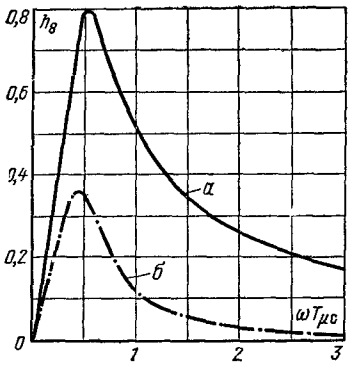


Рис. 8-75. Амплитудно-частотные характеристики для якорного тока.

$$h_8 = \left| \frac{I(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)} \right| \frac{R_з k_с T_{\mu.с} R_э}{R_4 T_{эм} c_е \Phi};$$

а — система без фильтра на входе; *б* — система с фильтром на входе.

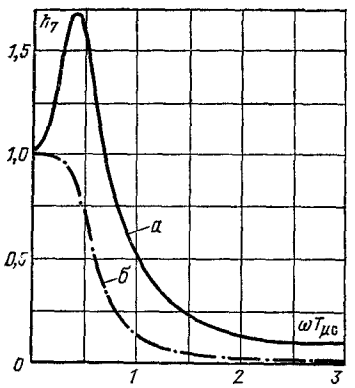


Рис. 8-76. Амплитудно-частотные характеристики для частоты вращения.

$$h_7 = \frac{n(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)} \frac{R_з}{R_4} k_с;$$

а — система без фильтра на входе; *б* — система с фильтром на входе.

При эксплуатации приводов постоянного тока возможны вынужденные отклонения от настроек по симметричному оптимуму, например из-за изменения потока возбуждения двигателя. Анализ качества процессов в подобных условиях изложен в специальной литературе, перечень которой дан в конце раздела.

Оценка уровня пульсаций якорного тока и частоты вращения, вызванных наличием синусоидальных помех во входном сигнале и напряжении тахогенератора, может быть выполнена по частотным характеристикам для якорного тока и частоты вращения (рис. 8-75 и 8-76) в такой последовательности:

з) по результатам измерений или расчета определяются частота и амплитуда пульсаций входной помехи f и $U_{вх.max}$;

и) определяется угловая частота этой же помехи $\omega = 2\pi f$;

к) экспериментально или расчетом определяется постоянная времени замкнутого контура регулирования частоты вращения $T_{\mu.с}$;

л) по данным пп. «и», «к» определяется значение $\omega T_{\mu.с}$;

м) по кривым рис. 8-75 и 8-76 и значению $\omega T_{\mu.с}$ определяют значения h_7 и h_8;

н) экспериментально или расчетом определяется масштабный коэффициент

$$a = \frac{R_з}{R_4} k_с T_{\mu.с} \frac{R_э}{T_{эм} c_е \Phi};$$

о) по данным пп. «з», «н» определяют амплитудные значения пульсаций якорного тока и частоты вращения

$$I_{max} = \frac{h_8}{a} U_{вх.max};$$

$$n_{max} = h_7 \frac{R_4}{R_з k_с} U_{вх.max}.$$

При вычислениях по пп. «н», «о» отношение $R_4/R_з$ следует считать равным единице.

При наличии пульсаций разных частот результирующее максимальное значение всех пульсаций тока и частоты вращения определяется суммированием отдельных составляющих.

При практической реализации ПИ-регулятора частоты вращения по разным причинам иногда приходится отходить от настроек по симметричному оптимуму с тем, чтобы переходные процессы имели меньший уровень перерегулирования. Частота среза при этом не должна меняться.

Увеличивая только емкость C_2, можно, не меняя частоту среза $\omega_с$, уменьшить перерегулирование. При этом несколько возрастает время достижения установившегося значения и возрастает площадь регулирования при ступенчатом возмущении [8-12].

Настройку, при которой выдерживается соотношение

$$\omega_с = \frac{T_1}{B_с} = \frac{1}{2T_{\mu.с}},$$

можно осуществить, увеличивая емкость C,

$$K = \frac{T_1}{T_{\mu.с}}.$$

Увеличение K приводит к изменению низкочастотной части характеристики. При $K \to \infty$ система регулирования с ПИ-регулятором частоты вращения стремится к системе регулирования с П-регулятором, настроенной по модульному оптимуму. Настройка при $K=4$ соответствует настройке по симметричному оптимуму.

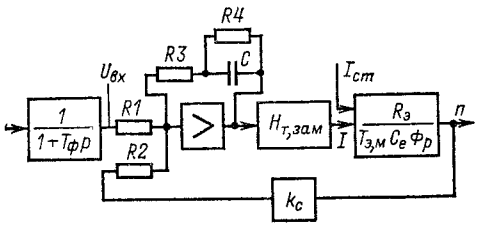


Рис. 8-77. Структурная схема системы регулирования с модифицированным ПИ-регулятором частоты вращения.

$H_{т,зам}$ — передаточная функция замкнутого контура регулирования.

Кроме рассмотренных настроек в практике электропривода получили распространение и другие настройки ПИ-регулятора, подробный анализ которых рассмотрен в [8-13].

5. Настройка модифицированного ПИ-регулятора частоты вращения. В конкретных случаях работы оборудования иногда возникают условия, при которых отсутствие снижения частоты вращения нежелательно.

Применение пропорционального регулятора частоты вращения обеспечивает статическую просадку частоты вращения на уровне настройки по модульному оптимуму. Повышению коэффициента усиления обычно препятствует рост влияния помех.

Для получения отличных от нуля статических просадок частоты вращения, но меньших, чем по модульчому оптимуму, применяют регулятор частоты вращения (рис. 8-77), у которого дополнительным резистором шунтируется конденсатор.

С изменением сопротивления R_4 в пределах 0—∞ при неизменных остальных параметрах регулятора возможно изменение жесткости механической характеристики привода от уровня, соответствующего настройке по техническому оптимуму, до уровня, соответствующего настройке по симметричному оптимуму. Однако при таком способе изменения жесткости механической характеристики быстродействие и демпфирование переходных процессов существенно изменяются в зависимости от $\gamma = (R_4+R_3)/R_2$. Поэтому параметры регулятора частоты вращения желательно выбирать так, чтобы при разных значениях γ частота среза частотной характеристики разомкнутого контура частоты вращения и длина ее участка 20 дБ/дек в окрестности частоты среза ω_c не менялись по сравнению со значениями, которые имеют место при настройке по симметричному оптимуму (рис. 8-78). Выполнение этих условий обеспечивает одинаковые быстродействие и затухание переходных процессов для любого значения γ в диапазоне $1 < \gamma < \infty$.

Параметры регулятора частоты вращения рекомендуется выбирать в следующей последовательности:

а) на основании требуемого для данного технологического процесса установившегося значения просадки частоты вращения определяется γ

$$\gamma = \frac{I_{ст}\, k_т\, R_2}{\Delta n_у\, R_3\, k_с}; \qquad (8\text{-}17)$$

б) на основании вычисленного значения γ определяется отношение

$$\frac{R_4}{R_3} = \gamma - 1; \qquad (8\text{-}18)$$

в) определяется отношение сопротивлений

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{1}{2T_т}\,\frac{k_с}{k_т}\,\frac{T_{эм}\, c_e\, \Phi}{R_э}, \qquad (8\text{-}19)$$

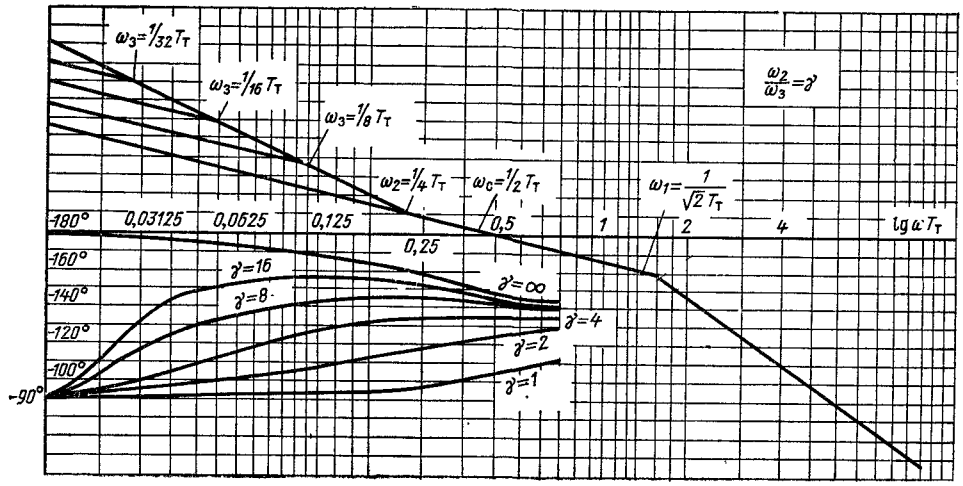


Рис. 8-78. Амплитудно-частотные характеристики разомкнутого контура частоты вращения. Токовый контур представлен колебательным звеном.

где $T_т$ — постоянная времени замкнутого контура якорного тока; $k_т$ — приведенное с учетом входных сопротивлений регулятора тока значение коэффициента усиления цепи обратной связи контура тока;

г) задаваясь сопротивлением R_3, определяют сопротивление по (8-19) и по (8-18);

д) определяют емкость конденсатора обратной связи регулятора

$$C = 4T_т \frac{R_4 + R_3}{R_4 R_3}.$$

Для уменьшения перерегулирования при управлении со стороны задания на входе системы регулирования устанавливают инерционное звено, постоянная времени которого $T_ф$ подбирается при наладке.

Наладка привода выполняется аналогично наладке приводов с пропорциональным регулятором частоты вращения. Затем по выбранному значению γ проводят корректировку параметров регулятора частоты вращения.

8-11. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ РЕВЕРСИВНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1. Особенности настроек регуляторов тока в системах с уравнительными токами

Способ управления преобразователем оказывает существенное влияние на характер переходных процессов в системе регулирования.

Определяющим при этом является наличие или отсутствие уравнительного тока между вентильными группами реверсивного преобразователя.

При раздельном управлении группами (без уравнительного тока) стоимость трансформатора меньше, и поэтому оно является более экономичным.

Наличие уравнительных токов исключает вредное влияние зоны нечувствительности и прерывистых токов на динамику системы регулирования и обеспечивает более качественное регулирование. Предпочтение одному из способов управления должно отдаваться в зависимости от конкретных требований с учетом экономических соображений.

Устойчивая работа преобразователей с уравнительными токами возможна при наличии регулятора уравнительного тока, автоматически поддерживающего его. Наиболее распространенной системой поддержания уравнительного тока является двухканальная система (рис. 8-79).

Двухканальная система. На выходе регулятора частоты вращения *РС* установлены разделительные диоды *VD*. При появлении сигнала на выходе регулятора частоты вращения, например сигнала положительной полярности, начинается рост напряжения на преобразователях группы «вперед» *В*. Вследствие этого появляется бросок уравнительного тока, который интегрируется регулятором тока преобразователя группы «назад» *Н*. Сигнал на выходе регулятора тока группы *Н* устанавливается таким, при котором происходит автоматическое изменение напряжения инвертора до уровня, когда вос-

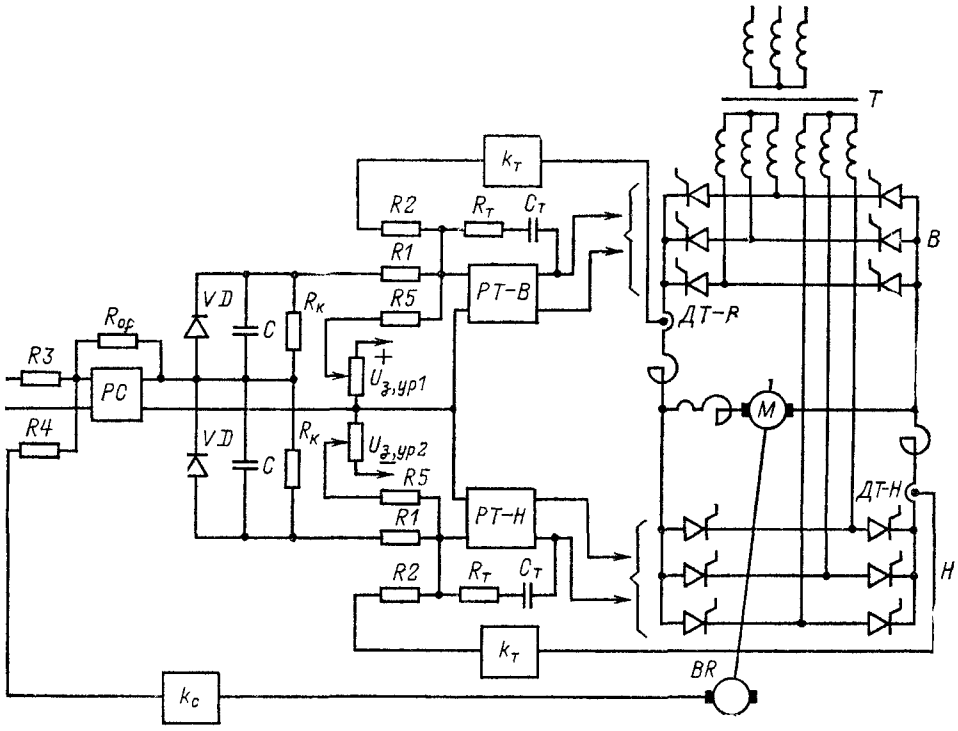


Рис. 8-79. Структурная схема двухканальной системы регулирования якорного тока.

станавливается заданное значение уравнительного тока. Задание уравнительного тока осуществляется с помощью потенциометров $U_{з,ур1}$ и $U_{з,ур2}$ (рис. 8-79).

Настройка регуляторов токов в двухканальной системе: а) устанавливают начальную фазировку преобразователей групп *В* и *Н*, при которой отсутствует уравнительный ток (обычно $\alpha_0 = 105°$). Потенциометры $U_{з,ур}$ устанавливают в нулевое положение;

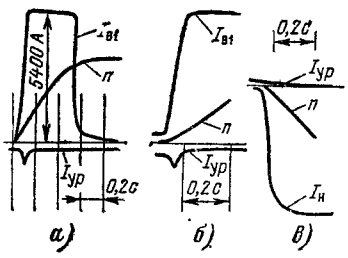


Рис. 8-80. Осциллограмма переходного процесса токового контура двухканальной системы регулирования.

а — резисторы $R_к$ и конденсатор *С* не включены; *б* — параллельно диодам *VD* включены только резисторы; *в* — параллельно диодам *VD* включены резисторы $R_н$ и конденсаторы *С*.

б) по методике, изложенной в § 8-10, выполняют настройку токового контура каждого направления;

в) при отключенном возбуждении двигателя и отключенной обратной связи по частоте вращения постепенно увеличивают напряжения на выходе потенциометров $U_{з,ур1}$, $U_{з,ур2}$ до появления уравнительного тока. Обычно уравнительный ток устанавливается равным гранично-непрерывному значению. При этом по цепи якоря двигателя ток не должен протекать во избежание появления ползучей скорости при последующем замыкании системы регулирования по частоте вращения.

Если из-за какой-либо асимметрии по якорной цепи двигателя все же протекает ток, его можно уменьшить за счет уменьшения сопротивления резистора R_5 в цепи задания уравнительного тока. Если ток в цепи якоря двигателя имеет направление, обусловленное повышением напряжения, например, преобразователя группы *В* над напряжением преобразователя группы *Н*, то уменьшить надо сопротивление резистора R_5 в цепи регулятора тока *РТ—Н*;

г) подавая ступенчатый сигнал на вход регулятора частоты вращения *РС* (цепь обратной связи по частоте вращения разомкнута), наблюдают переходный процесс тока якоря двигателя. Обычно процесс оказывается более демпфированным, чем процесс нарастания тока при работе преобразователя одного направления (§ 8-10), из-за ответвления тока в инверторную группу (рис. 8-80).

В отдельных случаях дополнительное демпфирование переходного процесса тока якоря двигателя нежелательно, например в быстродействующих приводах. В этих случаях параллельно разделительному диоду *VD* подключается конденсатор *С*, емкость которого подбирается экспериментально. Примерно справедливо соотношение (рис. 8-79).

$$R_1 C \approx R_т C_т.$$

Для некоторого улучшения энергетических показателей преобразователя, коэффициента мощности и к. п. д. ($\cos\varphi$ и η) параллельно разделительному диоду подключается резистор (рис. 8-79). Благодаря появлению цепочки, шунтирующей разделительные диоды, при появлении тока нагрузки исчезает уравнительный ток и исключаются вызванные им дополни-

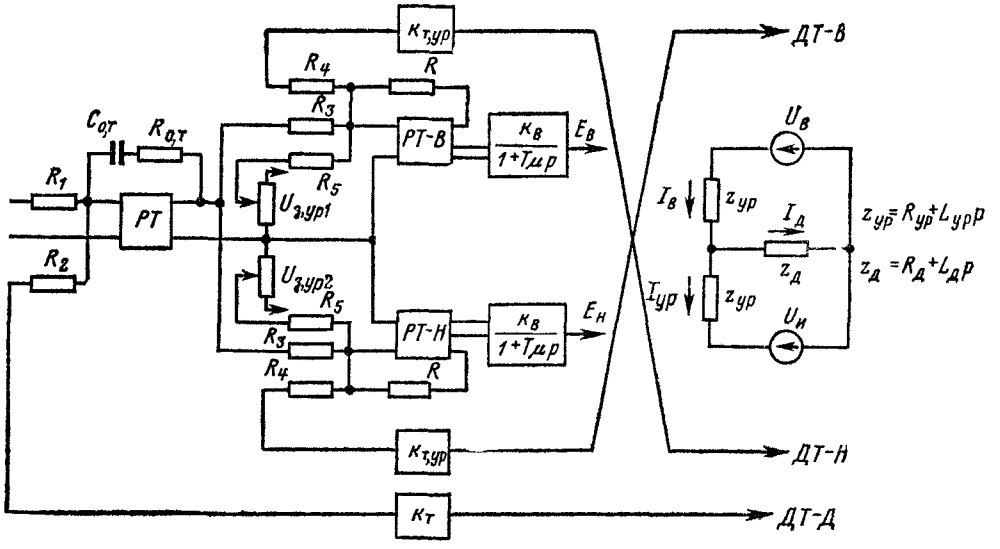


Рис. 8-81. Система регулирования уравнительного тока с перекрестными обратными связями.

$z_д$ — операторное сопротивление цепи якоря двигателя; $2z_{ур}$ — операторное сопротивление цепи уравнительного тока; $k_т$, $k_{т,ур}$ — коэффициенты усиления цепи обратной связи по току двигателя и току преобразователя.

тельные потери. Сопротивление $R_к$ выбирается из следующего условия:

$$I_{я,max} = \frac{U_{з.ур}}{R_5} \frac{R_к + R_1}{k_т} \frac{R_2}{R_1},$$

где $I_{я,max}$ — значение тока якоря двигателя, при котором исчезает уравнительный ток.

Следует иметь в виду, что при отключенной цепи якоря двигателя и расшунтированных регуляторах тока имеет место нежелательный рост напряжения преобразователей, обусловленный наличием асимметрии в задающих сигналах и сигналах обратной связи уравнительного тока;

д) после настройки регуляторов тока производится замыкание системы по каналу частоты вращения или напряжения.

Система регулирования с перекрестными обратными связями по току. Система с перекрестными обратными связями по току также поддерживает уравнительный ток (рис. 8-81). Особенностью схемы является перекрестная связь по току и наличие двух независимых регуляторов: тока якоря двигателя и уравнительного тока. Рассматриваемая система обладает следующими достоинствами:

уравнительный ток $I_{ур}$ протекает только в режиме холостого хода;

благоприятная динамика уравнительного тока.

Из рассмотрения основных соотношений структурной схемы рис. 8-81 следует, что

$$I_{ур} = \frac{k_в (\Delta U_{з.ур1} + \Delta U_{з.ур2})}{2[(1 + T_μ p)(R_{ур} + pL_{ур}) + k_в k_{т.ур}]} - \frac{I_д}{2}.$$

Из этого уравнения следует, что уравнительный ток безынерционно изменяется с изменением тока двигателя; с ростом якорного тока двигателя $I_д$ уменьшается уравнительный ток $I_{ур}$. Уравнительный ток становится равным нулю, когда ток двигателя достигает двойного значения начального уравнительного тока.

При настройке системы по модульному оптимуму коэффициент усиления по каналу уравнительного тока

$$k_{т.ур} = \left[\frac{(T_{ур} + T_μ)^2}{2T_{ур} T_μ} - 1\right] \frac{R_{ур}}{k_в}, \quad (8\text{-}20)$$

где $T_{ур} = L_{ур}/R_{ур}$.

Формула справедлива для непрерывного режима уравнительного тока.

Настройка регулятора тока *РТ* двигателя выполняется обычным способом (см. § 8-10). Следует отметить, что при отключенной цепи регулятора тока двигателя *РТ* контур тока двигателя неустойчив.

Цепь обратной связи по току двигателя по каналу $k_т$ стабилизирует контур тока двигателя.

Наличие регуляторов тока *РТ—В* и *РТ—Н* несколько искажает динамику тока двигателя в начальный момент времени. Когда рассматриваются малые значения тока двигателя, следует ожидать некоторого относительного ускорения переходных процессов по сравнению с идеализированной системой, не учитывающей влияния уравнительного тока.

Если ток двигателя во много раз больше начального значения уравнительного тока, искажение переходных процессов практически не будет наблюдаться.

На рис. 8-82 приведены осциллограммы нарастания тока двигателя $I_д$, тока преобразователя $I_в$ и уравнительного тока $I_{ур}$. Из осциллограммы видно, что динамика уравнительного тока практически совпадает с динамикой тока двигателя.

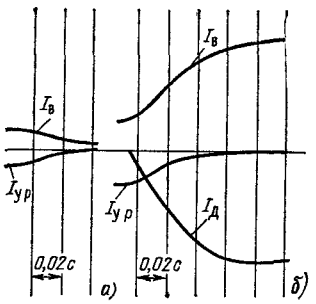


Рис. 8-82. Осциллограммы переходного процесса токового контура системы регулирования с перекрестными обратными связями.

а — реакция на ступенчатое изменение задания на уравнительный ток; *б* — то же на ток двигателя.

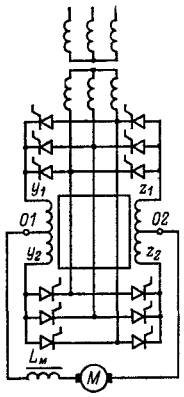


Рис. 8-83. Реверсивный тиристорный преобразователь.

Реверсивные преобразователи, предназначенные для работы с уравнительными токами, выпускаются с двухобмоточными или трехобмоточными силовыми трансформаторами. В первом случае группы выпрямителей обоих направлений питаются от одного комплекта обмоток трансформатора (рис. 8-83), во втором случае группы выпрямителей обоих направлений питаются от отдельных обмоток трансформатора (рис. 8-79). В преобразователях первого типа регулирование уравнительного тока следует выполнить по схеме с перекрестными обратными связями. Применение двухканальной схемы здесь нецелесообразно, так как в процессе регулирования незначительная асимметрия управляющих импульсов приводит к большим выбросам уравнительного тока, насыщению уравнительных реакторов и аварийному росту уравнительного тока.

Настройка регуляторов РТ, РТ—В и РТ—Н: а) ориентировочно на основании предварительных данных по (8-20) определяют коэффициент усиления $k_{т.ур}$ (рис. 8-81);

б) методом, изложенным в § 8-10, выполняют настройку регулятора тока *РТ*. При этом в цепи прохождения сигнала от регулятора тока *РТ* до системы фазового управления преобразователями должны быть включены усилители *РТ—В* и *РТ—Н* с коэффициентом передачи единица. Цепь обратной связи $k_{т\,ур}$ должна быть разомкнута. С помощью потенциометров $U_{з\,ур1}$ и $U_{з.ур2}$ устанавливают начальный непрерывный якорный ток. Правильность выбора параметров регулятора *РТ* про-

веряется для каждого направления вращения по методике, изложенной в § 8-10 При работающем преобразователе группы *В* регулятор *РТ—Н отключен*,

в) при отключенном регуляторе тока двигателя *РТ* и отключенной цепи двигателя проверяют экспериментально правильность выбора $k_{т\,ур}$, рассматривая реакцию на ступенчатое изменение $U_{з\,ур}$ и сравнивая ее с требуемой При этом время нарастания уравнительного тока до первого установившегося значения

$$t_н = 4{,}7\frac{T_{ур}T_μ}{T_{ур}+T_μ}. \qquad (8\text{-}21)$$

Для настроек более демпфированных, чем по модульному оптимуму, время достижения 95 % установившегося значения при ступенчатом задании

$$t_н = 3\frac{T_{ур}+T_μ}{\frac{k_{т.ур}k_в}{R_{ур}}+1}. \qquad (8\text{-}22)$$

Следует отметить, что если система фазового управления преобразователей имеет линейную характеристику, а не арккосинусоидальную, демпфирование контура уравнительного тока изменяется в зависимости от угла регулирования α Демпфирование будет минимальным при α=90° и максимальным при α= =0°,

г) собирают всю схему и правильность настройки проверяют по реакции токов двигателя и уравнительного контура на ступенчатые сигналы разных знаков, подаваемые на вход регулятора тока *РТ* Возбуждение двигателя должно быть отключено, обратная связь по скорости разомкнута Время протекания токов по якорной цепи при проведении опытов должно быть минимальным

Уравнительный ток должен безынерционно изменяться с изменением тока якоря двигателя Уравнительный ток становится равным нулю, когда ток двигателя достигает двойного значения начального уравнительного тока Время нарастания якорного тока двигателя должно соответствовать заданному [см (8-21) или (8 22)]

2 ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ПРЕРЫВИСТОГО ТОКА И НЕЛИНЕЙНОГО СОГЛАСОВАНИЯ СИСТЕМ ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ТОКОВОГО КОНТУРА

При раздельном управлении реверсивным преобразователем управляющие импульсы подаются только на один преобразователь, который проводит ток нагрузки На втором преобразователе импульсы блокированы При подаче входного сигнала, изменяющего направление тока нагрузки, блокируются импульсы работавшей группы и подаются на другую группу Системы с раздельным управлением обладают тремя характерными особенностями, оказывающими существенное влияние на динамику привода

1) регулировочные характеристики преобразователя обладают зоной нечувствительности при переходе с преобразователя одного направления на преобразователь другого направления,

2) наличие аппаратной бестоковой паузы Δt между моментом снятия импульсов с одной группы и подачи их на другую,

3) возможен режим прерывистого тока, при котором динамические параметры токового контура существенно изменяются

Заметим, что для нереверсивных приводов также характерны первая и третья особенности

В электроприводе до сих пор еще имеют место системы регулирования с совместным управлением без уравнительных токов Подавление уравнительных токов достигается в них за счет нелинейного согласования систем фазового управления Очевидно, что и для этого класса приводов характерны первая и третья особенности, перечисленные для систем с раздельным управлением.

Для уменьшения влияния этих особенностей с целью приблизить качество регулирования этих систем к системам регулирования с уравнительными токами разработаны различные усовершенствованные структуры токового контура Рассмотрение этих структур дано в следующем пункте параграфа Здесь же будет рассмотрено влияние этих особенностей на обычную структуру токового контура с ПИ-регулятором тока, у которого постоянная времени упреждающей части регулятора равна по значению электромагнитной постоянной времени якорной цепи

Влияние зоны нечувствительности регулировочной характеристики. Для реверсивных преобразователей фазировка вентильных групп обоих направлений устанавливается таким образом, чтобы выполнялось соотношение $\alpha_0 > 90°$ и $\alpha_в + \alpha_и > 180°$, где α_0 — начальная фазировка, $\alpha_в$ и $\alpha_и$ — соответственно углы управления выпрямителя и инвертора, так что напряжение инвертора всегда превышает напряжение выпрямителя

Обычно значение α_0 устанавливается равным 120°

На рис 8 84 приведена регулировочная характеристика привода, имеющего начальную раздвижку $\alpha_0 > 90°$.

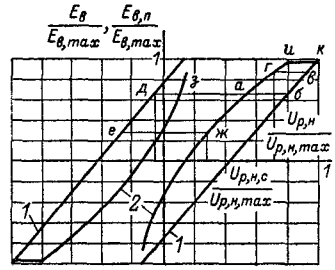


Рис 8-84 Регулировочные характеристики вентильного преобразователя для режима непрерывного и прерывистого тока, $\alpha_0 = 140°$

$E_в$ — э д с преобразователя при непрерывном токе $E_{р,п}$ — э д с преобразователя в прерывистом режиме при идеальном холостом ходе $E_{в,max}$ — максимальное возможное среднее значение э д с преобразователя в режиме непрерывного тока $\alpha=0$, $U_{р,н}$ — напряжение на входе системы фазового управления, $U_{р,н,max}$ — то же при $\alpha=0$ $U_{р,н,с}$ — то же при $\alpha=90°$.

Зависимости *1* соответствуют режиму непрерывного тока; зависимости *2* — режиму прерывистого тока при идеальном холостом ходе привода.

В простейшем случае при отсутствии режима прерывистых токов и арккосинусоидальном законе изменения угла регулирования характеристика имеет вид петли с одинаковой шириной, определяемой только начальной фазировкой. Особенности регулировочной характеристики в режиме прерывистого тока будут рассмотрены ниже. Зона нечувствительности оказывает существенное влияние на динамику привода. На приводах, работающих в режиме токоограничения, наличие зоны нечувствительности приводит к замедлению переходных процессов, например на рольгангах или нажимных устройствах. В то же время на приводах, динамический ток которых формируется с помощью задатчика интенсивности, имеют место всплески динамического тока, доходящие иногда до заданного токоограничения и сопровождающиеся повышенной скоростью нарастания тока [8—13].

Такие всплески динамического тока при инвертировании могут быть причиной опрокидывания инвертора. Системы со значительной зоной нечувствительности в случае их применения должны преимущественно использоваться на механизмах, допускающих пуск и торможение в режиме токоограничения.

В системах регулирования с ПИ-регулятором частоты вращения отрицательные последствия зоны нечувствительности сказываются сильнее, чем в системах регулирования с П-регулятором частоты вращения.

Влияние аппаратной бестоковой паузы. В течение бестоковой паузы оказывается разомкнутым прямой канал регулирования токового контура и, следовательно, обратная связь по току равна нулю. За этот промежуток времени происходит накопление сигналов в интегральных составляющих регуляторов тока и частоты вращения, в то время как сигналы обратных связей по току и частоте вращения не меняются. После подачи импульсов на очередную группу преобразователя накопленные сигналы в интеграторах вызовут свободный переходный процесс, который наложится на процесс, обусловленный действием входного сигнала. В дальнейшем предполагается, что начальный угол $\alpha_0=90°$. Это соответствует наиболее тяжелому случаю влияния бестоковой паузы. Якорный ток считаем непрерывным.

При работе привода в режиме токоограничения сигнал на выходе регулятора тока за время Δt изменится на величину $U_0\Delta t/A$ (A — постоянная времени интегрирования регулятора тока).

Действие этого сигнала эквивалентно действию сигнала $U_1(p)$, приложенного ко входу токового контура.

$$U_1(P)=\frac{U_0\,\Delta t}{1+T_э\,p}.$$

Под действием сигнала $U_1(t)$ в токовом контуре возникает дополнительная составляющая, накладывающаяся на основной процесс.

Чем более быстродействующей выполнена настройка токового контура, тем большее влияние оказывает составляющая $U_1(t)$. Ее влияние также возрастает при уменьшении электромагнитной постоянной якорной цепи. За счет раздвижки регулировочных характеристик можно несколько скомпенсировать влияние накопления сигнала в интеграторе регулятора тока.

В системах регулирования, замкнутых по частоте вращения, дополнительный переходный процесс обусловлен сигналом, накопленным в интеграторах регуляторов тока и частоты вращения. Большее влияние оказывает сигнал, накопленный в регуляторе тока. Влияние аппаратной паузы еще более возрастает при наличии внутреннего контура напряжения.

Ввиду того что время бестоковой паузы может являться источником дополнительного перерегулирования тока якоря, на практике стараются эту величину снизить до минимума, при котором обеспечивается надежная работа преобразователя. На современных приводах эта величина достигает 5 мс. На серийных приводах, изготовляемых электропромышленностью, в прямом канале регулирования между регуляторами частоты вращения и тока иногда устанавливается безынерционный ключ, разрывающий прямой канал регулирования на время аппаратной паузы.

Режим прерывистого тока. В режиме прерывистого тока динамические параметры якорной цепи сильно изменяются, что отражается на динамике привода.

В режиме прерывистого тока обычно пренебрегают омическим сопротивлением якорной цепи и считают, что значение якорного тока при прочих одинаковых условиях ограничивается только индуктивностью якорной цепи.

Имеют место следующие соотношения для режима прерывистого тока в шестифазной мостовой системе регулирования:

$$E_{в\,п}\approx E_d\approx E_{d0}\cos\left(\alpha-\frac{\pi}{6}+\frac{\lambda}{2}\right); \quad (8\text{-}23)$$

$$I_d\approx\frac{E_{d0}}{\omega L_{я,ц}}\sin\left(\alpha-\frac{\pi}{6}+\frac{\lambda}{2}\right)\frac{\lambda^3}{12}; \quad (8\text{-}24)$$

$$R_{э,п}=\frac{2}{3}\,\frac{\pi}{\lambda^2}\,\omega L_{я,ц}, \quad (8\text{-}25)$$

где α — угол регулирования; λ — угол проводимости, $\lambda\leqslant\pi/3$; $R_{э,п}$ — эквивалентное сопротивление в режиме прерывистого тока; I_d — среднее значение тока; $E_{в,п}$ — среднее значение выпрямленного напряжения.

Как известно [8-5], в режиме прерывистого тока выпрямленное значение напряжения при неучете омического сопротивления цепи равно э. д. с. двигателя.

На рис. 8-84 представлены регулировочные характеристики привода $E_{в,п}=f(U_{вх})$ для двух крайних случаев при $\lambda=0$ и $\lambda=\pi/6$, соответствующих идеальному холостому ходу привода и гранично-непрерывному режиму якорного тока.

Для определенности начальный угол регулирования $\alpha_0=140°$, зависимость угла регулирования α от входного напряжения $U_{р,н}$ принята арккосинусоидальной.

Из рис. 8-84 видно, что наклоны регулировочных характеристик, характеризующие коэффициенты усиления преобразователя $k_{в,п}$, меняются незначительно, причем чем ближе λ

к своему предельному значению $\pi/3$, тем меньше разница в изменении $k_{в,п}$.

На рис. 8-85 приведены внешние характеристики привода в режиме прерывистого тока для шестифазного преобразователя.

Тангенс угла наклона к зависимости $\frac{U_d}{U_{max}} = \frac{E_п}{U_{max}} = f\left(\frac{L_d + L_т}{U_{max}}\omega I_d\right)$ (рис. 8-85) характеризует эквивалентное сопротивление якорной цепи в режиме прерывистого тока [см. (8-25)].

Эквивалентное сопротивление $R_{э,п}$ существенно зависит от λ и меняется от ∞ при $\lambda=0$ до значения $6/\pi\omega L_я$ при $\lambda=\pi/3$. Из соотношения (8-25) следует, что $R_{э,п}$ зависит от якорного тока I_d и угла регулирования α.

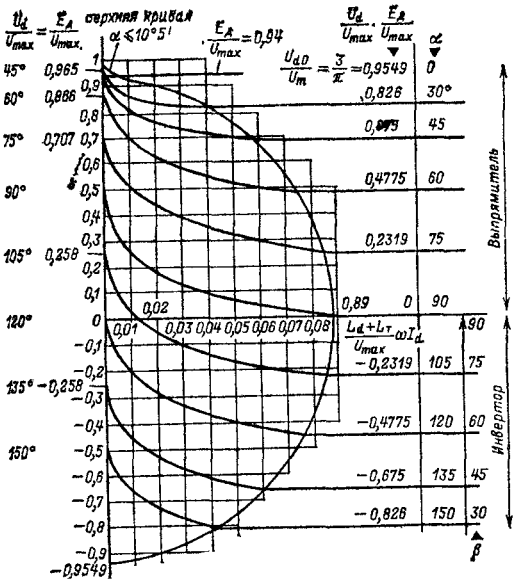


Рис. 8-85. Внешние характеристики привода в режиме прерывистого тока для шестифазного преобразователя.

L_d — суммарная индуктивность якоря, обмотки и дросселя; $L_т$ — индуктивность рассеяния обмотки трансформатора; U_{max} — максимальное значение напряжения, подводимого к шестифазному преобразователю; U_d — выпрямленное напряжение схемы; U_{d0} — максимальное значение выпрямленного напряжения в режиме прерывистого тока ($\alpha=0°$).

В режиме непрерывного тока эквивалентное сопротивление якорной цепи определяется в основном процессом коммутации якорного тока, когда якорный ток проводят два или несколько вентилей при больших токах одновременно.

В шестифазном преобразователе при пренебрежении омическим сопротивлением цепи

$$R_э \approx \frac{6\omega L_т}{2\pi}\frac{i_0}{I_d}, \qquad (8\text{-}26)$$

где i_0 — ток в цепи нагрузки в начале коммутации; I_d — среднее значение тока.

Чем больше ток нагрузки, тем ближе отношение i_0/I_d к единице.

Обычно в практике пользуются выражением

$$R_э = \frac{6\omega L_т}{2\pi} + R_а, \qquad (8\text{-}27)$$

учитывающим омическую составляющую якорной цепи и не учитывающим изменение тока коммутации по сравнению со средним значением якорного тока.

Величина $R_а$ оказывает некоторое влияние на величину эквивалентного сопротивления в прерывистом режиме, причем чем больше индуктивность, тем меньше влияние $R_а$.

При $\omega L_я/R_а > 4$ для $\lambda=\pi/6$ увеличение сопротивления $R_{э,п}$ не превышает 10 %.

При тщательном анализе переходных процессов $R_э$ и $R_{э,п}$ должны вычисляться как можно точнее. Сопоставляя выражения для $R_э$ и $R_{э,п}$, можно заметить, что $R_{э,п} \gg R_э$ при всех значениях λ. Это обстоятельство приводит к ухудшению динамических качеств системы регулирования.

В первом приближении при анализе переходных процессов можно пренебречь коэффициентом $k_{в,п}/R_{э,п}$, приняв его равным нулю в режиме прерывистого тока. В этом случае в регулировочной характеристике преобразователя появляется зона нечувствительности. Такой подход дает приемлемые результаты, когда рассматривается реакция на большой сигнал задания тока, причем ширина зоны нечувствительности будет зависеть от начального значения прерывистого тока (рис. 8-84). Зона нечувствительности в этом случае будет оказывать влияние на режим непрерывного тока. Оценка этого влияния была приведена ранее.

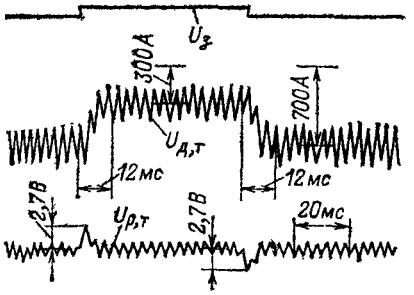


Рис. 8-86. Осциллограмма якорного тока в режиме непрерывного тока.

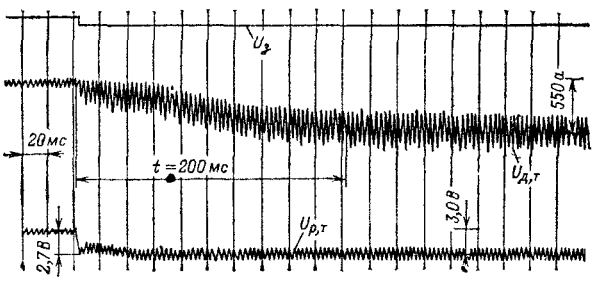


Рис. 8-87. Осциллограмма якорного тока в режиме прерывистого тока

В настоящее время в электроприводе существует тенденция к уменьшению индуктивности якорной цепи. Предпосылкой этому являются:

а) улучшение качества коммутации двигателей постоянного тока, что позволяет повысить уровень пульсаций;

б) более надежная работа тиристорных преобразователей в аварийных режимах при малых накопителях электромагнитной энергии. При малых индуктивностях режим прерывистого тока может доходить до тока, равного $(0{,}5 \div 0{,}6)\, I_{д.н}$ на двигателе. Уже в этом случае возникает необходимость в оценке качества регулирования непосредственно в режиме прерывистого тока.

В режиме прерывистого тока частота среза контура тока уменьшается с ростом сопротивления $R_{э.п}$. Вследствие этого переходные процессы оказываются более медленными, чем переходные процессы при непрерывном токе.

Следует заметить, что когда в процессе изменения якорного тока ток вначале является прерывистым, а потом непрерывным, ухудшение динамики будет иметь место и после того момента, когда ток станет непрерывным, так как и в этом случае имеет место потеря форсировочной составляющей входного сигнала на зону прерывистого тока.

При анализе переходных процессов в прерывистом режиме не учитывается электромагнитная постоянная времени якорной цепи, так как в этом режиме это звено не оказывает влияния при рассмотрении изменений среднего значения тока.

На рис. 8-86 и 8-87 приведены сравнительные осциллограммы якорного тока в режимах непрерывного и прерывистого токов для одного и того же привода.

3. СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ ДИНАМИКИ КОНТУРА ТОКА В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТОГО ТОКА

Как было показано выше (п. 2), в системах регулирования с тиристорными преобразователями, работающими без уравнительных токов, имеется зона нечувствительности в регулировочной характеристике преобразователя, коэффициент усиления преобразователя в зоне прерывистых токов $k_{в.п}$ меняется в зависимости от среднего значения тока и уровня э. д. с., а эквивалентное сопротивление якорной цепи $R_{э.п}$ резко возрастает с уменьшением прерывистого тока. Можно считать, что в режиме прерывистого тока среднее значение тока при изменении углов управления устанавливается без временных задержек, если в рассматриваемой системе время регулирования тока существенно больше времени проводимости вентиля. Поэтому электромагнитную постоянную времени цепи якоря $T_э$ применительно к среднему значению тока для этого случая можно принять равной нулю.

В связи с этим система с ПИ-регулятором тока, настраиваемым в режиме непрерывного тока, не обеспечивает требуемого качества регулирования. В [8-11, § 1-50] описаны системы регулирования, обеспечивающие высокое качество регулирования как при непрерывном, так и при прерывистых токах. Это системы с адаптивным регулятором тока, а также регулятором тока, имеющим внутренний контур регулирования напряжения. При описании наладки этих систем будут использоваться обозначения, принятые в структурных схемах см. [8-11, § 1-50].

Настройка адаптивных регуляторов тока осуществляется в следующей последовательности:

а) настраивается контур регулирования тока при непрерывном токе по методике, изложенной в § 8-10.

В схеме, приведенной в [8-11, рис. 1-263], упреждающая часть регулятора для компенсации $T_э$ подбирается с помощью сопротивлений R_2, R_4, а постоянная времени интегрирования $B_т \approx \dfrac{C_2 R_6 R_э}{k_в k_т} \dfrac{R_1}{(R_2 + R_4)}$ — с помощью сопротивления R_1. Влияние помех будет уменьшено, если увеличить сопротивление R_5 Однако следует учитывать, что чрезмерное увеличение R_5 увеличивает постоянную времени $B_т$, а следовательно, снижает быстродействие контура.

В схеме, приведенной в [8-11, рис. 1-264], упреждающая часть регулятора для компенсации $T_э$ подбирается с помощью сопротивления R_5, а постоянная времени интегрирования $B_т = \dfrac{C_1 R_5 R_э}{k_в k_т} \dfrac{R_1}{R_2}$ — с помощью сопротивлений R_1, R_2;

б) в режиме прерывистого тока при изменении структуры во время отсутствия тока постоянные времени интегрирования $B_т$ уменьшаются приблизительно в 20 раз.

В схеме на рис. 1-263 [8-11]

$$B_т = \frac{C_2 R_6 R_э}{k_в k_т} \frac{R_1}{R_3}$$

уменьшается с помощью сопротивления R_3.

В схеме на рис. 1-264

$$B_т = \frac{C_1 R_5 R_э}{k_в k_т} \frac{R_1}{R_2 + R_3}$$

уменьшается также с помощью сопротивления R_3. При выбранных сопротивлениях подаются ступенчатые сигналы задания на ток разного уровня и по электронному осциллографу наблюдается характер изменения прерывистого тока. Ток должен нарастать до установившегося значения без большого перерегулирования, а время нарастания тока не должно быть существенно больше времени нарастания в режиме непрерывного тока. Увеличение времени регулирования прерывистого тока может наблюдаться в случае, когда при плохом конструктивном выполнении регулятора из-за помех не удается получить достаточно малую постоянную времени интегрирования контура $B_т$ в этом режиме;

в) параметры контура регулирования скорости выбираются так, как это указано в § 8-10.

В режиме холостого хода привода на вход регулятора частоты вращения подается ступенчатый сигнал такого значения, чтобы ток не достигал ограничения. По электронному осциллографу наблюдается характер изменения скорости. Усиление контура выбирается с учетом технологических требований так,

чтобы обеспечить хорошее демпфирование переходных процессов. Затем привод разгоняется и подтормаживается от задатчика интенсивности и по электронному осциллографу наблюдается процесс нарастания тока при его реверсе. Если из-за влияния зоны нечувствительности перерегулирование тока при реверсе велико, необходимо уменьшить усиление контура регулирования скорости.

Настройка системы с внутренним контуром регулирования напряжения выполняется следующим образом:

а) настраивается внутренний контур регулирования напряжения при замкнутой цепи якоря. Предварительно параметры регулятора выбираются так, чтобы постоянная времени интегрирования $B_н$ была около 4 мс. С помощью электронного осциллографа, включенного на выход датчика напряжения, наблюдается переходный процесс регулирования напряжения при кратковременной подаче на вход регулятора напряжения ступенчатого задания. Кроме того, контролируется по осциллографу ток двигателя. Пульсации тока двигателя должны быть одинаковой амплитуды, т. е. контур напряжения не должен вызывать асимметрию углов регулирования, а перерегулирование напряжения должно быть незначительным.

Затем $B_н$ постепенно уменьшается. Выбранное значение $B_н$ должно быть больше того минимального значения, при котором появляется значительное перерегулирование напряжения или асимметрия углов регулирования;

б) при известных значениях $B_н$, $T_э$ из диаграммы Вышнеградского по коэффициентам m и n определяются постоянные $B_т$, T_1 и тем самым параметры регулятора тока. Предварительно выбирается постоянная времени интегрирования $B_т$ около 4 мс, а постоянная времени T_1 несколько больше, чем расчетная. Замыкается обратная связь по току. При кратковременном ступенчатом задающем сигнале с помощью осциллографа, подключенного на выход датчика тока, наблюдается переходный процесс регулирования тока . Перерегулирование тока может быть уменьшено увеличением постоянной времени T_1, которая увеличивает инерционность контура. Затем $B_т$ постепенно уменьшается. Выбранное значение $B_т$ должно быть больше того минимального значения, при котором появляется значительная асимметрия углов регулирования. Затем уменьшается значение постоянной T_1 так, чтобы получить практически апериодический процесс регулирования тока при минимальном времени регулирования. Если минимальное время регулирования не требуется, то общее время регулирования достигается при минимальном значении $B_т$ за счет увеличения постоянной времени T_1;

в) настраивается контур регулирования частоты вращения так же, как это было описано для адаптивных регуляторов.

4. УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИКИ КОНТУРА СКОРОСТИ В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТОГО ТОКА

В режиме прерывистого тока из-за увеличения инерционности токового контура контур скорости становится более колебательным. При отсутствии момента сопротивления возможен режим автоколебаний. Чем больше интегральных звеньев имеет регулятор частоты вращения в своем составе, тем ощутимей для привода режим автоколебаний. Для стабилизации скорости в прерывистом режиме релейным способом можно уменьшить коэффициент усиления либо перевести ПИ-регулятор в режим П-регулятора частоты вращения. В практике иностранных фирм для стабилизации скорости применяют дополнительную диодную обвязку регулятора частоты вращения (рис.

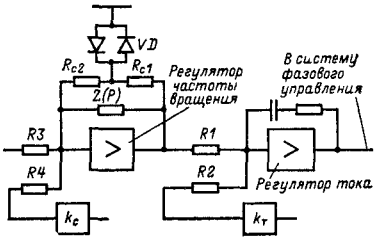


Рис. 8-88. Регулятор частоты вращения с диодной обвязкой.

8-88). Благодаря этому дополнительному узлу происходит автоматическая перестройка структуры регулятора в режиме прерывистого тока. Пока выходное напряжение регулятора частоты вращения мало, диоды VD не пропускают тока и обратная связь регулятора шунтируется омическими сопротивлениями. Когда выходное напряжение регулятора возрастает, один из диодов в зависимости от полярности выходного напряжения начинает пропускать ток; при этом сопротивление R_{c1} становится дополнительным нагрузочным сопротивлением усилителя, а сопротивление R_{c2} — составляющей входного сопротивления усилителя.

При дальнейшем увеличении выходного напряжения сопротивления R_{c1} и R_{c2} уже не участвуют в изменении характера обратной связи регулятора частоты вращения. Однако при этом точность реализации передаточной функции ухудшается, так как уменьшается входное сопротивление усилителя.

Из изложенного следует, что напряжение на диоде, при котором начинается его проводимость, должно находиться в соответствии с наибольшим значением прерывистого тока.

Опуская промежуточные выкладки, приведем уравнение этого соответствия

$$I_{нб} = \frac{U_{пр}\,(R_{c2} + R_{c1})}{R_{c1}} \frac{R_2}{R_1 k_т},$$

где $U_{пр}$ — напряжение проводимости диода; $I_{нб}$ — наибольшее среднее значение прерывистого тока; R_{c1}, R_{c2} — сопротивления обратной связи, которые должны быть достаточно велики, чтобы не искажать передаточную функцию регулятора в режиме непрерывного тока; вместе с тем они должны быть и достаточно малы, чтобы оказать существенное воздействие на цепь обратной связи в режиме прерывистого тока.

8-12. НАСТРОЙКА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Системы регулирования с обратной связью по напряжению применяются для электроприводов в следующих случаях:

когда не предъявляются высокие требования к точности поддержания скорости;

когда по технологическим причинам невозможно выполнить систему регулирования с обратной связью по скорости (например, групповой электропривод рольгангов);

когда эта система дает лучшее качество регулирования, чем система с обратной связью по скорости с недостаточно качественными тахогенераторами — с высоким уровнем пульсаций.

Система с обратной связью по напряжению структурно несколько сложнее, чем система с обратной связью по скорости, вследствие того, что в сигнале обратной связи по напряжению присутствуют составляющие, пропорциональные току и его производной. Наличие индуктивной составляющей в сигнале обратной связи по напряжению приводит к тому, что при прочих равных условиях системы с обратной связью по напряжению имеют меньшее быстродействие, чем системы с качественной обратной связью по скорости.

Рассмотрим настройки регуляторов применяемых структур.

а) Астатическая система регулирования напряжения двигателя, структурная схема которой представлена на рис. 8-89, получила широкое распространение для группового электропривода. Токовый контур настраивается так же, как в системах с обратной связью по скорости (см. § 8-10). Обычно применяется настройка по модульному оптимуму [8-11, § 1-42.] В этом случае настроенный контур тока представляется инерционным звеном с постоянным временем $T_т$. Регулятор напряжения для группового привода целесообразно выполнять пропорционально-интегральным. При пропорциональном регуляторе напряжения коэффициент усиления не удается выставить достаточно большим, так как в контуре регулирования отсутствует интегральная составляющая. Нагрузкой стабилизированного напряжения является якорная цепь двигателей.

Напряжение участка якорной цепи, с которого снимается сигнал обратной связи, содержит три составляющих: омическое и индуктивное падение напряжения, а также э. д. с. двигателя. При выборе параметров регулятора напряжения можно пренебречь э. д. с. двигателя, так как при быстрых изменениях сигнала в первую очередь изменяются омическое ($R_{я1}I_я$) и индуктивное ($pL_{я1}I_я$) падения напряжения. Такое допущение облегчает расчет регулятора и существенно не влияет на качество регулирования. При сделанных предположениях нагрузка (объект) представляет собой форсирующее звено $R_{я1}(T_{я1}p+1)$. Для компенсации упреждающего звена $(T_я p+1)$ в прямой канал регулирования можно установить фильтр с постоянной времени $T_{я1}$. Однако целесообразнее этот фильтр включить как в канал обратной связи по напряжению, так и на вход системы регулирования, что эквивалентно включению его в прямой канал регулирования. Такое включение обеспечивает фильтрацию сигнала обратной связи по напряжению. Иногда на входе фильтр не ставится, что несколько искажает переходный процесс по сравнению с расчетным.

Регулятор напряжения, как уже указывалось, выбирается пропорционально-интегральным. Значение сопротивления R_0 (см. рис. 8-89) определяется из условия компенсации постоянной времени замкнутого токового контура. Емкость C_0 выбирается из условия модульного оптимума. При этих условиях справедливы формулы:

$$C_0 R_0 = T_т;$$

$$\frac{C_0 R_0^2 k_т}{k_н R_{я1}} = 2T_т.$$

Установившееся значение просадки частоты вращения при приложении статического момента, об/мин,

$$\Delta n_у = \frac{I_{ст} R_{я1}\, 30}{c_м \Phi \pi} = \frac{I_{ст} R_{я1}}{c_e \Phi}.$$

б) Астатическая система регулирования э. д. с. двигателя применяется для повышения жесткости механической характеристики электропривода. Для этого в системах с обратной связью по напряжению вводится компенсация падения напряжения в якорной цепи. Выполняется это следующим образом: на вход регулятора напряжения кроме обратной связи по напряжению подается еще положительная обратная связь, пропорциональная якорному току. Эта связь на рис. 8-89 показана пунктиром. Условием полной компенсации активного падения напряжения является соотношение

$$\frac{IR_{я1} k_н}{R_2} = \frac{Ik_{тI}}{R_3}.$$

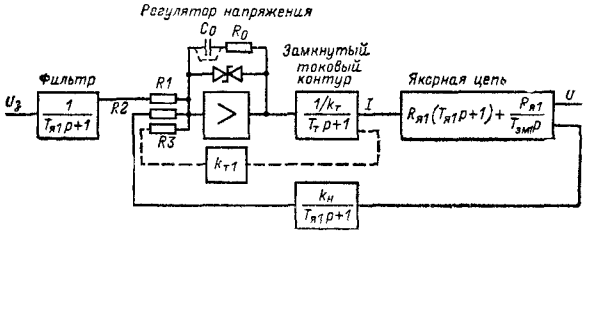


Рис. 8-89. Структурная схема системы регулирования электроприводом с обратной связью по напряжению.

$R_{я1}$, $T_{я1}$ и $T_{эм1}$ — сопротивление, электромагнитная и электромеханическая постоянные времени участка якорной цепи.

В этом случае имеем обратную связь по э. д. с. и пренебрегать влиянием ее уже нельзя. При выполнении этого условия рассматриваемая структура становится двукратно-интегрирующей с обратной связью по э. д. с. с фильтром, постоянная времени которого равна $T_{я1}$ (рис. 8-89). При настройке выбор параметров регулятора производится в соответствии со следующими соотношениями:

$$C_0 R_0 = 4 (T_{я1} + T_т);$$

$$C_0 R_2 = 8 (T_{я1} + T_т)^2 \frac{k_н R_э}{k_т T_{эм}}.$$

Из-за относительно большого значения $T_{я1}$ системы с обратной связью по напряжению с токовой компенсацией по быстродействию уступают системам с обратной связью по скорости. Для уменьшения $T_{я1}$ сигнал обратной связи желательно снимать с того участка якорной цепи, у которого электромагнитная постоянная меньше.

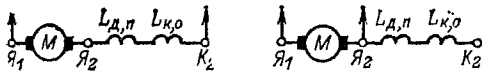


Рис. 8-90. Варианты исполнения обратной связи по напряжению.

Обычно сигнал обратной связи снимают с зажимов якоря (рис. 8-90), чтобы исключить индуктивность ошиновки и сглаживающих дросселей.

Для двигателей с компенсационными обмотками сигнал обратной связи иногда целесообразно снимать с зажимов собственно якоря $Я_1$, $Я_2$, минуя обмотки компенсационную и добавочных полюсов, если

$$\frac{L_я}{R_я} < \frac{L_я + L_{д,п} + L_{к,о}}{R_я + R_{д,п} + R_{к,о}}.$$

Степень компенсации реакции якоря влияет на распределение индуктивности между якорем и компенсационной обмоткой. Если машина перекомпенсирована, то, как правило, это соотношение выполняется, но в каждом конкретном случае это соотношение требует проверки (см. § 8-5).

В рассматриваемой структуре установившееся значение просадки частоты вращения при приложении момента сопротивления равно нулю.

Следует обратить внимание на то, что при расчете многодвигательного привода динамические параметры каждого привода обычно принимаются одинаковыми. Однако на практике эти параметры различны. Так как токовая компенсация (положительная обратная связь) рассчитывается по общему току, то это может привести к перекомпенсации отдельных двигателей, что вызывает колебательность в системе многодвигательного привода. По этой причине сигнал положительной обратной связи уменьшается по сравнению с расчетным. В этом случае имеем промежуточную настройку между структурами пп. «а» и «б».

в) Статическая система регулирования с обратной связью по э. д. с. двигателя также получила широкое распространение в практике металлургического электропривода. Регулятор напряжения (э. д. с.) выполнен пропорциональным, т. е. на рис. 8-89 емкость C_0 в регуляторе отсутствует, и хотя качество регулирования уступает описанным выше структурам пп. «а» и «б» и системам с обратной связью по скорости, широкому распространению рассматриваемой системы способствует простота реализации, высокая надежность в эксплуатации, возможность реализации токоограничения, когда оно является основным требованием к системе регулирования. Как уже указывалось выше, обратная связь по э. д. с. двигателя выполняется следующим образом: в канал обратной связи по напряжению включается фильтр с постоянной времени, равной электромагнитной постоянной времени участка якорной цепи, с которого снимается обратная связь. Сигнал якорного тока полностью компенсирует токовую составляющую обратной связи по напряжению. При этом в статическом режиме имеет место обратная связь по э. д. с., а в динамическом режиме обратная связь по э. д. с. с запаздыванием, обусловленным фильтром.

Параметры регулятора э. д. с. при настройке определяются из условия модульного оптимума

$$\frac{k_т T_{эм1} R_2}{R_{я1} k_н R_0} = 2T_т + T_{я1} + \sqrt{(T_т + T_{я1})^2 + T_{я1}^2}.$$

Установившееся значение просадки частоты вращения при приложении момента сопротивления равно, об/мин,

$$\Delta n_у = I_{ст} R_{я,ц} \frac{2T_{μ,э} \cdot 30}{c_м \Phi T_{эм} \pi} = I_{ст} R_{я,ц} \frac{2T_{μ,э}}{c_e \Phi T_{эм}},$$

где $R_{я,ц}$ — сопротивление всей якорной цепи, Ом; $T_{эм}$ — электромеханическая постоянная времени привода, с; $c_м\Phi$ и $c_e\Phi$ — конструктивные постоянные двигателя; $T_{μ,э}$ — эквивалентная малая постоянная времени контура э. д. с., с, равная

$$T_{μ,э} = \frac{T_т + \sqrt{(T_т + T_{я1})^2 + T_{я1}^2}}{2}.$$

8-13. ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ П- И ПИ-РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НЕРЕВЕРСИВНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Динамические процессы в системах регулирования с нереверсивными вентильными преобразователями в значительной степени определяются нелинейностями объекта регулирования.

К основным нелинейностям следует отнести меняющееся в функции среднего значения прерывистого тока эквивалентное сопротивление якорной цепи и зону нечувствительности, связанную с размыканием системы регулирования по току в моменты времени, когда э. д. с. двигателя становится больше, чем э. д. с. преобразователя, например при подтормаживании.

Наличие этих нелинейностей может вызвать неустойчивость системы регулирования частоты вращения, особенно с ПИ-регулятором, или неудовлетворительные переходные процессы при усилении, выбранном для идеализированной линейной системы.

При работе на холостом ходу и последующем ударном приложении нагрузки в системе регулирования частоты вращения возникают повышенные динамические падения частоты вращения. Это связано с тем, что регулятор тока должен значительно изменить угол регулирования преобразователя, прежде чем начнется интенсивное нарастание непрерывного тока. Возникшее повышенное падение частоты вращения вызывает затем появление дополнительной составляющей динамического тока, в результате чего перерегулирование суммарного тока двигателя может значительно возрасти.

В [8-11, § 1-49] подробно описаны переходные процессы в нереверсивном электроприводе и методика их расчета. Кроме того, там приводится структура системы регулирования, обеспечивающая повышение качества переходных процессов, и даны основные соотношения для расчета ее параметров.

Для приведенной в [8-11, § 1-49] структуры и с учетом принятых в ней обозначений настройка осуществляется в следующей последовательности:

а) в зависимости от выбранной структуры настраивается контур регулирования тока;

б) настраивается П-регулятор частоты вращения так, как описано в § 8-10;

в) в режиме холостого хода привода скачком незначительно снижается задание на скорость привода. По электронному осциллографу наблюдается изменение тока после подтормаживания. При этом можно наблюдать многократные толчки тока;

г) выбираются сопротивления R_5 и R_6 из соотношения $R_6/R_5 = k_в k_н$. При правильно выбранном соотношении этих сопротивлений в режиме холостого хода привода напряжение выхода усилителя *1* равно нулю. Из соотношений, приведенных в [8-11, § 1-49], выбирают остальные параметры регулятора. После замыкания контура в режиме холостого хода привода снижается скачком задание скорости на такое значение, как и в опыте, описанном в предыдущем пункте. При правильно выбранных параметрах системы ток должен появляться после подтормаживания без большого перерегулирования;

д) при необходимости иметь астатический регулятор частоты вращения последовательно с сопротивлением $R_{о.с}$ включается емкость, которая в 5—6 раз превышает емкость, выбранную из условия настройки контура скорости по симметричному оптимуму.

8-14. НАСТРОЙКА ПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ

Системы регулирования положения являются, как правило, нелинейными системами, так как работают в режиме ограничения коор-

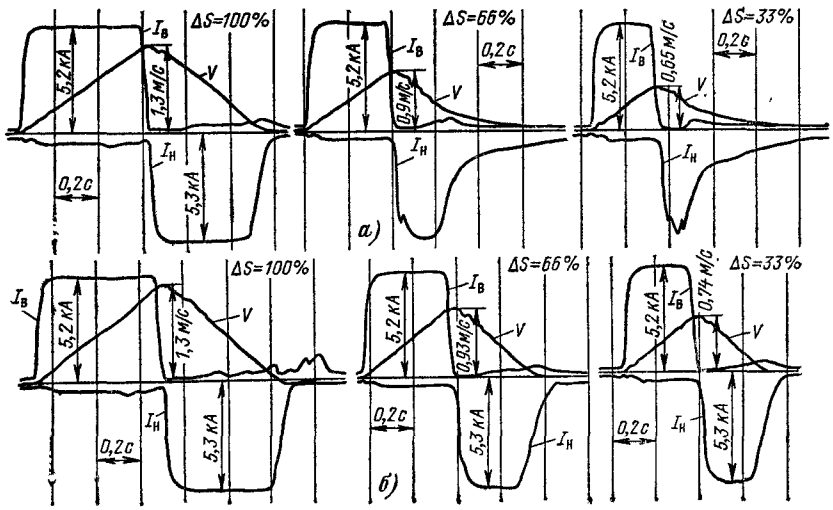


Рис. 8-91. Осциллограммы переходных процессов в позиционной системе.

а — с линейным, *б* — с параболическим регуляторами положения; $I_в$ — ток преобразователя группы «вперед», кА; $I_н$ — ток преобразователя группы «назад», кА; V — линейная скорость привода, м/с.

динат движения. Так, при средних перемещениях ограничивается ток двигателя, а при больших — его частота вращения. Ограничение координат движения определяет в основном время регулирования. Зазор между выходным валом механизма, на котором установлен датчик положения, и валом двигателя может привести к неустойчивости системы или увеличить время регулирования. Нелинейным может быть и регулятор положения, обеспечивающий оптимальное регулирование при ограничениях координат движения. В зависимости от режима работы механизма и параметров привода регулятор положения может быть линейным или нелинейным и регулирование статическим или астатическим.

Структурные схемы, переходные процессы и основные расчетные соотношения позиционных систем с линейным и параболическим регуляторами положения, астатическим и статическим регуляторами скорости описаны подробно в [8-11, § 1-52].

Наладка описанных там систем производится в следующей последовательности:

а) настраивают контур регулирования тока и частоты вращения;

б) при замыкании системы регулирования с линейным регулятором положения дают задание на такой путь, чтобы привод вышел на ограничение по частоте вращения. С помощью электронного осциллографа, включенного на выход датчика скорости, наблюдают переходный процесс частоты вращения при торможении привода. Коэффициент усиления регулятора положения подбирают так, чтобы привод подходил к заданному положению без перерегулирования. Затем дают задание на минимальный путь. При параболическом регуляторе положения привод должен подходить к к заданному положению без дотягивания, а при линейном — с дотягиванием.

В качестве примера на рис. 8-91 приведены переходные процессы отработки различных заданий на положение в системе регулирования с линейным и параболическим регуляторами положения.

8-15. НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДВУХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Для синхронного перемещения нескольких механизмов используются механические валы между ними. Некоторые механизмы требуют наряду с синхронным совместным перемещением раздельного управления. В этом случае применяются электромеханические управляемые муфты, соединяющие валы механизмов.

В настоящее время механическая связь между механизмами заменяется электрической с помощью специальных систем регулирования. Такие системы имеют ряд преимуществ перед системами с механической связью.

Структурные схемы системы электрической синхронизации двух приводов, их описание и основные расчетные соотношения приведены в [8-11, § 1-53].

Ниже приводится порядок наладки описанных в [8-11, § 1-53] систем и используются принятые там обозначения.

Наладка проводится в следующей последовательности:

а) настраивается контур регулирования тока и скорости каждого привода и после этого уточняются коэффициенты усиления контура разности частот вращения k_3, k_1 из выражения, приведенного в [8-11, формула (1-269)];

б) при отключенном контуре регулирования ΔS_c подается общее задание на пониженную скорость двух приводов. Входные сопротивления регуляторов скорости на схеме, приведенной в [8-11, рис. 1-271], корректируются так, чтобы сигнал на выходе регулятора разности скоростей 6 был равен нулю. Затем дается скачком задание на вход регулятора разности частот вращения такого значения, чтобы токи не достигали ограничения. С помощью электронного осциллографа, включенного на выход регулятора Δn, наблюдается характер переходного процесса. С помощью коэффициентов k_3, k_1 контур настраивается по модульному оптимуму;

в) если в системе нет режима изменения взаимного положения валов (нет задания S_3), то выполняется настройка контура ΔS_c в режиме малых отклонений, а затем проверяется в режиме больших отклонений при выборе механических зазоров.

При настройке контура в режиме малых отклонений при разомкнутом контуре ΔS_c приводы перемещаются в противоположных направлениях так, чтобы зазоры были выбраны. Затем с помощью дифференциального сельсина, связанного с двумя датчиками положения S_1 и S_2, при неподвижных приводах устанавливается значение ошибки ΔS_c такого знака, чтобы после замыкания контура приводы продолжали движение в том же направлении, и такого значения, чтобы токи не достигли ограничения. Затем замыкается контур регулирования ΔS_c. С помощью электронного осциллографа, включенного на выход датчика разности положений ΔS_c (например, фазочувствительного выпрямительного устройства), наблюдается переходный процесс. Коэффициент усиления k_4 корректируется так, чтобы настройка соответствовала модульному оптимуму.

Для проверки работы системы при выборе механических зазоров приводы предварительно перемещаются в противоположных направлениях. Затем с помощью дифференциального сельсина устанавливается нуль на выходе регулятора ΔS_c и подается общее задание скорости. С помощью осциллографа наблюдается характер изменения Δn. При оптимальном коэффициенте усиления регулятора ошибки Δn меняет знак только один раз. Если наблюдаются колебания Δn, то необходимо уменьшить коэффициент k_4. Если при уменьшенном коэффициенте статическая ошибка системы будет велика, можно выполнить регуляторы частот вращения астатическими. При этом емкость в обратной связи регулятора частоты вращения выбирается в 5—6 раз больше, чем при настройке по симметричному оптимуму (§ 8-10). Кроме того, при пропорциональных регуляторах частот вращения регулятор ошибки можно выполнить параболическим с линейной начальной частью, коэффициент усиления которой выбирается из усло-

вия настройки по модульному оптимуму;

г) если в системе есть режим изменения взаимного положения валов, то порядок настройки по п. «в» дополняется проверкой настройки при изменении задания S_3. При подаче задания S_3 максимального значения и последующем его снятии наблюдается переходный процесс Δn. При правильно выбранном коэффициенте k_4 не должно быть многократных колебаний Δn. При наличии колебаний необходимо уменьшать k_4 или вводить параболический регулятор.

8-16. НАСТРОЙКА КОНТУРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР — ДВИГАТЕЛЬ

Электроприводы по системе генератор — двигатель с тиристорным возбудителем выполняются обычно с двухконтурной системой регулирования. Внутренним контуром является контур регулирования тока якорной цепи.

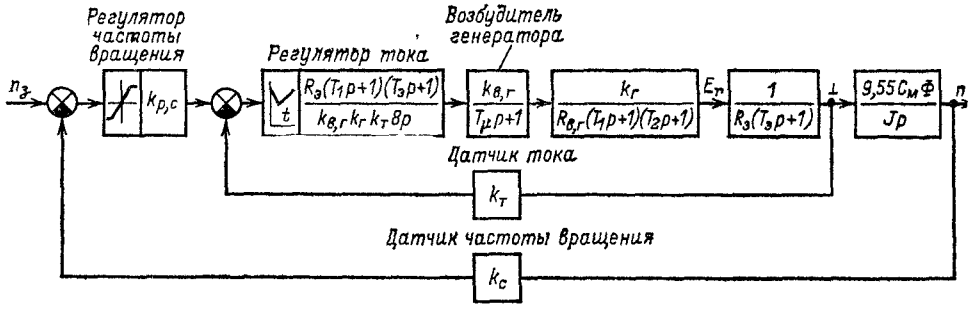


Рис. 8-92. Структурная схема регулирования генератор—двигатель

Внешним контуром служит контур с обратной связью по частоте вращения или э. д. с. двигателя.

Для получения высокого качества переходных процессов регулятор тока необходимо выполнить пропорционально-интегрально-дифференциальным. Упреждающая часть регулятора компенсирует электромагнитную постоянную якорной цепи и большую постоянную обмотки возбуждения генератора $T_э$ и T_1, интегральная постоянная времени регулятора выбирается с учетом малых постоянных времени регулятора, системы фазового управления и малой постоянной времени обмотки возбуждения T_2.

Структурная схема системы регулирования генератор — двигатель приведена на рис. 8-92, а схема ПИД-регулятора — на рис. 8-93

Передаточная функция регулятора

$$H(p) = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \frac{T_x T_y p^2 + (T_x + T_z) p + 1}{T_x p (T_\Phi p + 1)};$$

где

$$T_x = C_1 (R_1 + R_2);$$

$$T_y = C_2 \frac{R_2 R_1 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 + R_2};$$

$$T_z = C_2 (R_2 + R_3);$$

$$T_\Phi = C_2 R_3.$$

Параметры регулятора находим из следующих уравнений:

$$T_1 T_2 = T_x T_y; \quad (8\text{-}28)$$

$$T_1 + T_2 = T_x + T_z; \quad (8\text{-}29)$$

$$\frac{T_x R_0}{R_1 + R_2} = C_1 R_0 = B \frac{k_в k_т k_т}{R_э}; \quad (8\text{-}30)$$

$$B = 2 (T_2 + T_\mu + T_\Phi).$$

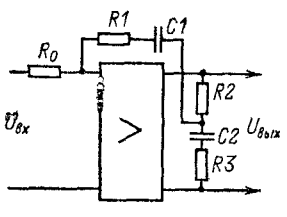


Рис. 8-93. Схема ПИД-регулятора.

Постоянная интегрирования регулятора B найдена при настройке с коэффициентом демпфирования $\sqrt{2}/2$. Постоянная времени фильтра T_Φ принимается равной примерно T_μ. При определении R_1 и R_2 по (8-28)—(8-30) величиной R_3 пренебрегают.

Настройку контура тока ведут в следующем порядке:

1) определяют динамические параметры обмотки возбуждения и якорной цепи (см. § 8-5);

2) расчетным путем определяют T_1 и T_2 и затем параметры ПИД-регулятора;

3) по переходной функции замкнутого контура тока при подаче на вход ступенчатого сигнала проверяют качество настройки регулятора и корректируют при необходимости его параметры.

Наладка контура регулирования частоты вращения электропривода проводится по методике, описанной в § 8-10.

8-17. СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Системы регулирования частоты вращения с изменением потока возбуждения могут быть

разделены на двухзонные, в которых управление частотой вращения производится изменением как напряжения на якоре, так и потока возбуждения, и однозонные, в которых управление частотой вращения производится только изменением потока возбуждения при постоянстве напряжения на якоре. Двухзонные системы регулирования разделяются на системы с зависимым и независимым управлением потоком возбуждения двигателя.

1. СИСТЕМА ДВУХЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ЗАВИСИМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Система состоит из двух взаимосвязанных частей: системы регулирования изменением напряжения на якоре и системы регулирования изменением потока возбуждения. Связующей координатой является э. д. с. или напряжение двигателя. На рис. 8-94 приведена структурная схема системы регулирования частоты вращения с зависимым управлением потоком с использованием в качестве связующей координаты э. д. с. двигателя. Существенное упрощение расчета и настройки достигается при независимом рассмотрении отдельных частей системы регулирования. В действительности при работе привода с ослабленным полем его координаты изменяются под влиянием обеих систем. Так, при изменении частоты вращения изменяется э. д. с. двигателя, а при изменении потока возбуждения изменяются момент двигателя и ток якоря вследствие изменения э. д. с. Степень допущения при независимой настройке двух систем тем меньше, чем больше разница в их быстродействии. В большинстве промышленных электроприводов быстродействие системы регулирования изменением потока возбуждения существенно меньше, чем системы регулирования изменением напряжения на якоре. В дальнейшем обе системы регулирования рассматриваются независимо друг от друга, т. е. предполагается, что изменение потока возбуждения не оказывает влияния на формирование тока якоря, момента и частоты вращения, а изменение частоты вращения — на формирование э. д. с. двигателя.

Система регулирования изменением напряжения на якоре двигателя. Кроме влияния изменения потока возбуждения система характеризуется следующим:

1. Коэффициент передачи объекта регулирования контура частоты вращения (скорости) является переменным и пропорционален потоку возбуждения двигателя. В результате при выборе параметров регулятора частоты вращения из условия оптимальной настройки при номинальном потоке возбуждения частота среза контура при уменьшении потока возбуждения уменьшается приблизительно в $\Phi_д/\Phi$ раз, вследствие чего абсолютное значение статической ошибки $\Delta n_{ст}$ в однократноинтегрирующей системе (с П-регулятором) возрастает (относительное значение ошибки $\Delta n_{ст}/n$ остается неизменным). В двукратноинтегрирующей системе (с ПИ-регулятором) абсолютное значение динамической ошибки $\Delta n_{дин}$ также возрастает с уменьшением потока возбуждения двигателя; время восстановления частоты вращения $t_{вос}$ увеличивается; при диапазоне изменения потока возбуждения $D > 2\left(D = \dfrac{\Phi_н}{\Phi_{min}}\right)$ демпфирование контура существенно уменьшается.

Для оптимальной настройки контура во всем диапазоне изменения потока последовательно с регулятором включается корректирующее устройство с коэффициентом усиления

$$k_{к,у,с} = \Phi_н/\Phi.$$

Параметры регулятора определяются из условия оптимальной настройки контура при номинальном потоке. Изменение $k_{к,у,с}$ осуществляется в функции сигнала потока возбуждения, при отсутствии датчика потока — сигналов э. д. с. и частоты вращения ($\Phi \equiv E/n$). Изменение $k_{к,у,с}$ в функции только сигнала частоты вращения не обеспечивает точного поддержания коэффициента усиления контура регулирования частоты вращения во всем диапазоне регулирования потока и увеличивает взаимное влияние систем регулирования изменением напряжения на якоре и потока возбуждения.

2. Допустимая рабочая перегрузка по току при частоте вращения выше номинальной уменьшается по условию коммутации электрической машины. Ограничение тока при этом может выполняться регулируемым в функции сигнала частоты вращения. Узел формирования переменного сигнала ограничения тока *называется регулятором мощности.*

3. Для приводов, работающих с частыми пусками и торможениями, может оказаться необходимым обеспечение постоянства динамического тока, что целесообразно с точки *зрения нагрева двигателя.* С этой целью задаваемое интегрозадающим устройством *ИЗУ* ускорение привода изменяется пропорционально потоку возбуждения или обратно пропорционально частоте вращения (при частоте вращения *выше основной*).

4. Влияние внутренней отрицательной обратной связи по э. д. с. двигателя (см. § 8-10, п. 2) при ослаблении потока возбуждения уменьшается вследствие увеличения электромеханической постоянной времени привода $T_{эм}$ ($T_{эм} \equiv 1/\Phi^2$).

Влияние э. д. с. при работе привода с ослабленным полем уменьшается также вследствие поддержания постоянства э. д. с. замкнутым контуром регулирования. Для возможности независимой настройки системы регулирования от потока возбуждения влияние э. д. с. двигателя целесообразно компенсировать с помощью дополнительных схемных решений.

Система регулирования изменением потока возбуждения обеспечивает поддержание э. д. с. двигателя и предназначена для ограничения перенапряжения на якоре; при частоте вращения ниже основной система обеспечивает поддержание номинального потока возбуждения.

Возможны два варианта структурного построения САР э. д. с. двигателя: двухконтурная САР с внутренним подчиненным контуром регулирования потока или тока возбуждения (рис. 8-94) и одноконтурная САР с переключающимися *обратными связями* по э. д. с. или току возбуждения двигателя (рис. 8-95).

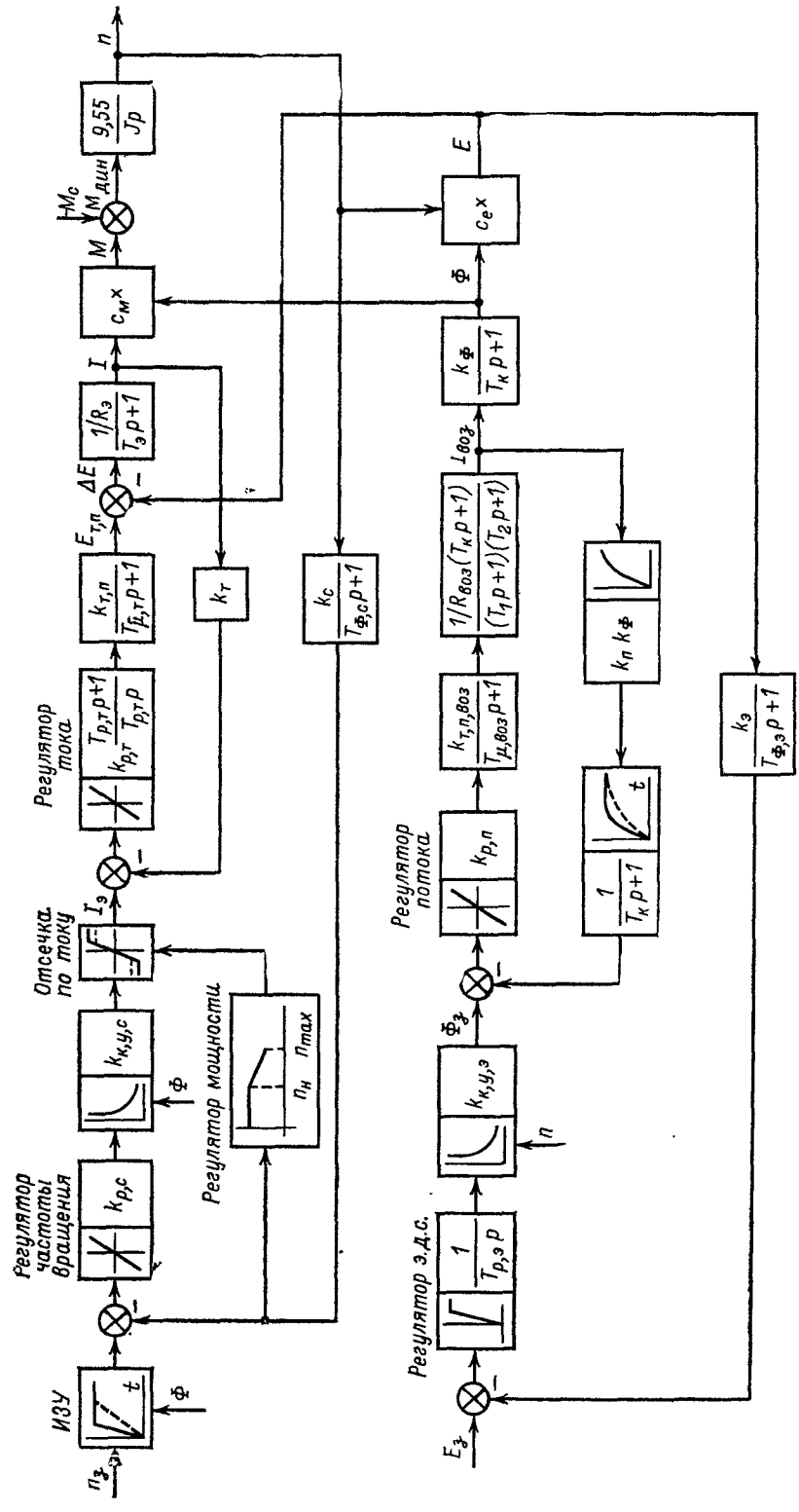


Рис. 8-94. Структурная схема системы регулирования частоты вращения с зависимым управлением потоком возбуждения.

Основным показателем настройки системы регулирования изменением потока возбуждения является перерегулирование по э. д. с. при разгоне привода и сбросе статического момента. Перерегулирование по э. д. с. является косвенным показателем перенапряжения на якоре двигателя, значение которого должно быть ограничено для обеспечения нормальных условий коммутации электрической машины.

Оценка перерегулирования по э. д. с. $\sigma_э$ осуществляется при разгоне привода. Быстродействие контура э. д. с., обеспечивающее ограничение $\sigma_э$ на заданном уровне, может быть определено

$$\omega_{с.э.треб} = \frac{D}{\sigma_э n_н}\frac{dn}{dt}, \qquad (8\text{-}31)$$

Передаточная функция цепи возбуждения (рис. 8-94) определена в соответствии со схемой замещения, приведенной в § 8-6 (рис. 8-43). При этом

$$T_1 = \frac{T_к + T_s + T_{воз}}{2} + \sqrt{\left(\frac{T_к + T_s + T_{воз}}{2}\right)^2 - T_к T_s};$$

$$T_2 = \frac{T_к + T_s + T_{воз}}{2} - \sqrt{\left(\frac{T_к + T_s + T_{воз}}{2}\right)^2 - T_к T_s}.$$

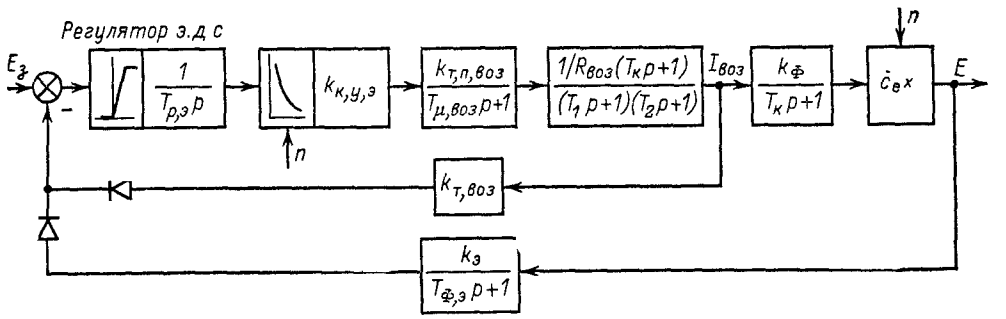


Рис. 8-95. Структурная схема одноконтурной системы регулирования э. д. с.

где $\omega_{с.э.треб}$ — частота среза контура э. д. с. при $n=n_{max}$; $n_н$ — номинальная частота вращения двигателя; dn/dt — заданное ускорение двигателя.

Формула (8-31) справедлива только для систем регулирования изменением потока возбуждения без корректирующего устройства. Для одноконтурной системы с корректирующим устройством в (8-31) $D=1$. Зависимость $\sigma_э$ от параметров двухконтурной системы регулирования с корректирующим устройством будет рассмотрена ниже. Значение $\sigma_э$ обычно ограничивается 0,05—0,1.

В двухконтурной САР выбор структуры внутреннего контура определяется требуемым быстродействием системы регулирования изменением потока возбуждения.

1. *Контур потока возбуждения.* Измерение потока возбуждения обычно осуществляется косвенным методом путем моделирования в цепи обратной связи по току возбуждения звена «ток возбуждения — поток» с передаточной функцией

$$\frac{\Phi(p)}{I_{воз}(p)} = \frac{k_Ф}{T_к p + 1}.$$

Указанная модель совместно с датчиком тока возбуждения является датчиком потока косвенного действия.

Показанный на структурной схеме контур регулирования с косвенным измерением потока можно рассматривать как контур с непосредственным измерением потока и коэффициентом передачи цепи обратной связи $k_п$.

Практически с достаточной степенью точности значения T_1 и T_2 могут быть определены как

$$T_1 = T_к + T_s + T_{воз};$$

$$T_2 = \frac{T_к T_s}{T_к + T_s + T_{воз}}.$$

Для настройки контура регулирования потока возбуждения по модульному оптимуму требуется ПИД-регулятор потока

$$H_{р,п}(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) R_{воз}}{2T_{μ,п} k_{т,п,воз} k_п k_Ф p},$$

где $T_{μ,п}$ — малая постоянная времени контура потока; $k_{т,п,воз}$ — коэффициент усиления тиристорного возбудителя.

Практически для уменьшения влияния помех зона дифференцирования ПИД-регулятора ограничивается фильтром с постоянной времени $T_Ф$ (см. табл. 8-5).

При незначительных требованиях к быстродействию контура э. д. с. постоянная времени $T_2 (T_1 \gg T_2)$ может быть отнесена к малой некомпенсируемой постоянной времени контура $T_{μ,п}$; в этом случае регулятор потока будет иметь ПИ-характеристику

$$H_{р,п}(p) = \frac{(T_1 p + 1) R_{воз}}{2(T_{μ,п} + T_2) k_{т,п,воз} k_п k_Ф p}.$$

В большинстве случаев, в особенности для крупных электрических машин, постоянная времени T_1 даже при насыщенном магнитопроводе значительно превышает малую по-

стоянную времени контура $T_{\mu,п}$ ($T_1 \gg T_{\mu,п}$). Это дает возможность аппроксимировать передаточную функцию объекта регулирования контура интегрирующим звеном; регулятор потока в этом случае будет иметь П-характеристику

$$H_{р,п}(p) = k_{р,п} = \frac{T_1 R_{воз}}{2(T_{\mu,п} + T_2) k_{т,п,воз} k_п k_Ф}$$

или ПД-характеристику при необходимости компенсации постоянной времени T_2

$$H_{р,п}(p) = \frac{T_1 R_{воз}(T_2 p + 1)}{2T_{\mu,п} k_{т,п,воз} k_п k_Ф}.$$

Аналогично варианту с ПИД-регулятором зона дифференцирования ограничивается.

Параметры T_1, T_2, $k_Ф$ являются переменными. Наибольшее влияние на настройку контура оказывает изменение постоянной времени T_2, так как отношение $T_1/k_Ф = \text{const}$ во всем диапазоне изменения потока возбуждения. При расчете параметров регулятора потока следует принимать наибольшее значение T_2, соответствующее минимальному потоку возбуждения двигателя.

2. *Контур регулирования тока возбуждения* отличается от контура потока отсутствием модели звена «ток возбуждения — поток» в цепи обратной связи, в которую включается фильтр с постоянной времени $T_ф$. Характеристика регулятора принимается пропорционально-интегральной или пропорциональной; его передаточные функции могут быть получены заменой в приведенных выше передаточных функциях регулятора потока возбуждения произведения коэффициентов $k_ф k_п$ на коэффициент $k_{т,воз}$ (коэффициент передачи цепи обратной связи по току возбуждения).

Контур тока возбуждения является существенно нелинейным; его оптимальная настройка может быть обеспечена только при одном настроечном значении тока возбуждения. Параметры регулятора $k_{р,т,воз}$ и $T_{р,т,воз}$, а также постоянная времени фильтра $T_ф$ выбираются из условия обеспечения демпфирования во всем диапазоне изменения тока возбуждения. Наиболее целесообразно оптимальную настройку контура обеспечить при номинальном токе возбуждения.

3. *Контур регулирования э. д. с.* в большинстве случаев настраивается без использования корректирующего устройства. В этом случае контур является нелинейным и его оптимальная настройка возможна только при одном настроечном значении частоты вращения. При увеличении частоты вращения от номинальной до максимальной частота среза контура возрастает в $n/n_н$ раз, при этом перерегулирование э. д. с. $\sigma_э$ уменьшается, однако одновременно уменьшается демпфирование. Таким образом, в начале ослабления поля имеют место максимальные значения $\sigma_э$ и демпфирования; поэтому при отсутствии корректирующего устройства оптимальная настройка контура должна производиться при максимальной частоте вращения двигателя. При двухконтурной системе регулирования с подчиненным контуром потока передаточная функция регулятора э. д. с.

$$H_{р,э}(p) = \frac{k_п \omega_{с.э.треб}}{c_e n_{max} k_э p},$$

где $k_э$ — коэффициент передачи цепи обратной связи по э. д. с.

При

$$\frac{1}{\omega_{с,э,треб} T_{\mu,э}} < 2,$$

где $T_{\mu,э}$ — малая постоянная времени контура э. д. с.; $T_{ф,э}$ — постоянная времени цепи измерения э. д. с.; $T_{к,п}$ — эквивалентная постоянная времени контура регулирования потока, колебательность контура недопустимо возрастает. Необходимое демпфирование может быть обеспечено за счет увеличения быстродействия внутреннего контура потока (уменьшением $T_{к,п}$) или уменьшения постоянной времени $T_{ф,э}$. Последнее может быть достигнуто изменением схемы измерения э. д. с. в соответствии с одним из следующих вариантов:

а) постоянная времени фильтра в цепи измерения напряжения уменьшается до значения, обеспечивающего допустимый уровень пульсаций выпрямленного напряжения на выходе датчика э. д. с.;

б) то же, что в п. «а», но дополнительно включено форсирующее звено в цепи измерения тока, обеспечивающее синфазное измерение тока и напряжения;

в) то же, что в п. «а», но в качестве сигнала IR-компенсации используется сигнал заданного тока вместо истинного (такое решение используется рядом зарубежных фирм).

Другим способом обеспечения заданного демпфирования контура является изменение структуры регулятора э. д. с. на пропорционально-интегральную; при этом пропорциональная составляющая выбирается при настройке.

Одной из возможных мер по ограничению перенапряжения на двигателе является уменьшение значения э. д. с., при котором начинается ослабление поля; в этом случае относительное значение перенапряжения на двигателе уменьшится. Обычно принимают $E_{осл} = (0{,}9 \div 0{,}95) E_н$, где $E_{осл}$ — значение э. д. с., при котором начинается ослабление поля. При этом двигатель недоиспользуется как по мощности, так и по частоте вращения.

Если указанные меры не обеспечивают необходимого ограничения перенапряжения на двигателе (что обычно имеет место в электроприводах с большими ускорениями и замедлениями при одновременно больших значениях D), то применяется линеаризация контура э. д. с. с помощью корректирующего устройства с коэффициентом усиления

$$k_{к,у,э} = \frac{n_{max}}{n},$$

включенного последовательно с регулятором э. д. с. Изменение $k_{к,у,э}$ осуществляется в функции сигнала частоты вращения; при этом перенапряжение на якоре двигателя определяется главным образом быстродействием контура

потока. Изменение $k_{к,у,э}$ в функции сигнала потока менее эффективно

При подчиненном контуре регулирования тока возбуждения регулятор э. д. с. обычно принимается интегральным. Необходимая для оптимальной настройки контура передаточная функция регулятора э. д. с.

$$H_{р,э}(p) = \frac{k_{т,воз}}{2T_{\mu,э}\, k_{\Phi}\, c_e\, n k_э\, p}.$$

Параметры k_{Φ}, n, $T_{\mu,э}$ являются переменными. При расчете целесообразно учитывать их значения, соответствующие минимальному току возбуждения (максимальной частоте вращения). В этом случае при усилении поля быстродействие контура уменьшается, демпфирование увеличивается.

Одноконтурная система регулирования э. д. с., структурная схема которой показана на рис. 8-95, представляет собой систему с переключающимися обратными связями по э. д. с. и току возбуждения двигателя. Переключение сигналов тока возбуждения и э. д. с. осуществляется схемой выделения максимума: при частоте вращения ниже основной, когда сигнал тока возбуждения меньше сигнала э. д с., одноконтурная система поддерживает номинальный ток возбуждения двигателя; при частоте вращения выше основной, когда сигнал э. д. с. за счет ошибки регулирования больше сигнала тока возбуждения, одноконтурная система поддерживает заданное значение э. д. с.

Структура и параметры регулятора выбираются из условия оптимальной настройки по э. д. с.; при этом показатели настройки по току возбуждения оказываются приемлемыми. Регулятор в одноконтурной системе регулирования в зависимости от требуемого быстродействия принимается с ПИД- или ПИ-характеристикой с передаточными функциями соответственно

$$H_{р,э}(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) R_{воз}\, \omega_{с,э,треб}}{c_e\, n k_{\Phi}\, k_{т,п,воз}\, k_э\, p}$$

или

$$H_{р,э}(p) = \frac{(T_1 p + 1) R_{воз}\, \omega_{с,э,треб}}{c_e\, n k_{\Phi}\, k_{т,п,воз}\, k_э\, p}.$$

В последнем случае постоянная времени T_2 учитывается в составе малой постоянной времени контура $T_{\mu,э}$. Параметры T_1, T_2, k_{Φ}, n являются переменными. Наибольшее влияние на настройку контура оказывает изменение параметров n и T_2, так как отношение T_1/k_{Φ}=const во всем диапазоне изменения потока возбуждения. При необходимости аналогично двухконтурной системе регулирования может быть включено корректирующее устройство, обеспечивающее оптимальную настройку контура э. д. с. во всем диапазоне изменения тока возбуждения.

Настройке системы регулирования предшествуют расчет и экспериментальное определение параметров привода (см. § 8-5, 8-6). В соответствии с приведенными выше передаточными функциями регуляторов и данными табл. 8-5 рассчитываются параметры регуляторов, которые должны соответствовать нагрузочной способности блоков УБСР (см. § 8-4) и удовлетворять требованиям помехоустойчивости (см. § 8-18). Полученные в результате расчета параметры регуляторов являются приближенными, что связано с погрешностями расчетных формул и экспериментов, а также допущениями, при которых произведен расчет. При настройке отдельных контуров и системы регулирования в целом расчетные параметры регуляторов должны быть уточнены.

Рекомендуется следующая последовательность настройки двухзонной системы регулирования с зависимым управлением потоком возбуждения двигателя;

1. Настраиваются в любой очередности контуры регулирования тока якоря и потока (тока) возбуждения.

2. Настраивается контур регулирования частоты вращения. Предварительная настройка контура регулирования потока (тока) возбуждения (или его замыкание при расчетных параметрах регулятора) обеспечит при этом точное поддержание его заданного значения.

3. Настраивается контур регулирования э. д. с. двигателя.

4. Производится комплексное опробование привода во всех технологических режимах его работы, после чего при необходимости корректируются параметры регуляторов или схемные решения с целью обеспечения заданных показателей.

Настройка отдельных контуров регулирования имеет некоторые общие особенности:

1. При линеаризации контуров регулирования установкой последовательно с регулятором корректирующего устройства осуществляется ограничение выходных сигналов как регулятора, так и корректирующего устройства. Такое ограничение часто выполняется общим. В этом случае может возникнуть необходимость обеспечения устойчивости контура ограничения, которая решается одним из следующих способов:

уменьшением числа усилительных элементов в контуре ограничения;

установкой на входе усилителя по сигналу ограничения резистора, сопротивление которого должно быть таким, чтобы жесткость ограничения уменьшалась несущественно.

Регулятор э. д. с. при двухконтурной системе регулирования с этой точки зрения целесообразно выполнять пропорционально-интегральным.

2. При настройке контуров регулирования потока (тока) возбуждения и э. д. с. возможно ограничение напряжения возбуждения, что не должно иметь места. Максимально допустимое значение скачка сигнала задания непостоянно. Оно зависит от параметров привода — постоянной времени цепи возбуждения и кратности форсировки напряжения возбудителя, а также от настроечных значений — начального потока возбуждения, направления его изменения и параметров регуляторов. Отсутствие ограничения напряжения возбуждения в процессе настройки необходимо контролировать по выходному сигналу регулятора на входе СИФУ возбудителя; регулятор не должен насыщаться.

Настройка контуров регулирования тока и частоты вращения осуществляется в основ-

ном как для однозонных систем регулирования.

Настройка контура регулирования потока (тока) возбуждения выполняется при отключенном якоре двигателя. Настройка существенно различается для контуров регулирования потока и тока возбуждения двухконтурной системы регулирования.

Настройка контура регулирования потока возбуждения разделяется на настройку датчика и настройку регулятора потока.

1. *Настройка датчика потока* включает настройку его статической и динамической характеристик.

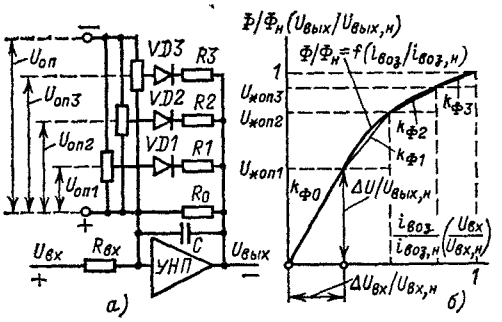


Рис. 8-96. Настройка статической характеристики датчика потока.

а — схема нелинейного преобразователя — датчика потока; *б* — аппроксимация кривой намагничивания электродвигателя.

Статическая характеристика датчика потока должна повторять кривую намагничивания двигателя. Для расчета нелинейного преобразователя (рис. 8-96, *а*), реализующего указанную характеристику, может быть применен следующий графоаналитический метод. Кривая намагничивания выражается в относительных единицах (рис. 8-96, *б*). За базовые величины принимают номинальные значения тока возбуждения $I_{воз,н}$ и потока $\Phi_н$. Входное $U_{вх}$ и выходное $U_{вых}$ напряжения нелинейного преобразователя тоже выражают в относительных единицах и откладывают на тех же осях координат. За базовые принимают величины $U_{вх,н}$, $U_{вых,н}$, соответствующие номинальному потоку возбуждения. Кривая намагничивания аппроксимируется тремя-четырьмя отрезками прямой. Полученная ломаная линия представляет собой требуемую характеристику нелинейного преобразователя (рис. 8-96, *а*). Для ее реализации напряжения подпора $U_{оп,i}$ диодов VD_i выбирают в соответствии с координатами точек излома аппроксимированной кривой на оси ординат

$$U_{оп,i} = U_{*оп,i}\, U_{вых,н};$$

сопротивления резисторов R_i цепи обратной связи усилителя нелинейного преобразователя *УНП*

$$R_0 = R_{вх}\, k_{ф,0};$$

$$R_i = R_{вх}\, \frac{k_{ф,(i-1)}\, k_{ф,i}}{k_{ф,(i-1)} - k_{ф,i}},$$

где $k_{ф,i}$ — коэффициент наклона участка аппроксимированной кривой,

$$k_{ф,i} = \frac{\Delta U_{вых,i}}{\Delta U_{вх,i}}.$$

После установки резисторов с расчетными сопротивлениями в схему *УНП* производится экспериментальная проверка соответствия статической характеристики *УНП* — аппроксимированной кривой намагничивания.

Динамическая характеристика датчика потока должна представлять собой апериодическое звено с постоянной времени $T_н$. Для удовлетворения указанного требования цепь обратной связи *УНП* шунтируется конденсатором *С*. Расчетная емкость конденсатора

$$C = \frac{T_{к0}}{R_0},$$

где $T_{к0}$ — постоянная времени вихревых токов на начальном участке кривой намагничивания.

Целесообразно настраивать динамическую характеристику датчика потока на совпадение переходных процессов на выходах настраиваемого датчика и такого измерителя потока, достоверность которого заранее определена. В качестве такого измерителя могут быть использованы:

а) датчик э. д. с. Холла, установленный под полюсами в воздушном зазоре заторможенного двигателя;

б) датчик напряжения на двигателе, если имеется возможность запустить налаживаемый двигатель в режиме генератора на холостом ходу или если при торможении «выбегом» изменение частоты вращения за время эксперимента пренебрежимо мало;

в) датчик э. д. с. двигателя, если частота вращения при изменении потока возбуждения не меняется.

Указанное в п. «в» справедливо при малых изменениях потока возбуждения и работе двигателя на холостом ходу с замкнутыми контурами регулирования тока и частоты вращения, а также с компенсацией влияния э. д. с. двигателя. В этом случае ток двигателя практически не меняется; незначительное изменение потока и малый ток холостого хода приводят к тому, что частота вращения двигателя остается практически неизменной. При проведении эксперимента необходимо контролировать постоянство тока и частоты вращения двигателя, а также учитывать инерционность датчика э. д. с.

Для повышения точности настройки датчика потока изменение тока возбуждения при настройке его динамической характеристики указанными способами должно быть возможно более быстрым. Для этого контур потока возбуждения целесообразно замкнуть при расчетных параметрах регулятора. На вход регулятора подается сигнал задания начального потока возбуждения и дополнительный ступенчатый сигнал задания малой величины потока.

Таким образом, сравнивая переходные процессы на выходе нелинейного преобразователя и эталонного измерителя потока, можно подобрать емкость *С*, обеспечивающую их идентичность. Подбор значения емкости осуществляется при одном из значений начально-

го потока возбуждения. Затем настройка датчика потока проверяется во всем диапазоне регулирования поля.

Схема замещения цепи возбуждения двигателя, по которой составлена рассматриваемая здесь передаточная функция цепи возбуждения, не является единственно возможной (см. § 8-6), что связано с допущениями, сделанными при ее составлении, поэтому принятая динамическая характеристика датчика потока может не совсем точно отражать реальные процессы, происходящие в двигателе.

2. *Настройка регулятора потока* возбуждения производится по виду переходного процесса на выходе датчика потока. На вход регулятора подается постоянный сигнал задания, обеспечивающий начальное значение потока и дополнительный ступенчатый сигнал. Регулятор настраивается вначале при минимальном потоке возбуждения. Затем настройка проверяется во всем диапазоне регулирования поля. При необходимости параметры регулятора корректируются с целью обеспечения примерной идентичности настройки независимо от потока. Контур, несмотря на использование датчика потока, является нелинейным, что не позволяет обеспечить полную идентичность настройки во всем диапазоне изменения потока возбуждения.

Ниже приводится рекомендуемая методика настройки ПИД-регулятора (см. табл. 8-5), которая заключается в следующем:

а) по условиям помехоустойчивости выбирается постоянная времени ограничения зоны дифференцирования $T_Ф = 0{,}001 \div 0{,}002$ с, которая в процессе настройки поддерживается постоянной;

б) изменением параметров П- и Д-частей регулятора (при отсутствии И-части) обеспечивается переходный процесс в контуре с максимальным быстродействием при перерегулировании не более 5 %;

в) вводится И-часть регулятора с расчетной постоянной времени интегрирования; перерегулирование по потоку практически не должно изменяться.

Наладочные операции для пассивного ПИД-регулятора выполняются в следующей последовательности:

а) устанавливаются резистор $R_Ф$ и конденсатор C_2; вместо резисторов R_1, R_0 подключаются магазины сопротивлений;

б) сопротивления R_1, R_0 уменьшаются в 2÷3 раза по сравнению с расчетными (однако не более, чем позволяет нагрузочная способность блоков УБСР);

в) изменением сопротивления R_1 контур настраивается с перерегулированием 15—20 % (при увеличении R_1 перерегулирование увеличивается, при уменьшении R_1 — уменьшается);

г) увеличением сопротивления R_0 при сохранении неизменным отношения R_1/R_0 перерегулирование устраняется;

д) последовательным повторением операций по пп. «в», «г» контур настраивается с перерегулированием 5 % при максимальном быстродействии;

е) определяется емкость конденсатора

$$C_1 = \frac{T_1}{R_1},$$

где T_1 — постоянная времени, определенная при $Ф_н$;

ж) конденсатор C_1 с расчетным значением емкости устанавливается в схему регулятора; в большинстве случаев это не должно оказывать существенного влияния на характер переходного процесса; при значительных отклонениях показателей переходного процесса от ранее настроенных емкость конденсатора C_1 должна быть скорректирована.

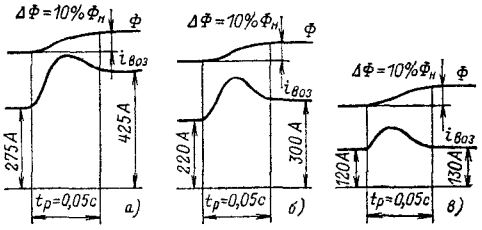


Рис. 8-97. Осциллограммы настройки контура регулирования потока возбуждения главного электропривода блюминга 1150.

а — при потоке возбуждения близком к номинальному; *б* — при промежуточном значении потока возбуждения; *в* — при потоке возбуждения, близком к минимальному.

Параметры входных цепей по каналам задания и обратной связи изменяются одновременно. Сигнал задания начального потока возбуждения на вход регулятора может быть подан через дополнительный резистор.

Методика настройки активного ПИД-регулятора аналогична приведенной выше с учетом соотношений, указанных в табл. 8-5.

При более простом (ПД, ПИ или П) регуляторе потока его настройка соответственно упрощается. На рис. 8-97 в качестве примера приведены осциллограммы настройки контура регулирования потока возбуждения главного привода блюминга 1150.

Настройка контура регулирования тока возбуждения в двухконтурной системе регулирования заключается в выборе постоянной времени фильтра в цепи обратной связи и параметров регулятора (регулятор принимается пропорционально-интегральным или пропорциональным). При настроечном значении начального тока возбуждения настройка контура может быть выполнена аналогично контуру регулирования потока возбуждения по методике, изложенной выше В отличие от контура потока контур тока возбуждения является существенно нелинейным. Показатели настройки контура в различных точках диапазона регулирования тока возбуждения значительно отличаются. В связи с этим может быть рекомендована следующая методика его настройки:

а) контур настраивается при номинальном токе возбуждения; переходный процесс в контуре контролируется с помощью осциллографа на выходе фильтра в цепи обратной связи, а при наличии пассивного фильтра — на выходе датчика тока возбуждения через фильтр с постоянной времени $T_Ф$; изменением параметров регулятора (в основном $k_{р.т.в}$) и постоянной

времени фильтра (изменяется в пределах расчетных значений от $T_{к,min}$ до $T_{к,max}$) необходимо добиться максимального быстродействия контура при перерегулировании 5 %;

б) проверяется настройка контура во всем рабочем диапазоне изменения тока возбуждения; при этом контролируется выходной сигнал датчика тока возбуждения; перерегулирование выходного сигнала не должно превышать 15—25 % при допустимой колебательности. В случае необходимости настроечные параметры корректируются.

В одноконтурной системе регулирования настройка контура тока возбуждения проверяется только на отсутствие колебательности при номинальном токе возбуждения. Параметры регулятора выбираются из условий оптимальной настройки контура по э. д. с. двигателя.

Настройка контура регулирования э. д. с. производится при вращающемся двигателе и замкнутом контуре регулирования частоты вращения.

Настройке контура должна предшествовать настройка схемы измерения э. д. с. двигателя, которая заключается в масштабировании сигналов напряжения и тока якоря на входе датчика э. д. с. и выборе параметров фильтра в канале измерения напряжения для обеспечения синфазности измеряемых координат на входе датчика э. д. с.

В двухконтурной системе параметры регулятора устанавливаются в соответствии с расчетом (связь параметров регулятора с расчетной передаточной функцией показана в табл. 8-5).

При заданном номинальном значении э. д. с. двигателя привод разгоняется с максимальным заданным темпом до максимальной частоты вращения. С помощью осциллографа контролируется выходной сигнал датчика э. д. с.; проверяется отсутствие колебательности при максимальной частоте вращения и перерегулирования по э. д. с. в начальный момент ослабления поля. Перерегулирование по э. д. с. не должно превышать допустимого значения. При необходимости подстройка производится изменением постоянной времени интегрирования регулятора э. д. с.

В одноконтурной системе методика настройки контура э. д. с. в общем случае аналогична рассмотренной выше для двухконтурной системы.

Проверка перенапряжения на входе двигателя как в одноконтурной, так и в двухконтурной системах осуществляется в технологических режимах работы привода при разгоне и «сбросе» статического момента. Осциллограф подключается к выходу датчика напряжения схемы измерения э. д. с. двигателя.

2. СИСТЕМА ДВУХЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С НЕЗАВИСИМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПОТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Система состоит из двух частей: системы регулирования изменением напряжения на якоре и системы регулирования потока возбуждения (рис. 8-98). Узел задания частоты вращения, включающий *ИЗУ*, является общим для обеих систем. Разделение режимов работы осуществляется по сигналу задания и заключается в запрете одновременного изменения сигналов задания для обеих систем; указанное разделение режимов осуществляется с помощью двух нелинейных преобразователей *1НП* и *2НП* на выходе *ИЗУ*.

Система регулирования изменением напряжения на якоре двигателя, как правило, представляет собой двухконтурную САР с внешним контуром регулирования э. д. с. и внутренним подчиненным контуром регулирования тока якоря. Система регулирования потока возбуждения представляет собой одноконтурную САР с контуром регулирования потока или тока возбуждения. В отличие от САР с зависимым управлением потоком возбуждения э. д. с. двигателя не контролируется, а задание потока формируется параметрически по заранее рассчитанному оптимальному закону управления (нелинейный преобразователь *3НП*). Характеристика нелинейного преобразователя *3НП* выбирается в зависимости от требуемого закона изменения потока возбуждения во времени. Так, для обеспечения переходного процесса с постоянным динамическим током $I_{дин}$ поток двигателя должен изменяться по следующему закону:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{9{,}55 c_e^2 I_{дин}}{J E_н} \Phi^3,$$

а для поддержания постоянства ускорения dn/dt — в соответствии с выражением

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{c_e}{E_н} \frac{dn}{dt} \Phi^2.$$

В любом варианте характеристика нелинейного преобразователя *3НП* такова, что частота вращения даже при ее значении выше основного практически пропорциональна заданию на выходе *ИЗУ* (при условии пренебрежения моментом статической нагрузки) при неизменном значении э. д. с. двигателя.

При необходимости ограничение сигнала задания тока может быть выполнено регулируемым с помощью регулятора мощности в функции сигнала, пропорционального потоку возбуждения.

Схема задания потока возбуждения должна предусматривать ограничение максимального и минимального значения потока. В рассматриваемой САР (рис. 8-98) ограничение выходного сигнала *3НП* должно быть для этого выполнено на уровне $\Phi_н$—Φ_{min}.

Настройка контуров регулирования тока якоря и потока возбуждения выполняется аналогично рассмотренной в п. 1 данного параграфа. Настройка контура регулирования э. д. с. выполняется аналогично настройке контура регулирования частоты вращения, однако быстродействие контура э. д. с. при инерционной схеме измерения будет несколько меньше, чем контура частоты вращения. Несмотря на это, построение схемы с обратной связью по э. д. с. является вполне оправданным при частых сбоях тахогенераторов, работающих в весьма тяжелых условиях с точки зрения динамических нагрузок на вал двигателя.

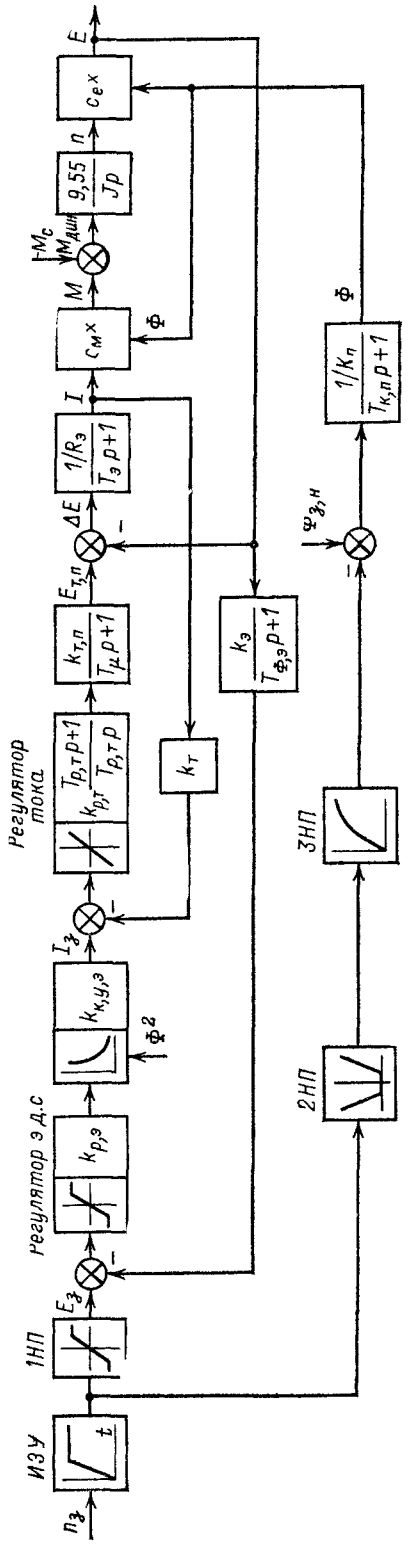


Рис. 8-98. Структурная схема системы регулирования частоты вращения с независимым управлением потоком возбуждения.

Коэффициент передачи объекта регулирования контура регулирования э. д. с. пропорционален Φ^2. При отсутствии корректирующего устройства оптимальная настройка контура возможна только при одном значении потока возбуждения. В этом случае контур необходимо настраивать при номинальном потоке возбуждения; при значениях потока $\Phi < \Phi_н$ частота среза и быстродействие контура уменьшаются. Так как регулирование э. д. с. двигателя эквивалентно регулированию частоты вращения вследствие независимого регулирования потока возбуждения, то точность поддержания частоты вращения в такой системе может оказаться неудовлетворительной. В этом случае предусматривается линеаризация контура э. д. с. с помощью корректирующего устройства, коэффициент передачи которого

$$k_{к,у,э} = \frac{\Phi_н^2}{\Phi^2}.$$

Сигнал, пропорциональный Φ^2, формируется с помощью функционального преобразователя — квадратора из сигнала датчика потока возбуждения

3. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ПОТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ (ОДНОЗОННАЯ)

Напряжение на якоре двигателя при таком способе регулирования частоты вращения поддерживается постоянным и изменяется только в пускотормозных режимах. Регулирование частоты вращения изменением потока возбуждения применяется в основном для многодвигательных электроприводов, работающих в режиме стабилизации частоты вращения; якорные цепи приводных двигателей в таких электроприводах подключаются к групповому регулируемому источнику питания с жесткой стабилизацией его напряжения; обмотки возбуждения двигателей питаются от индивидуальных возбудителей.

Основной разновидностью применяемых в настоящее время структур САР частоты вращения изменением потока возбуждения является трехконтурная (рис. 8-99), в которой внешнему контуру регулирования частоты вращения подчинены внутренние контуры регулирования тока якоря и потока возбуждения.

Контур регулирования потока аналогичен рассмотренному ранее в составе двухзонной САР.

Контур регулирования тока является нелинейным, коэффициент передачи его объекта регулирования пропорционален частоте вращения n. Для обеспечения оптимальных динамических показателей во всем диапазоне изменения частоты вращения применяется линеаризация контура изменением с помощью корректирующего устройства коэффициента усиления регулятора тока обратно пропорционально частоте вращения. При оптимизации по модульному оптимуму передаточная функция регулятора тока

$$H_{р,т}(p) = \frac{(T_э p + 1) k_п R_э}{2T_{μ,т} c_в n_{max} k_т},$$

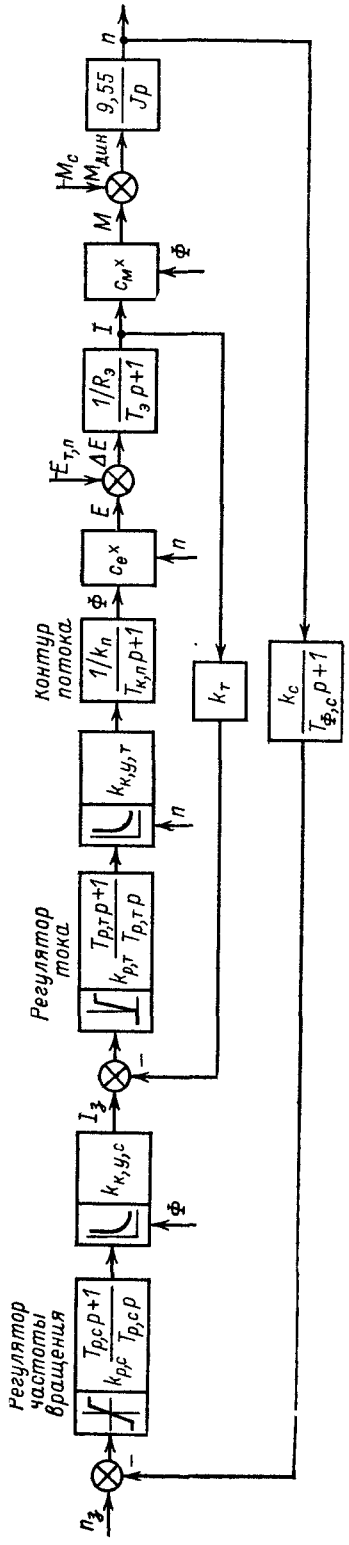


Рис. 8-99. Структурная схема трехконтурной системы регулирования частоты вращения изменением потока возбуждения.

а коэффициент усиления корректирующего устройства должен иметь переменное значение

$$k_{к,у} = \frac{n_{max}}{n}.$$

Контур регулирования частоты вращения также является нелинейным из-за переменного значения потока возбуждения в объекте регулирования. Для обеспечения оптимальных динамических показателей во всем диапазоне изменения частоты вращения применяется линеаризация контура изменением коэффициента передачи регулятора частоты вращения обратно пропорционально потоку возбуждения с помощью корректирующего устройства. Регулятор частоты вращения применяется с П- или ПИ-характеристикой в зависимости от технологических требований к статической точности регулирования.

Передаточные функции регулятора и корректирующего устройства аналогичны рассмотренным для двухзонной САР с зависимым управлением потоком возбуждения. В данной системе регулирования аналогично САР частоты вращения изменением напряжения на якоре двигателя ограничение выходного сигнала регулятора частоты вращения обеспечивает ограничение тока. Ограничение происходит за счет увеличения потока возбуждения, вследствие чего наибольшая эффективность действия ограничения тока будет при максимальной частоте вращения n_{max}; по мере уменьшения частоты вращения эффективность действия токовой отсечки уменьшается, так как $\Phi_{max} = \Phi_н$.

При необходимости ограничение сигнала задания тока может быть выполнено регулируемым с помощью регулятора мощности аналогично САР с зависимым управлением потоком возбуждения.

В данной САР изменение э. д. с. двигателя происходит не только под действием потока возбуждения, но также вследствие изменения частоты вращения, что равносильно влиянию э. д. с. двигателя в САР частоты вращения изменением напряжения на якоре двигателя. В режиме приложения момента статической нагрузки темп нарастания тока вследствие указанного выше увеличивается. Из-за компаундирующего действия контура регулирования тока в САР с ПИ-регулятором частоты вращения это приводит к уменьшению динамической ошибки и увеличению времени восстановления частоты вращения; в САР с П-регулятором первоначальное падение частоты вращения уменьшается. Влияние внутренней отрицательной обратной связи по э. д. с. двигателя уменьшается с уменьшением потока возбуждения.

Возможно построение двухконтурной САР частоты вращения изменением потока возбуждения. На рис. 8-100 приведена структурная схема одного из вариантов двухконтурной САР, в которой внешнему контуру регулирования частоты вращения подчинен внутренний контур регулирования потока возбуждения. Отсутствие контура регулирования тока делает невозможным обеспечение ограничения по току, поэтому область применения двухконтурной САР ограничена. Контур регулирования потока аналогичен рассмотренному ранее

для двухзонной САР частоты вращения. Контур регулирования частоты вращения при постоянстве напряжения на якоре двигателя является практически линейным, так как коэффициент передачи объекта регулирования контура пропорционален произведению $n\Phi$.

тора предыдущего контура, ограниченного на уровне $\Phi_н$;

б) на отдельные входы регулятора потока подают сигналы задания номинального потока $\Phi_н$ от отдельного источника и задание на уменьшение потока с выхода регулятора пре-

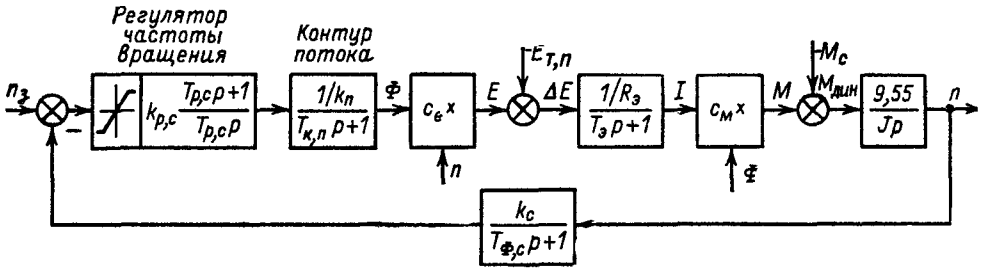


Рис. 8-100. Структурная схема двухконтурной системы регулирования частоты вращения изменением потока возбуждения.

Регулятор частоты вращения при настройке по модульному оптимуму принимается с П-характеристикой и коэффициентом усиления

$$k_{р,с} = \frac{Jk_п R_э}{2T_{μ,с}\cdot 9{,}55 c_e c_м \Phi n k_с};$$

при настройке по симметричному оптимуму — с ПИ-характеристикой и передаточной функцией

$$H_{р,с}(p) = k_{р,с}\frac{T_{р,с}p+1}{T_{р,с}p},$$

где $T_{р,с}$ — постоянная времени регулятора частоты вращения, $T_{р,с}=4T_{μ,с}$.

Значение электромагнитной постоянной времени якорной цепи $T_э$ входит в состав малой некомпенсируемой постоянной времени контура $T_{μ,с}$. Поэтому применение двухконтурной САР с точки зрения обеспечения максимального быстродействия целесообразно по сравнению с трехконтурной только при условии, что

$$T_{к,п} + T_э \leqslant T_{к,т}, \qquad (8\text{-}32)$$

где $T_{к,т}$ — постоянная времени замкнутого оптимизированного контура регулирования тока в трехконтурной САР.

Вследствие отсутствия компаундирующего действия контура регулирования тока положительное влияние внутренней отрицательной обратной связи по э. д. с. при приложении момента статической нагрузки больше, чем в трехконтурной САР, что при выполнении условия (8-32) обеспечивает лучшие динамические показатели привода.

Независимо от варианта структуры САР необходимо обеспечение ограничения максимального и минимального значений потока возбуждения; при этом наиболее часто применяют два варианта схемной реализации указанных ограничений:

а) на вход регулятора потока через схему сравнения на диодах подают сигналы задания минимального потока Φ_{min} от отдельного источника и задания потока с выхода регулядыдущего контура, который должен изменяться от нуля до значения $\Phi_н$—Φ_{min}.

Настройка системы регулирования осуществляется последовательно по контурам регулирования, начиная с внутреннего контура. При настройке отдельных контуров регулирования должны быть учтены некоторые общие особенности:

а) необходимость обеспечения устойчивости контуров ограничения выходной координаты регулятора при наличии корректирующего устройства;

б) необходимость запаса по напряжению тиристорного возбудителя;

в) необходимость контроля отсутствия ограничения потока возбуждения на минимальном и максимальном уровнях: контроль осуществляется по сигналу задания потока возбуждения с выхода регулятора предыдущего контура.

Особенности настройки по пп. «а» и «б» рассмотрены выше для двухзонной САР.

Настройка контура регулирования потока возбуждения аналогична рассмотренной выше; его быстродействие определяет предельно возможное быстродействие контура частоты вращения, поэтому регулятор потока принимается, как правило, с ПИД- или ПД-характеристикой.

Настройка контура тока осуществляется при вращающемся двигателе в режиме его подразгона с замкнутым контуром частоты вращения; это позволяет легко установить начальное значение потока возбуждения и ограничить частоту вращения на заданном уровне. В зависимости от прерывистого или непрерывного характера начального тока якоря рекомендуются два способа настройки контура.

I. При прерывистом начальном токе последовательность выполнения наладочных операций следующая:

а) выставляются расчетные параметры регуляторов тока и частоты вращения; расчет производится в соответствии с передаточными функциями регуляторов на основании данных табл. 8-5;

б) устанавливается уровень ограничения сигнала задания тока на выходе регулятора

частоты вращения на уровне, соответствующем минимальному непрерывному току якоря;

в) через тумблер и дополнительный резистор на входы регуляторов тока и частоты вращения подключаются источники питания (тумблеры разомкнуты);

г) сигналом от задатчика интенсивности привод разгоняется до частоты вращения, при

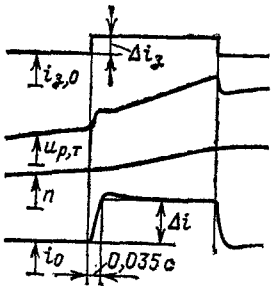


Рис. 8-101. Осциллограмма настройки контура регулирования тока электропривода редукционного стана.

которой начинается уменьшение потока возбуждения;

д) на вход регулятора частоты вращения тумблером подается дополнительный ступенчатый сигнал задания частоты вращения, обеспечивающий ограничение регулятора частоты вращения; значение этого сигнала должно быть таким, чтобы суммарный сигнал задания частоты вращения не превышал максимального значения;

е) после установления тока на вход регулятора тока тумблером подается и затем снимается дополнительный сигнал задания тока, значение которого должно обеспечивать новое установившееся значение тока; продолжительность включения тумблера выбирается такой, чтобы частота вращения не превысила максимального значения;

ж) переходный процесс по току контролируется по осциллографу; для обеспечения оптимальной настройки контура параметры регулятора выбираются в соответствии с методикой, изложенной выше для систем с регулированием частоты вращения изменением напряжения на якоре.

На рис. 8-101 в качестве примера приведена осциллограмма настройки контура тока электропривода редукционного стана.

2. При непрерывном начальном токе методика настройки контура упрощается; дополнительный сигнал задания на вход регулятора тока не подается. Переходный процесс по току контролируется при дополнительном ступенчатом сигнале задания на входе регулятора частоты вращения, обеспечивающем установившееся значение тока.

Динамические показатели трехконтурной САР могут быть скорректированы с помощью гибкой положительной обратной связи по э. д. с. двигателя. Реализация этой связи осуществляется подачей сигнала с датчика э. д. с. через *RC*-цепь на вход регулятора тока. Параметры *RC*-цепи выбираются экспериментально при настройке привода.

Контур регулирования частоты вращения настраивается аналогично рассмотренному выше для системы регулирования частоты вращения изменением напряжения на якоре двигателя.

8-18. БОРЬБА С ПОМЕХАМИ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В современных системах управления электроприводами применяют узлы и элементы с широкой полосой пропускания и малыми мощностями сигналов управления. Сигналы управления стали соизмеримы с сигналами помех, что вызвало увеличение сбоев в работе САР. Действие помех выражается в изменении статических и динамических параметров схемы, появлении колебаний в САР и перегрузке по току отдельных элементов.

Источники помех бывают двух основных типов: с непрерывным спектром сигнала помехи (коммутирующие устройства, электрическая дуга) и с дискретным спектром (трансформаторы, преобразователи), как правило, кратным промышленной частоте 50 Гц — с гармоническими помехами.

Сигналы помех проникают в схемы управления по одному из трех возможных путей: гальваническому, электростатическому или магнитостатическому.

Гальванический путь проникновения помех характеризуется непосредственным подключением входной цепи к источнику помех. Линия связи между ними может состоять из комбинации активных и реактивных элементов. Электростатическими путями проникновения помех, возникающих за счет электрической составляющей электромагнитного поля, являются паразитные емкости между элементами схемы. Магнитостатическими путями проникновения помех являются паразитные взаимоиндуктивности между отдельными элементами схемы. Причиной возникновения этих помех является магнитная составляющая электромагнитного поля.

МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ

1. Потенциальное (гальваническое) разделение цепей управления выполняется датчиками тока, напряжения или ячейками потенциального разделения. Применение его целесообразно между СИФУ и схемой регулирования, между отдельными узлами САР, соединенными линиями большой протяженности, между САР и узлами технологической автоматики (АСУТП). При этом устройства гальванического разделения должны обеспечить сопротивление изоляции не менее 50—100 Мом.

2. Экранирование, скрутка и планировка проводов связи. Правильное выполнение связей между элементами играет решающую роль в подавлении помех, проникающих магнито- и электростатическими путями.

Наиболее эффективным методом снижения электромагнитных помех является попарная скрутка сигнальных проводов. Скрутка с шагом 50 мм снижает уровень помехи до 1 % помех на линии из нескрученных (параллельных) проводов. Этот эффект определяется резким снижением асимметрии паразитных реактивностей связей между проводами и источником помехи.

Правильное выполнение планировки проводов связи значительно снижает уровень помех. При этом необходимо выполнять следующие правила: пересечение проводов вести под

прямым углом с максимально возможным удалением от источника помех; переходные соединения силовых и сигнальных проводов выполнять раздельно; не допускать совмещения в одном кабеле сигналов управления и силовых цепей. Экранирование проводов связи должно быть выполнено с изоляцией экранной оболочки кабелей от земли. Заземление экранов выполняется в одной точке к заземляющей шине шкафа управления. Наиболее эффективным является выполнение экранной оболочки до точки присоединения соединительных проводов к аппарату.

3. Заземление общей точки схемы управления. Часто системы управления выполняют с заземлением общей точки системы. При этом проводники общей точки, соединяющие отдельные шкафы управления, выполняют изолированными. Соединение с землей провода общей точки производится в одном месте. Эффективным является заземление на заземляющий контур, выполненный отдельно от контура силового оборудования.

Для систем, выполненных с изолированной общей точкой, применяется заземление через конденсатор емкостью 10—30 мкФ.

4. Применение фильтров в схемах управления электроприводом для подавления помех является крайним средством борьбы с помехами, так как приводит к снижению динамических параметров САР. Место подключения фильтров выбирается из условия минимального искажения параметров сигналов и необходимого ослабления влияния источников помех. Наиболее часто фильтры применяют на выходе датчиков параметров электроприводов.

Основные меры борьбы с помехами должны быть приняты при проектировании электрооборудования приводов.

В процессе производства наладочных работ необходимо провести ряд мероприятий с целью повышения помехозащищенности систем регулирования:

1) проверка правильности выполнения экранирования схемы управления электроприводом. С этой целью производят проверку изоляции экранов от земли и жил кабелей. Затем соединяют экраны кабелей с заземляющей шиной шкафа управления электроприводом. Присоединение заземляющей шины к контуру заземления электроустановки проверяется по методу проверки металлосвязи. Экранирование проводов от источника сигнала (шунт, якорь электродвигателя) выполняется с заземлением экрана у датчика. Для этих целей можно рекомендовать заземление экрана с двух сторон с экспериментальной проверкой эффективности этого мероприятия;

2) проверка выполнения планировки проводов и кабелей связи производится внешним осмотром. В процессе подготовки пусконаладочных работ необходимо изучить расположение электрооборудования, трассы прокладки силовых и контрольных кабелей и определить основные возможные пути проникновения помех в систему управления. Особое внимание необходимо обратить на присоединение кабеля от датчиков тока к измерительному шунту. Его необходимо выполнить так, чтобы площадь витка, образованного шунтом и измерительными проводами до первой скрутки, была минимальной, так как магнитное поле, а следовательно, и э. д. с. помехи вблизи токоведущих шин максимальны;

3) заземление общей точки системы регулирования, если оно не предусмотрено проектной схемой, необходимо выполнять после экспериментального измерения уровня помех до заземления и затем сравнить его с результатом, полученным после присоединения общей точки системы к земле через резистор, конденсатор или непосредственно.

При наладке контуров регулирования и опробования электропривода в целом необходимо проверить уровень помех в наиболее уязвимых местах схемы управления (выходы датчиков, регуляторов, вход СИФУ, общая точка системы регулирования, общая точка системы управления вентильным преобразователем). Проверка уровня помех производится анализаторами помех, обеспечивающими измерение уровня помех в широком частотном диапазоне (для электроприводов постоянного тока до частоты 1200—2400 Гц).

Для исследования уровня помех в вентильных электроприводах можно применить анализатор уровня помех с дискретными частотами измерения, кратными промышленной частоте 50 Гц [8-14]. Этот анализатор позволяет определить действенность применения различных мероприятий по снижению уровня помех в процессе пусконаладочных работ. Анализатор построен на основе избирательных *RC*-фильтров, дискретно настроенных на частоты, кратные 50 Гц. На входе имеется широкополюсный измерительный усилитель.

Технические данные анализатора помех

Диапазон измеряемого напряжения, В . . .	$1 \cdot 10^{-3}$—300
Частота измерений, Гц .	50, 100, 150, 200, 250, 300, 450, 600, 750, 900, 1200
Входное сопротивление, МОм	~2
Температурная погрешность, %/°С	0,5

В анализаторе имеется узел, позволяющий определять внутреннее сопротивление источника помех подключением на вход нагрузочной цепи.

При отсутствии анализатора определение уровня помех можно производить электронно-лучевым осциллографом. Применение осциллографов с калиброванными делителями вертикального отклонения и частоты развертки (С-1-68 и др.) позволяет определять с достаточной точностью амплитудный и спектральный состав сигналов помех и эффективность мер по их снижению в системах автоматизированного вентильного электропривода.

8-19. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИБОРАМ И СПЕЦУСТРОЙСТВАМ ДЛЯ НАЛАДКИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Пусконаладочные работы по системам регулирования электропривода постоянного тока выполняют с применением комплекта приборов и специализированных устройств, выпускаемых электропромышленностью. К ним относятся электронно-лучевые осциллографы,

измерительные приборы, записывающая аппаратура. Наладка систем регулирования на базе элементов УБСР-АИ делает обязательным применение цифровых вольтметров и частотомеров, что связано как с необходимостью увеличить входное сопротивление приборов, так и с возросшими требованиями к точности измерений. Цифровые частотомеры используют для настройки различных время-импульсных устройств. Эффективная настройка пороговых и импульсных элементов защиты и автоматики систем регулирования невозможна без применения электронно-лучевых осциллографов с двухкоординатными усилительными входными каналами. Существенное упрощение ряда наладочных операций возможно при применении электронно-лучевых осциллографов с длительным запоминанием.

Специализированные приборы и устройства для наладки систем регулирования можно разделить на две основные группы: приборы для наладки ячеек, блоков и других элементов систем регулирования и приборы для комплексной наладки контуров и систем регулирования в целом.

Проверка и настройка отдельных блоков систем регулирования производится на стендах, либо поставляемых заводом — изготовителем оборудования, либо изготовленных пусконаладочными организациями. При массовых испытаниях ячеек и блоков на испытательных стендах необходимо за короткое время проверить тысячи ячеек. В связи с этим стенды должны быть узко специализированы, а их схемы иметь элементы автоматизации для повышения производительности труда наладчиков. На небольших объектах применяют стенды, схема которых с помощью коммутационных устройств изменяется для проверки всей номенклатуры ячеек. Методика проверки блоков системы УБСР-А, УБСР-АИ, АРХ, схемы некоторых стендов и их применение описаны в § 8-4.

Окончательную наладку систем регулирования и настройку контуров ведут обычно после установки оборудования в шкафы управления, поэтому аппаратура для проведения этих работ должна быть портативной и выполнена с учетом условий совмещения пусконаладочных работ с монтажными и строительными в стесненных условиях.

Для экспериментального определения параметров звеньев систем регулирования, настройки контуров САР, опробования электропривода в целом применяют устройства, позволяющие подать на вход исследуемой схемы скачкообразный сигнал с регулируемой амплитудой. Такие устройства должны обеспечить высокую крутизну фронта сигнала, необходимый диапазон регулирования напряжения и удобство наблюдения переходных функций или их фиксацию с помощью записывающих приборов.

Для наблюдения переходных процессов при наладке электроприводов с большим числом настраиваемых элементов без использования записывающей аппаратуры обычно применяют электронно-лучевые осциллографы с послесвечением. Чтобы получить неподвижное изображение кривой переходного процесса на экране осциллографа, разработаны устройства, подающие одновременно сигнал на вход исследуемого узла и вход запуска развертки осциллографа. Прибор с таким принципом действия типа *ГКС* (генератор командных сигналов) серийно выпускается МОЗЭТ Главэлектромонтажа Минмонтажспецстроя СССР. Технические данные прибора приведены в § 1-14.

Для осциллографического исследования переходных функций используется режим генерации прямоугольных импульсов. Выход прибора соединяют со входом исследуемого узла *ИУ* (рис. 8-102), общую точку *ГКС* соединяют с общей точкой исследуемой системы

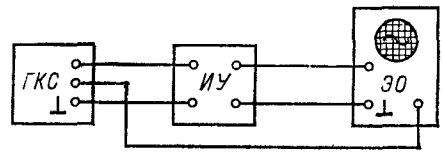


Рис. 8-102. Схема исследования переходных характеристик с использованием *ГКС*.

и осциллографа *ЭО*. С выходного делителя *ГКС* сигнал подают на вход запуска развертки осциллографа. Переключатель режима синхронизации устанавливается в положение ждущей развертки. Сигнал на входе запуска развертки должен быть не менее 0,3 В. Нереверсивный выходной сигнал *ГКС* применяют для настройки контуров тока, снятия постоянных времени и пр. Получение импульсов ступенчатой формы с двумя уровнями напряжения осуществляется суммированием сигналов прямоугольной формы и постоянного напряжения смещения. Для этого нажимают клавиши импульсов прямоугольной формы и напряжения смещения. Переключатель частотных диапазонов устанавливают в положение минимальной частоты. Если необходимо иметь импульсы строго определенной амплитуды, то ее устанавливают по электронно-лучевому осциллографу, включенному на выход *ГКС*. Верхний уровень нереверсивного сигнала равен сумме смещения и амплитуды прямоугольных импульсов, а нижний уровень равен разности этих величин. При настройке контуров САР требуется знать значение сигнала на выходе исследуемого контура (например, чтобы не было превышения допустимого тока или скорости). В этом случае осциллограф подключают на выходе исследуемого звена. Это позволяет регулировать амплитуду прямоугольных импульсов, не контролируя выход *ГКС*. После настройки амплитуды сигнала регулируют частоту развертки, добиваясь желаемого размера исследуемой кривой на экране осциллографа, что достигается регулированием частоты генерации импульсов *ГКС* и длительности развертки осциллографа. Точку начала хода луча на экране устанавливают так, чтобы наблюдать полную кривую переходной функции исследуемого узла или нужный ее участок.

Разработаны и выпускаются малыми сериями приборы, также предназначенные для получения неподвижного изображения переходных функций на экране электронно-лучевого осциллографа, но использующие в качестве генератора запускающих импульсов генератор горизонтальной развертки осциллографа [8-3].

Схема применения прибора типа «Синхроимпульс», работающего на таком принципе, приведена на рис. 8-103. На вход прибора подается пилообразное напряжение развертки осциллографа *ЭО*, его выход подключают к исследуемой цепи *ИУ*. Цепи входа и выхода потенциально развязаны, что позволяет использовать «Синхроимпульс» для настройки систем, не имеющих общей точки для всех элементов схемы. Верхний и нижний уровни выхода скачкообразного сигнала устанавливают при отсутствии генерации импульсов, что

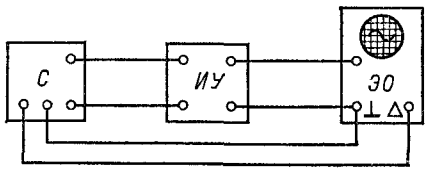


Рис. 8-103. Схема исследования переходных характеристик с использованием прибора типа «Синхроимпульс».

существенно облегчает настройку по сравнению с настройкой *ГКС*. По окончании настройки амплитуды сигнала прибор переключают в режим генерации импульсов с частотой развертки осциллографа. Выбор временно́го масштаба изображения переходной функции производится только переключателями частоты развертки электронно-лучевого осциллографа. Перемещение изображения по горизонтальной оси производится изменением момента генерации импульса по отношению к пилообразному напряжению развертки осциллографа, что позволяет максимально использовать площадь экрана и получить наибольшее возможное изображение кривой переходного процесса.

Технические данные прибора типа «Синхроимпульс»

Пределы плавного регулирования выходного напряжения, В . . .	±20
Максимальная нагрузка, Ом . .	200
Частота развертки (с осциллографом С1-68), Гц	0,01—1000
Крутизна фронта сигнала прямоугольной формы, мкс	⩽0,03
Напряжение питания от сети 50 Гц, В	220

Прибор имеет встроенный цифровой вольтметр, по индикатору которого контролируют уровни напряжения выхода.

Малыми сериями выпускают также приборы для измерения постоянных времени (см. § 8-5) типа *ТИ-3*, основанные на принципе интегрирования площадей переходных функций. Усовершенствованный прибор позволяет определить постоянную времени на желаемом участке выходной характеристики исследуемого звена.

Существенно повышает производительность труда при настройке контуров регулирования использование оптимизаторов, схемы которых содержат набор регулируемых *RC*-цепей, образующих решающие цепи контурных регуляторов. Найденные с помощью оптимизатора параметры переносятся на рабочую ячейку.

Комплексное применение приборов и устройств для наладки систем регулирования позволяет получить оптимальные настройки САР, обеспечивающие технологические требования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

8-1. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка, А. П. Хечумяна. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1976. — 560 с.

8-2. **Фишбейн В. Г.** Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода. — М.: Энергия, 1972. — 135 с.

8-3. **Гарнов В. К., Рабинович В. Б., Вишневецкий Л. М.** Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. — М.: Металлургия, 1977. — 192 с.

8-4. **Ямпольский Д. С., Орлова Т. А., Решмин Б. И.** Определение динамических параметров электропривода постоянного тока. — М.: Энергия, 1972. — 54 с.

8-5. **Шипилло В. П.** Автоматизированный вентильный электропривод. — М.: Энергия, 1969. — 400 с.

8-6. **Архангельский В. И.** Системы реверсивных электроприводов. — Киев: Техника, 1972. — 328 с.

8-7. **Особенности** динамики реверсивного электропривода с несогласованным управлением вентильными группами/В. Я. Самойленко и др. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, Информэлектро, 1971, вып. 6, с. 3—7.

8-8. **Шмидт А. Я., Храмогин В. Т., Гензель Л. Л.** Определение динамических параметров двигателей постоянного тока. — Электротехника, 1973, № 7, с. 48—50.

8-9. **Еланчик В. И.** Экспериментальное определение динамических параметров привода постоянного тока. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, Информэлектро, вып. 7, 1971, с. 21—23.

8-10. **Тиристорные** электроприводы прокатных станов/В. М. Перельмутер, Ю. Н. Брауде, Д. Я. Перчик, В. М. Книгин. — М.: Металлургия, 1978. — 152 с.

8-11. **Справочник** по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1982. — 416 с.

8-12. **Динамика** позиционной системы регулирования с ПИ-регулятором скорости при малых отклонениях/Б. И. Решмин, Д. С. Ямпольский, А. В. Абрамов, В. Б. Рабинович. — Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок, 1978, № 1, с. 3—8.

8-13. **Решмин Б. И., Ямпольский Д. С.** Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. — М.: Энергия, 1975. — 184 с.

8-14. **Осипов О. И., Усынин Ю. С.** Промышленные помехи и способы их подавления в вентильных электроприводах постоянного тока. — М.: Энергия, 1979. — 80 с.

8-15. **Рабинович В. Б., Левин Л. Г., Вишневецкий Л. М.** Наладка унифицированных

блоков систем автоматического регулирования электроприводов/ЛНДТП, 1974. — 32 с.

8-16. **Сборник** указаний по наладочным работам/Вып. 2. — М.: Энергия, 1973 — 240 с.

8-17. **Труды** института Тяжпромэлектропроект. — М.: Энергия, 1975. — Вып. 2, 384 с.

РАЗДЕЛ ДЕВЯТЫЙ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

9-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Системы управления предназначены для регулирования угловой скорости (в дальнейшем вместо термина «угловая скорость» будет применяться термин «скорость»), обеспечения процессов разгона, торможения и реверса асинхронного двигателя (АД) или группы двигателей плавным изменением частоты и амплитуды питающего АД напряжения (в дальнейшем вместо термина «амплитуда напряжения» будет применяться термин «напряжение»).

Принцип частотного управления. АД представляет собой преобразователь электрической энергии, подводимой к обмотке статора, в механическую энергию на валу ротора. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется с помощью магнитного потока в зазоре между статором и ротором. Работа АД основана на принципе электромагнитного взаимодействия обмоток статора и ротора. При протекании в обмотке статора трехфазного переменного тока в воздушном зазоре между сердечниками статора и ротора возникает вращающееся магнитное поле (ВМП), которое, пересекая замкнутые проводники обмотки ротора, создает в них ток. В результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора возникают электромагнитные силы, создающие электромагнитный момент двигателя. Скорость ВМП (синхронная скорость двигателя) однозначно определяется частотой питающего напряжения f_1, подаваемого на статор,

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{p} f_1, \qquad (9\text{-}1)$$

где p — число пар полюсов двигателя.

Скорость ротора $\omega = \omega_1(1-s)$ отличается от скорости ВМП на величину абсолютного скольжения $\omega_1 s$, где $s = (\omega_1 - \omega)/\omega_1$ — относительное скольжение.

При постоянной синхронной скорости относительное скольжение s определяет скорость ротора. При частотном управлении изменяется как синхронная скорость, так и скольжение, поэтому принято пользоваться относительными значениями параметров: $\alpha = f_1/f_{1н}$ — относительная частота напряжения (тока) статора ($f_{1н} = 50$ Гц); $\beta = \alpha s = f_2/f_{1н}$ — относительная частота тока ротора, характеризующая абсолютное скольжение.

При использовании принятых параметров скорость ротора

$$\omega = \omega_{1н}(\alpha - \beta), \qquad (9\text{-}2)$$

где $\omega_{1н}$ — синхронная скорость при $f_{1н} = 50$ Гц.

При частотном управлении для анализа и расчетов используется Т-образная эквивалентная схема замещения для одной фазы АД (рис. 9-1, *а*). В схеме приняты следующие обозначения: $\dot{U}_н\gamma$ — напряжение статора; $\gamma = U/U_н$ — относительное значение напряжения статора; $\dot{U}_н$ — номинальное напряжение статора при $f_{1н} = 50$ Гц; $\dot{I}_1$ — ток статора; $\dot{I}_\mu$ — ток намагничивания; $\dot{E}_\mu$ — э. д. с. двигателя (напряжение цепи намагничивания); $\dot{I}'_2$ — ток ротора, приведенный к статору; r_1 — активное

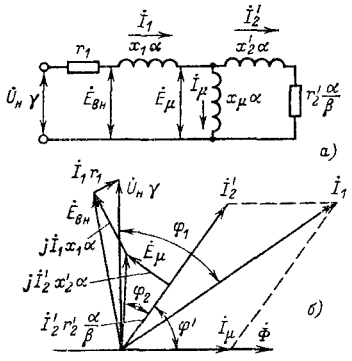


Рис. 9-1. Асинхронный двигатель при частотном управлении.

а — эквивалентная схема замещения; *б* — векторная диаграмма.

сопротивление обмотки статора; x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора при номинальной частоте, обусловленное потоком рассеяния; x_μ — индуктивное сопротивление цепи намагничивания при номинальной частоте; x'_2 — приведенное к статору индуктивное сопротивление обмотки ротора при номинальной частоте, обусловленное потоком рассеяния; r'_2 — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору.

Основные соотношения для схемы рис. 9-1, *а*:

$$\dot{U}_н\gamma = \dot{E}_\mu + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1\alpha; \qquad (9\text{-}3)$$

$$\dot{E}_\mu = j\dot{I}_2 x'_2\alpha + \dot{I}'_2 r'_2\frac{\alpha}{\beta}; \qquad (9\text{-}4)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\mu + \dot{I}'_2; \qquad (9\text{-}5)$$

$$\dot{E}_\mu = j\dot{I}_\mu x_\mu \alpha; \qquad (9\text{-}6)$$

$$E_\mu = c_1 \Phi f_{1н} \alpha, \qquad (9\text{-}7)$$

где c_1 — конструктивная постоянная двигателя.

Указанным соотношениям соответствует векторная диаграмма, приведенная на рис. 9-1, *б*.

Регулирование скорости двигателя осуществляется изменением момента на его валу. Момент любого электродвигателя и, в частности, асинхронного определяется взаимодействием тока и магнитного потока и представляет собой их векторное произведение, которое в скалярной форме имеет вид

$$M = I\Phi \sin\varphi, \qquad (9\text{-}8)$$

где φ — угол между векторами тока и потока.

В отличие от двигателя постоянного тока, в котором $\varphi = 90°$, а управление потоком возбуждения и током якоря осуществляется независимо друг от друга, в АД пара сил I, Φ и φ взаимосвязаны. Ток ротора зависит от потока и скольжения, поток — от тока ротора, частоты и напряжения, угол φ (на рис. 9-1, *б* этот угол обозначен φ') — от скольжения. Сложная взаимная зависимость составляющих момента АД приводит к нелинейности естественной механической характеристики АД (рис. 9-2).

Физически эта нелинейность объясняется следующим. При работе АД на холостом ходу скольжение близко к нулю, ток ротора также очень мал, а поток имеет максимальное значение. При возрастании нагрузки на валу АД увеличивается скольжение, что в свою очередь вызывает рост тока ротора и уменьшение значения $\sin\varphi'$. При увеличении тока ротора возрастает ток статора; при постоянном напряжении статора это приводит к уменьшению э. д. с. двигателя, т. е. к уменьшению потока. Таким образом, при увеличении нагрузки две из трех составляющих момента уменьшаются (поток Φ и $\sin\varphi'$), а одна увеличивается (ток ротора). Также увеличивается и скольжение, т. е. скорость ротора уменьшается. В зоне малых нагрузок влияние уменьшающихся составляющих момента незначительно. При значительных нагрузках это влияние проявляется в большей степени, но в целом момент двигателя растет за счет возрастающего тока ротора. При увеличении момента нагрузки выше некоторого максимального значения $M_к$ возрастающая составляющая момента двигателя не компенсирует уменьшающихся составляющих, в результате чего момент двигателя уменьшается, а скорость двигателя резко падает — двигатель «опрокидывается». Моменту $M_к$ соответствует так называемое критическое скольжение $s_к$ или $\beta_к$ (рис. 9-2). Таким образом, при постоянных значениях амплитуды и частоты питающего напряжения момент АД зависит от абсолютного скольжения. Для управления скоростью АД необходимо регулировать его момент; при этом наиболее целесообразно стабилизировать две из трех составляющих момента и регулировать третью. Такая структура в наилучшей степени реализуется в системах с так называемым векторным управлением (управление с «ориентацией по полю», см. § 10-5). В настоящее время получили распространение системы управления, разомкнутые по скорости. В большинстве промышленных электроприводов точность регулирования, обеспечиваемая такими системами управления, удовлетворяет требованиям технологического процесса. Это объясняется достаточной жесткостью механических характеристик АД.

В разомкнутых системах скорость АД отличается от синхронной на значение абсолютного скольжения и при работе с малыми

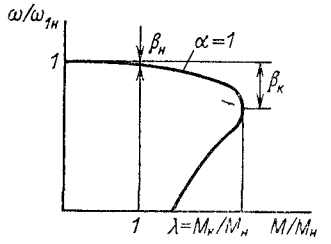


Рис. 9-2. Естественная механическая характеристика АД.

скольжениями определяется частотой питающего напряжения. Существует другое выражение для момента двигателя

$$M_\alpha = \frac{m_1 c_1^2 f_{1н}^2}{\omega_{1н}} \Phi_\alpha^2 \frac{r_2' \beta}{r_2'^2 + x_2'^2 \beta^2}, \qquad (9\text{-}9)$$

где m_1 — число фаз обмотки статора ($m_1 = 3$).

Из (9-9) видно, что момент двигателя пропорционален квадрату потока. Если обеспечить стабилизацию потока на максимальном уровне, при любой синхронной скорости момент будет зависеть только от скольжения β. Механические характеристики при этом будут иметь максимальную жесткость. На рис. 9-3 приведены некоторые характеристики при управлении с $\Phi_\alpha = \text{const}$, из которых видно, что при различных частотах двигатель имеет одинаковый максимальный момент

$$M_{к,\alpha} = \frac{m_1 c_1^2 f_{1н}}{2\omega_{1н} x_2'} \Phi_\alpha^2 \qquad (9\text{-}10)$$

и критическое скольжение

$$\beta_к = \frac{r_2'}{x_2'}. \qquad (9\text{-}11)$$

Максимальный момент двигателя при управлении с $\Phi_\alpha = \text{const}$ превышает максимальный момент при работе на естественной характеристике.

При управлении с $\Phi_\alpha = \text{const}$ обеспечивается постоянство перегрузочной способности двигателя

$$\lambda = \frac{M_{к,\alpha}}{M_н}, \qquad (9\text{-}12)$$

где λ — перегрузочная способность двигателя

по моменту; $M_н$ — номинальный момент двигателя при $\alpha=1$. Перегрузочная способность обеспечивает запас по моменту двигателя, необходимый в динамических режимах работы привода. При недостаточной перегрузочной способности двигатель может «опрокидываться». В связи с этим в разомкнутых системах требуется поддержание постоянства перегрузочной способности на заданном уровне.

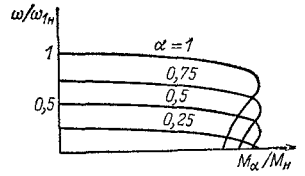


Рис. 9-3. Механические характеристики АД при частотном управлении с $\Phi_\alpha=\text{const}$.

Практическая реализация системы, обеспечивающей $\Phi_\alpha=\text{const}$, весьма затруднительна из-за отсутствия надежных и точных датчиков потока. Практически применяются системы управления, косвенно поддерживающие постоянство потока. Выражение, определяющее условие $\Phi_\alpha=\text{const}$, может быть получено из (9-3) и (9-7)

$$\Phi_\alpha=\frac{\dot U_н\gamma-\dot I_1 r_1-j\dot I_1 x_1\alpha}{c_1 f_{1н}\alpha}=\text{const}. \quad (9\text{-}13)$$

Из (9-13) видно, что поток зависит от напряжения γ, частоты α и тока статора I_1. В свою очередь ток статора зависит (9-4), (9-5) от частоты α и скольжения β, а поток является сложной функцией трех параметров: γ, α и β.

При частотном управлении поток должен поддерживаться на максимально возможном уровне, при котором потери от намагничивающего тока минимальны по условию нагрева двигателя. Превышение потоком этого значения приводит к значительному росту намагничивающего тока.

Для поддержания постоянства потока на заданном уровне необходимо регулировать напряжение в функции частоты и скольжения. В разомкнутых системах управления информация о скольжении отсутствует, поэтому напряжение регулируется в основном только в функции частоты, а в некоторых случаях также и в функции тока статора. Соотношения между напряжением и частотой на статоре АД определяют законы частотного управления.

9-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Наиболее распространенным законом управления является такой, при котором $U/f=\text{const}$, т. е. напряжение регулируется только в функции частоты без компенсации падения напряжения на сопротивлении статора. Если пренебречь влиянием тока статора I_1 на поток, т. е. принять, что $r_1+x_1=0$, то получим основное условие поддержания постоянства номинального потока в асинхронном двигателе

$$\frac{U_н\gamma}{c_1 f_{1н}\alpha}=\frac{U_н}{c_1 f_{1н}}, \quad (9\text{-}14)$$

откуда

$$\gamma=\alpha. \quad (9\text{-}15)$$

Выражение (9-15) соответствует основному закону частотного управления ($U/f=\text{const}$). На рис. 9-4, *а* приведена характеристика зависимости (9-15). При управлении по

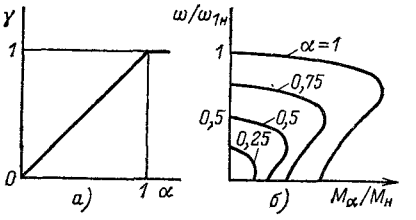


Рис. 9-4. Закон частотного управления $U/f=\text{const}$.

а — зависимость $\gamma=f(\alpha)$; *б* — механические характеристики АД.

(9-15) и изменении нагрузки на валу двигателя поток двигателя будет изменяться. Действительно, возрастут токи ротора и статора, увеличится падение напряжения на сопротивлениях статора (9-13), следовательно, поток уменьшится. При управлении по (9-15) влияние активного сопротивления статора на поток при изменении нагрузки сказывается на разных частотах по-разному. Это объясняется тем, что падение напряжения на активном сопротивлении не зависит от частоты. Поэтому на разных частотах полное падение напряжения при одной и той же нагрузке различно. Регулирование напряжения по (9-15) не обеспечивает постоянства потока ни при изменении нагрузки, ни при изменении частоты, следствием чего является уменьшение максимального момента и жесткости механической характеристики при уменьшении частоты (рис. 9-4, *б*). Это приводит к тому, что при пониженных частотах увеличиваются потери, снижается перегрузочная способность, а при частотах, близких к нулю, работа двигателя оказывается невозможной. Область применения такого закона управления — механизмы с вентиляторной характеристикой.

Улучшение механических характеристик обеспечивается при реализации закона управления с так называемой компенсацией падения напряжения. Полная компенсация равносильна обеспечению условия $\Phi_\alpha=\text{const}$. На практике в промышленных электроприводах применяют системы с неполной компенсацией, имеющие две основные разновидности

К первой относится система с так называемой *Ir*-компенсацией, в которой поддерживается постоянство отношения внутренней э. д. с.

двигателя к частоте,

$$\frac{\dot{E}_{вн}}{\alpha} = \frac{\dot{U}_н \gamma - \dot{I}_1 r_1}{c_1 I_{1н} \alpha} = \text{const}. \quad (9\text{-}16)$$

Поток уменьшается только за счет падения напряжения на индуктивном сопротивлении статора. Максимальный момент и перегрузочная способность при изменении частоты остаются постоянными; эти параметры превышают аналогичные значения при законе регулирования $U/f = \text{const}$. Кроме того, максимальный момент в этом случае больше, чем в АД при естественной механической характеристике

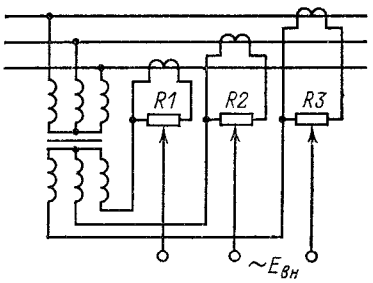


Рис. 9-5. Схема измерения внутренней э. д. с. $E_{вн}$.

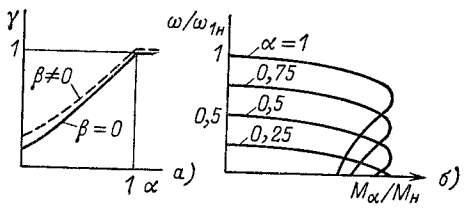


Рис. 9-6. Закон частного управления $E_{вн}/f = \text{const}$.

а — зависимость $\gamma = f(\alpha)$; *б* — механические характеристики АД.

Управление по закону (9-16) осуществляется системой регулирования внутренней э. д. с. $E_{вн}$, непосредственное измерение которой затруднительно. Косвенным способом $E_{вн}$ может быть получена как геометрическая разность напряжения на зажимах двигателя и падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. Для этой цели применяется схема рис. 9-5. Напряжение, пропорциональное току и совпадающее с ним по фазе, снимается с сопротивлений, включенных во вторичные обмотки трансформаторов тока. Выбором соответствующих коэффициентов трансформации тока и напряжения, а также сопротивления резисторов *R1 — R3* может быть получена разность вторичных напряжений трансформаторов тока и напряжения, пропорциональная внутренней э. д. с.

При управлении по закону (9-16) напряжение на двигателе регулируется автоматически в функции α и β (рис. 9-6, *а*). Механические характеристики при таком управлении показаны на рис. 9-6, *б*.

Ко второй разновидности закона с неполной компенсацией относится система управления с параметрической компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора в функции частоты. Зависимость напряжения от частоты, реализующая этот закон, показана на рис. 9-7, *а*, а на рис. 9-7, *б* приведены механические характеристики двигателя.

В отличие от закона $U/f = \text{const}$ на низких частотах производится подъем напряжения с целью компенсации падения напряжения на активном сопротивлении. В связи с этим максимальный момент двигателя выше. Однако момент двигателя не остается постоянным, так как компенсация осуществляется только для одного определенного значения тока статора (как правило, для тока холостого хода). Так, если обеспечить постоянство потока при изменении частоты в режиме холостого хода двигателя, то максимальный момент будет уменьшаться с уменьшением частоты. Это объясняется различной зависимостью потока от тока статора при разных частотах. При одном и том же значении тока статора поток уменьшается с уменьшением частоты. На рис. 9-7, *а* пунктиром показана характеристика, обеспечивающая увеличение максимального момента, однако при этом на холостом ходу магнитная система двигателя будет насыщаться. Данный закон частотного управления может быть применен для механизмов с постоянным моментом нагрузки $M_c = \text{const}$ и небольшим диапазоном регулирования скорости или с большим диапазоном, но при уменьшенном моменте нагрузки.

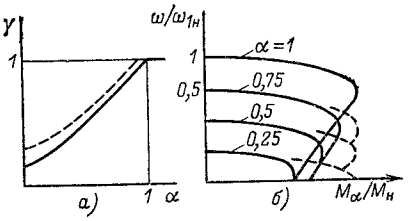


Рис. 9-7. Закон частотного управления с параметрической компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора в функции частоты.

а — зависимость $\gamma \approx f(\alpha)$; *б* — механические характеристики АД.

9-3. НАЛАДКА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, РАЗОМКНУТЫХ ПО СКОРОСТИ

Обобщенная структурная схема разомкнутой системы управления, реализующая любой из рассмотренных выше законов, приведена на рис. 9-8. В качестве ТПЧ принципиально может быть использован любой из рассмотренных в § 11-10 и 11-11 типов преобразователей. На рис. 9-8 в качестве примера показан преобразователь частоты *UF* на основе автономного инвертора напряжения *UVF*.

Задатчик интенсивности *UV1* предназначен для обеспечения заданного темпа разгона

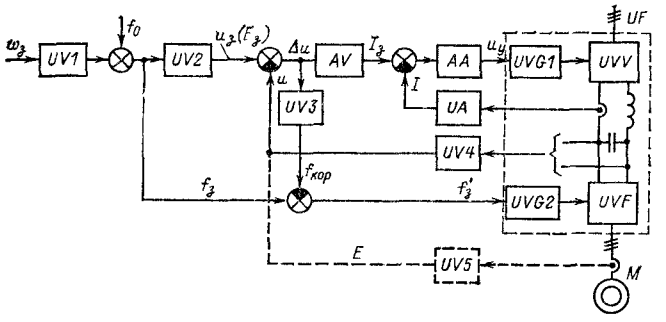


Рис. 9-8. Структурная схема разомкнутой системы частотного управления.

UV1 — задатчик интенсивности; *UV2* — функциональный преобразователь; *UV3* — корректирующее устройство; *AV* — регулятор напряжения (э. д. с.); *AA* — регулятор тока; *UA* — датчик тока; *UV4* — датчик напряжения; *UVG1* — система импульсно-фазового управления; *UVV* — управляемый выпрямитель; *UVG2* — система управления инвертором; *UVF* — автономный инвертор напряжения; *UV5* — датчик э. д. с.; *M* — асинхронный двигатель.

(торможения) привода. Задание начальной частоты f_0 обеспечивает начальное скольжение для получения требуемого динамического момента электропривода. Функциональный преобразователь *UV2* реализует требуемый закон частотного управления, т. е. формирует сигнал задания напряжения или э. д. с. двигателя в функции сигнала задания частоты. Для компенсации автоколебаний, связанных с резонансными явлениями в силовой схеме, служит корректирующее устройство *UV3*, вырабатывающее сигнал коррекции частоты $f_{кор}$ в функции ошибки по напряжению Δu. Для поддержания заданного значения напряжения (э. д. с.) двигателя применена двухконтурная система автоматического регулирования (САР); основному контуру регулирования напряжения (э. д. с.) подчинен внутренний контур регулирования тока управляемого выпрямителя *UVV*. Управление выпрямителем осуществляется сигналом $u_у$, автономным инвертором — сигналом $f_з'$.

В комплекс работ по наладке системы управления электроприводом входят:

а) анализ технологических требований к электроприводу и оценка возможностей применяемой системы управления;

б) проверка на функционирование отдельных узлов и всей системы управления в целом;

в) предварительная наладка с целью пробного включения электропривода на холостом ходу;

г) окончательная наладка электропривода под нагрузкой в технологических режимах.

Анализ технологических требований. Целью анализа является проверка возможности обеспечения системой управления заданных технологических режимов работы электропривода (темп разгона или торможения $d\omega/dt$, диапазон регулирования D). Обеспечение указанных режимов зависит как от механических характеристик электропривода, определяемых законом частотного управления, так и от вида нагрузки.

Диапазон регулирования. При нагрузке вида $M_с=\text{const}$ наилучшие показатели обеспечиваются при законе частотного управления $E_{вн}/\alpha=\text{const}$; при этом D не зависит от $M_с$. При законе частотного управления с параметрической компенсацией также обеспечивается широкий диапазон регулирования, однако с увеличением $M_с$ значение D уменьшается. При законе частотного управления $U/f=\text{const}$ электропривод может работать в очень ограниченном диапазоне ($D\leqslant 2$); при частоте напряжения на двигателе $f_1<20$ Гц и статическом моменте, близком к номинальному, электропривод практически неработоспособен.

При нагрузке вида $M_с=k\omega^2$ приблизительно равные показатели обеспечиваются при всех трех законах частотного управления.

Темп разгона (торможения) электропривода. При нагрузке вида $M_с=\text{const}$ и законе частотного управления $E_{вн}/\alpha=\text{const}$ обеспечивается максимальный темп $d\omega/dt$ в мягком режиме разгона (см. ниже); ограничением является только перегрузочная способность двигателя по моменту. При законе частотного управления с параметрической компенсацией разгон в мягком режиме возможен только при $M_с<M_н$; при этом предельный темп разгона зависит от $M_с$ и существенно меньше, чем в первом случае. При законе частотного управления $U/f=\text{const}$ разгон осуществляется только в жестком режиме (см. ниже) при очень незначительном темпе; при токоограничении разгон возможен только при малых значениях $M_с$.

При нагрузке вида $M_с=k\omega^2$ наибольшее значение $d\omega/dt$ обеспечивается при законе частотного управления $E_{вн}/\alpha=\text{const}$. При законе $U/f=\text{const}$ и большом значении момента инерции J разгон возможен только в жестком режиме с небольшим темпом; при токоограничении разгон невозможен. При законе частотного управления с параметрической компенсацией разгон также зависит от момента инерции, однако значение $d\omega/dt$ несколько выше, чем в предыдущем варианте.

С учетом вышеизложенного может возникнуть необходимость перестройки закона частотного управления. Например, при нагрузке $M_с=\text{const}$ закон частотного управления $U/f=\text{const}$ может не обеспечить заданных значений D и $d\omega/dt$, особенно при большом значении $M_с$. В этом случае при возможности схемной реализации закон частотного управления должен быть изменен. В противном случае необходимо выяснить наиболее тяжелые режимы работы привода и проанализировать возможность изменения технологических требований. Например, при невозможности реализации требуемого закона управления необходимо выяснить возможность уменьшения заданного темпа разгона привода и диапазона регулирования.

Проверка на функционирование. Перед проверкой системы управления на функционирование:

1) производится внешний осмотр шкафа

управления и отдельных его блоков с целью выявления механических повреждений, наличия некачественных элементов, проверки качества паек в блоках и в печатных платах; одновременно желательно проверить затяжку выводных соединений (зажимов);

2) производится (с помощью мегаомметра) измерение сопротивления изоляции цепей вторичной коммутации и шкафа управления относительно корпуса при вынутых из блоков управления ячейках; особое внимание уделяется проверке сопротивления изоляции потенциальных разделителей между входными и выходными цепями в датчиках тока, напряжения и т. д.;

3) проверяется правильность подключения внешних цепей в соответствии с принципиальной схемой.

При проверке на функционирование:

1) измеряются напряжения источников питания, которые не должны отличаться от указанных в заводской инструкции более чем на 5 %. Проверяется также пульсация напряжения, которая не должна превышать значений, приведенных в инструкции завода-изготовителя;

2) проверяется прохождение сигнала по отдельным каналам схемы; сигнал подается от вспомогательного источника регулируемого напряжения. Для этого регуляторы переводятся в пропорциональный режим путем закорачивания конденсаторов в цепях обратной связи усилителей. Одновременно проверяется отсутствие самовозбуждения операционных усилителей, а также производится установка «нулей» регуляторов. Проверяется работоспособность узлов ограничения выходных сигналов регуляторов;

3) проверяется работоспособность датчиков системы регулирования и снимаются их характеристики. Для проверки используется вспомогательный источник регулируемого напряжения, сигнал с выхода которого подается на систему управления *UVG1* преобразователем частоты (рис. 9-8). Проверка датчика тока *UA* в силовой схеме преобразователя производится в режиме короткого замыкания выпрямителя *UVV*; закоротка устанавливается на выходе фильтра. Изменением сигнала u_y регулируется ток, контроль которого производится с помощью прибора класса 0,5, подключенного к шунту в силовой схеме. Снимается характеристика *UA*, которая должна быть линейной. Снятая характеристика может быть использована для настройки уставки токоограничения. Аналогично проверяются датчики напряжения *UV4*, *UV5*; для этого преобразователь должен работать либо на эквивалентную активную нагрузку, либо на двигатель при $M_c \approx 0$. Характеристики датчиков напряжения должны быть обязательно линейными, в противном случае может нарушаться требуемый закон частотного управления. Нелинейность датчика может быть обусловлена неправильным выбором сопротивления делителя напряжения; линейность достигается уменьшением суммарного сопротивления делителя. Одновременно с проверкой датчиков производится проверка правильности их подключения к регуляторам: полярность сигнала на выходе датчика должна обеспечивать отрицательную обратную связь. При снятии характеристик датчиков одновременно проверяются контрольно-измерительные приборы, установленные в шкафу управления;

4) снимается зависимость выходной частоты преобразователя в функции входного напряжения f_3 системы управления *UVG2*. Для этого используется вспомогательный источник регулируемого напряжения. Контроль выходной частоты производится с помощью частотомера, например ЧЗ-33, на который подаются импульсы задающего генератора системы управления преобразователем частоты. Следует отметить, что частота импульсов задающего

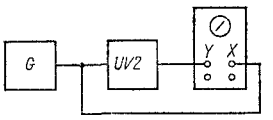


Рис. 9-9. Схемы настройки функционального преобразователя.

генератора в 6 раз выше частоты выходного напряжения на двигателе. Характеристика должна быть строго линейной. Нелинейность может вызвать нарушения в работе двигателя (либо недостаточный момент, либо насыщение магнитной системы). Одновременно градуируется прибор, контролирующий выходную частоту.

Предварительная наладка заключается в проведении ряда операций, обеспечивающих опробование электропривода на холостом ходу с целью проверки его работоспособности, при этом:

1) устанавливается сигналом f_0 начальная частота напряжения, равная номинальной частоте скольжения АД

$$f_{\text{ск,н}} = \frac{p}{60}(n_c - n_н), \qquad (9\text{-}17)$$

где p — число пар полюсов двигателя; n_c — синхронная частота вращения при $f_1 = 50$ Гц; $n_н$ — номинальная частота вращения двигателя;

2) устанавливается минимальный темп разгона и торможения электропривода;

3) настраивается функциональный преобразователь *UV2* (рис. 9-8), характеристика которого должна быть линейной и обеспечивать закон частотного управления $\gamma = \alpha$, т. е. $U/f = U_н/f_н = \text{const}$.

Схема варианта настройки приведена на рис. 9-9. В схеме используют генератор командных сигналов *G* и осциллограф, имеющий вход горизонтальной развертки. При подаче переменного сигнала частотой 30—50 Гц на экране осциллографа будет изображение характеристики. Настройкой *UV2* обеспечиваются линейность и необходимый наклон характеристики; наклон должен быть таким, чтобы сигналу задания номинальной частоты соответствовал сигнал задания номинального напряжения на двигателе. Окончательная настройка выполняется при работе электропривода на реальную нагрузку;

4) производится настройка контуров регулирования САР электропривода (рис. 9-8). Настройка начинается с внутреннего контура.

а) настройка контура тока заключается в обеспечении его максимального быстродействия

при минимальных колебательности и перерегулировании; такому требованию соответствует колебательный переходный процесс с коэффициентом демпфирования 0,7 (перерегулирование 5 %). В объект регулирования контура тока входят: *LC*-фильтр на входе *UVF* и эквивалентная цепь АД (рис. 9-1, *а*), параметры которой зависят от режима работы двигателя (в частности, от заданных значений частоты и скольжения). В целом эта цепь представляет собой активно-индуктивную нагрузку с переменными сопротивлениями, что характеризует

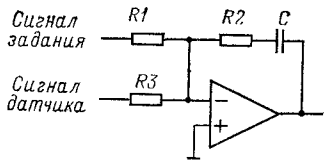


Рис. 9-10. Схема пропорционально-интегрального регулятора.

АД как нелинейное звено (см. § 10-5). В связи с этим настройка контура тока должна производиться при различных значениях частоты напряжения на двигателе и малых приращениях сигнала задания. Настройка производится при заранее заданных от вспомогательных источников начальных значениях частоты и тока двигателя; при этом двигатель будет вращаться. Первоначально настройка контура начинается приблизительно в середине рабочего диапазона изменения частоты ($f=20\div30$ Гц). При ступенчатом изменении сигнала на входе контура тока от другого вспомогательного источника на экране осциллографа, подключенного на выходе датчика тока, визуально наблюдается переходный процесс по току; ступенчатые сигналы на входе контура должны быть такими, чтобы магнитная система АД не насыщалась.

Для удобства настройки переходных процессов в контуре тока резисторы и конденсатор регулятора должны быть заменены блок-оптимизатором или магазинами сопротивлений и емкостей. Настройку целесообразно начинать при минимальном значении коэффициента усиления $k_{р,т}$ ($k_{р,т}=R_2/R_3$) и максимальном значении постоянной времени $T_{р,т}$ ($T_{р,т}=R_2C$) регулятора тока (рис. 9-10). Путем последовательного увеличения $k_{р,т}$ и уменьшения $T_{р,т}$ необходимо добиться максимального быстродействия при условии минимальных колебательности и перерегулирования. В дальнейшем настройка контура проверяется во всем диапазоне изменения выходной частоты и при необходимости производится подстройка параметров регулятора. Так как настройка контура в основном может производиться при токах холостого хода АД, то при его работе с реальной нагрузкой может возникнуть необходимость подстройки параметров регулятора тока;

б) настройка контура напряжения заключается в достижении требуемой точности при отсутствии автоколебаний. Автоколебания в контуре напряжения могут возникать вследствие как недостаточного запаса устойчивости, так и резонансных явлений в силовой схеме. Настройка контура напряжения производится в режимах разгона и подразгона электропривода; задание частоты и напряжения (э. д. с.) АД осуществляется от *UV1* по полной схеме (рис. 9-8); при этом с помощью осциллографа, подключенного на выход *UA*, контролируется выпрямленный ток. Из-за нелинейности объекта регулирования контура напряжения настройка производится в нескольких точках рабочего диапазона скоростей при различных значениях начальной скорости и ее приращения. Начальное значение скорости задается сигналом от постороннего источника на дополнительный вход *UV1*.

Темп изменения частоты $\varepsilon=d\alpha/dt$ выбирается в соответствии с требуемым темпом разгона (торможения) электропривода; при этом

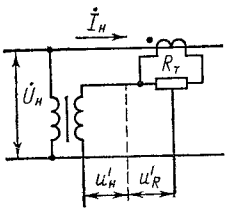


Рис. 9-11. Схема, поясняющая расчет при настройке датчика внутренней э. д. с. АД.

необходимо следить, чтобы регулятор напряжения, выход которого пропорционален заданному току, не входил в режим ограничения (такой режим наиболее возможен при разгоне привода с большим статическим моментом). В противном случае темп разгона должен быть уменьшен (см. ниже). При настройке контура варьируются следующие параметры: коэффициент усиления $k_{р,н}$ и постоянная времени $T_{р,н}$ регулятора напряжения (рис. 9-10), а также коэффициент передачи $k_{кор}$ корректирующего устройства *KV3*. Сигнал $f_{кор}$ должен увеличивать частоту при превышении истинным значением напряжения заданного и уменьшать частоту при превышении заданным значением напряжения истинного. Для удобства настройки переходных процессов в контуре напряжения резисторы и конденсаторы регулятора должны быть заменены блок-оптимизатором или магазинами сопротивлений и емкостей. Настройку целесообразно начинать с пропорциональным регулятором напряжения при заниженном по сравнению с проектным коэффициенте усиления $k_{р,н}$. Увеличивая $k_{р,н}$, необходимо добиться максимального быстродействия нарастания тока при минимальном перерегулировании (4—5 %), а варьируя значением $k_{кор}$, обеспечить минимальную колебательность как при нарастании, так и при спадании тока. При настройке следует иметь в виду, что при одном и том же значении $k_{кор}$ колебательность при нарастании и спадании тока будет различной.

При необходимости повышения статической точности регулирования напряжения реализуется пропорционально-интегральный регулятор. При выборе емкости конденсатора одновременно необходимо изменять значения $k_{кор}$ с целью уменьшения колебательности контура.

При реализации контура регулирования э. д. с. двигателя необходимо предварительно настроить узел измерения э. д. с. (рис. 9-5), от правильной настройки которого зависят механические характеристики двигателя при частотном управлении. Рекомендуется следующая методика настройки (рис. 9-11):

экспериментально определяется коэффициент трансформации трансформатора напряжения k_U для каждой фазы отдельно;

измеряется активное сопротивление r_1 фазы статора двигателя;

включается преобразователь и измеряется ток статора I_1 при частоте выходного напряжения 50 Гц;

вычисляется падение напряжения на активном сопротивлении фазы статора $I_1 r_1$;

полученное значение падения напряжения на активном сопротивлении приводится ко вторичной обмотке измерительного трансформатора напряжения

$$U'_R = \frac{I_1 r_1}{k_U};$$

при токе I_1 с помощью потенциометра $R_г$ устанавливается требуемое значение напряжения компенсации U'_R.

Аналогичные операции производятся для остальных фаз нагрузки.

Окончательная наладка электропривода под нагрузкой заключается в настройке требуемого темпа разгона и торможения, а также в проверке его работоспособности в технологических режимах в заданном диапазоне изменения скорости.

Темп разгона (торможения) электропривода обеспечивается динамическим моментом двигателя

$$M_{дин} = M_\alpha - M_с = \pm J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9\text{-}18)$$

где M_α — момент двигателя; $M_с$ — статический момент нагрузки; J — момент инерции привода.

При требуемом темпе разгона $d\omega/dt$ и известных значениях $M_с$ и J определяется необходимый момент двигателя. Момент двигателя M_α обеспечивается двумя параметрами (9-9): потоком Φ_α и скольжением β. Воздействие на поток осуществляется каналом управления по напряжению; требуемые характеристики зависят от настройки САР и функционального преобразователя. Воздействие на скольжение осуществляется каналом управления по частоте; требуемые характеристики зависят от сигнала начального скольжения f_0 и темпа изменения сигнала на выходе *UV1*.

Если принять, что поток двигателя стабилизирован, т. е. во всех режимах работы двигателя $\Phi_\alpha = \text{const}$, то момент двигателя по (9-9) определяется только скольжением β. При подстановке (9-2) в (9-18) получается

$$M_\alpha - M_с = J\omega_{1н} \frac{d\alpha}{dt} - J\omega_{1н} \frac{d\beta}{dt}. \quad (9\text{-}19)$$

При разгоне привода

$$\varepsilon = \frac{M_\alpha - M_с}{J\omega_{1н}} + \frac{d\beta}{dt}. \quad (9\text{-}20)$$

Таким образом, при $\Phi_\alpha = \text{const}$ требуемый момент M_α и, следовательно, темп разгона привода зависят от β. При увеличении β до значения $\beta_к$ момент двигателя возрастает, что позволяет увеличивать темп разгона привода. При разгоне с постоянным темпом (по линейному закону) необходимо поддерживать скольжение β на постоянном уровне. Это достигается определенным значением ε. В зависимости от ε различают два режима разгона: мягкий и жесткий. Если при разгоне скольжение не превышает критического, т. е. $\beta < \beta_к$, то такой режим называется мягким. Он характеризуется малым током и, следовательно, малыми потерями. Если при разгоне скольжение больше критического, т. е. $\beta > \beta_к$, то такой режим называется жестким и сопровождается большим током и большими потерями. Жесткий режим нежелателен, так как значительный ток не сокращает времени разгона (момент двигателя в жестком режиме может быть меньше, чем в мягком). Жесткий режим разгона возникает, когда темп нарастания частоты больше темпа разгона привода, при этом все возрастающее скольжение становится больше критического. Меньшему значению ε соответствует мягкий режим разгона. Граничным режимом является такой, при котором скольжение постоянно и равно критическому ($\beta = \beta_к$). Значение $\varepsilon_{гр}$, соответствующее этому режиму, определяет граничный темп нарастания частоты.

В граничном режиме момент двигателя постоянен и равен максимальному $M_к$, в связи с чем время разгона минимально. Из (9-20)

$$\varepsilon_{гр} = \frac{M_к - M_с}{J\omega_{1н}}. \quad (9\text{-}21)$$

Как видно из (9-21), граничный темп нарастания частоты зависит от момента инерции привода J и статического момента нагрузки $M_с$. Мягкому режиму разгона соответствует $\varepsilon < \varepsilon_{гр}$, жесткому — $\varepsilon > \varepsilon_{гр}$.

Если обеспечить $\varepsilon_{гр}$ из расчета разгона на холостом ходу привода, то разгон привода при наличии статического момента будет проходить в жестком режиме.

Влияние начальной частоты f_0 на скольжение в процессе разгона зависит от соотношения параметров ε и $\varepsilon_{гр}$. При $\varepsilon < \varepsilon_{гр}$, когда ускорения электропривода и ВПМ равны, скольжение в процессе разгона остается постоянным и равным начальному значению.

Поскольку в начале разгона $\beta = \alpha_0$ (двигатель неподвижен), то f_0 является величиной, определяющей режим разгона. Несмотря на то что темп нарастания частоты меньше граничного $\varepsilon < \varepsilon_{гр}$, режим разгона будет жестким, если $\alpha_0 > \beta_к$. Таким образом, для обеспечения мягкого режима разгона необходимо, чтобы $\varepsilon \leqslant \varepsilon_{гр}$ и $\alpha_0 \leqslant \beta_н$. Знаки равенства в последних выражениях соответствуют граничному режиму разгона.

В действительности большинство систем управления не обеспечивает постоянства потока, вследствие чего работа электропривода характеризуется следующими особенностями:

а) режим разгона может быть жестким даже при $\varepsilon < \varepsilon_{гр}$;

б) при больших значениях заданного темпа и момента статической нагрузки возможен жесткий режим разгона с токоограничением; при этом возможны два варианта:

в результате малого значения момента разгон происходит длительное время с большим током, вследствие чего происходит значительный нагрев АД;

в результате малого значения момента двигателя в процессе разгона происходит «опрокидывание» АД.

Некоторое улучшение режима разгона может быть обеспечено перестройкой характеристики функционального преобразователя *UV2* (рис. 9-8) в соответствии с законом частотного управления с параметрической компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора (подробно настройка *UV2* показана ниже).

Обеспечение заданного диапазона изменения скорости определяется возможностью работы электропривода в технологических режимах на низких частотах, при которых момент, развиваемый двигателем, может оказаться недостаточным. Показателем заниженного значения M_{α} может служить либо «опрокидывание» двигателя, либо значительное падение скорости при приложении M_c. В этих случаях некоторое улучшение может быть достигнуто перестройкой характеристики функционального преобразователя в соответствии с законом частотного управления с параметрической компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора. При настройке следует иметь в виду, что излишнее повышение напряжения может привести к насыщению магнитной системы двигателя при работе на холостом ходу. Резко возрастающий при этом намагничивающий ток может вызвать перегрев двигателя. При работе двигателя в режиме насыщения появляется характерный глухой шум. Учитывая это, необходимо корректировать напряжение на двигателе таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечивался необходимый момент двигателя, а с другой — отсутствовал либо был незначительным режим насыщения двигателя на холостом ходу. Если по требованиям технологии привод не должен работать в режиме холостого хода или работает кратковременно, то при корректировке напряжения учитывается только момент статической нагрузки.

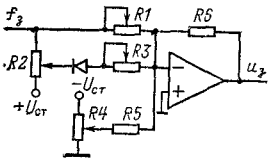


Рис. 9-12. Схема функционального преобразователя.

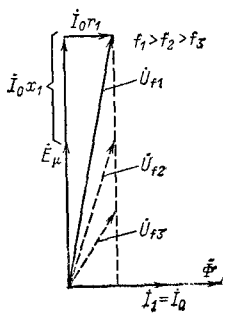


Рис. 9-13. Векторная диаграмма, поясняющая расчет при настройке функционального преобразователя.

Настройка функционального преобразователя, обеспечивающего параметрическую компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении статора (рис. 9-12). Методика настройки основана на том, что поток определяется амплитудой намагничивающего тока, поэтому, для поддержания потока достаточно обеспечить постоянство амплитуды намагничивающего тока. Если предположить, что в режиме холостого хода двигателя ток статора равен намагничивающему току, т. е. $I_{m1}=I_{m0}$, то на основании векторной диаграммы (рис. 9-13) может быть получена зависимость напряжения в функции частоты, при которой амплитуда намагничивающего тока остается постоянной,

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{m0} \sqrt{A^2 f^2 + r_1^2}, \qquad (9\text{-}22)$$

где U — действующее значение фазного напряжения двигателя; I_{m0} — амплитуда намагничивающего тока;

$$A = 4{,}44 k w_1 + 2\pi L_{1р}.$$

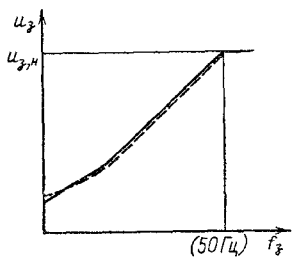


Рис. 9-14. Характеристика функционального преобразователя.

Здесь k — коэффициент укорочения обмотки статора; w_1 — число витков обмотки статора (одной фазы); $L_{1р}$ — индуктивность рассеяния статора.

Рассчитать зависимость (9-22) трудно, поэтому может быть рекомендован такой метод.

В одну выходную фазу преобразователя врезается шунт на ток $(0{,}3 \div 0{,}5) I_н$ двигателя (группы двигателей). К шунту подключается осциллограф. Затем, управляя выпрямителем от внешнего источника, а инвертором от задатчика интенсивности, устанавливаются частота, равная 50 Гц, и напряжение, равное номинальному. Оценивается ток статора (двигатель должен работать вхолостую). После этого, уменьшая частоту и регулируя напряжение так, чтобы ток оставался постоянным, снимается характеристика $u=f(f)$. На рис. 9-14 пунктиром показан примерный вид характеристики, приведенной к сигналам задания. Характеристика линеаризуется двумя отрезками прямой линии. Положение точки излома регулируется потенциометром *R2* (рис. 9-12). Резистором *R1* регулируется наклон первого участка аппроксимированной кривой, резистором *R3* — наклон второго участка, тем самым устанавливается соотношение $U_н/f_н$ на частоте 50 Гц. После настройки функционального преобразователя проверяется работа двигателя под нагрузкой. Если момент двигателя окажется недостаточным, то напряжение увеличивают с помощью потенциометра *R4*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

9-1. **Булгаков А. А.** Частотное управление асинхронными электродвигателями.—М. Изд-во АН СССР, 1955.—216 с.

9-2. **Ковач К. П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1963.—744 с.

9-3. **Бродовский В. Н., Иванов Е. С.** Приводы с частотно-токовым управлением.— М.: Энергия, 1974,—169 с.

9-4. **Сандлер А. С., Сарбатов Р. С.** Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями.— М.: Энергия, 1974.— 328 с.

9-5. **Сандлер А. С., Сарбатов Р. С.** Частотное управление асинхронными двигателями.— М.— Л.: Энергия, 1966.—144 с.

9-6. **Кривицкий С. О., Эпштейн И. И.** Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами.— М.: Энергия, 1970.—150 с.

РАЗДЕЛ ДЕСЯТЫЙ

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАЛАДКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

10-1. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ НАЛАДКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Для производства наладочных работ необходимы: принципиальные схемы, схемы внешних соединений, монтажные и принципиальные схемы заводов — изготовителей пультов, панелей, шкафов, схемы питания, планы расположения электрического и технологического оборудования, пояснительная записка с технологическими требованиями к электроприводу и расчетом уставок защит и режимов работы. В зависимости от сложности схем и мощности электродвигателей могут понадобиться также клиентские формуляры и протоколы заводских испытаний двигателей, документация заводов-изготовителей на ячейки и блоки регулирования и т. д.

1. Ознакомление с проектом:

а) изучают функции электропривода в составе технологической установки, технологические требования к электроприводу, расположение механизма, пультов управления, панелей, шкафов и т. п.;

б) анализируют работу электропривода по принципиальной схеме, проверяют соблюдение необходимой очередности в работе аппаратуры, отсутствие ложных и обходных цепей, обеспечение всех технологических требований, наличие необходимых защит и технологических блокировок, выявляют схемные ошибки;

в) производят поверочные расчеты по выбору уставок защит и функциональных реле, проверяют селективность защит, расчеты по разбивке пусковых и других резисторов; значения сопротивлений резисторов проставляют на принципиальной схеме;

г) проверяют соответствие примененной аппаратуры принятым значениям силового и оперативного напряжений, соответствие возможностей принятых типов реле заданным уставкам;

д) составляют таблицу уставок защитных и функциональных реле;

е) по принципиальной схеме проверяют монтажные схемы панелей, шкафов, пультов, наличие и правильность маркировки на принципиальной схеме, соответствие ее маркировке на монтажной схеме;

ж) на основе схем подключений в рабочей тетради наладчика составляют таблицы всех внешних соединений, относящихся к данному электроприводу; образец приведен в табл. 10-1.

Для удобства последующей работы таблицу внешних связей рекомендуется составлять в двух экземплярах.

После составления таблицы внешние связи проверяют по принципиальной схеме, отмечая их на схеме цветным карандашом. При необходимости в таблицы внешних связей вносят изменения, о которых ставят в известность электромонтажников;

з) составляют полную однолинейную схему питания электропривода всеми видами напряжения от источников (ячейка распредустройства, трансформаторная подстанция, распределительный шкаф, магистраль и т. д.) до каждого присоединения (шкаф, щит, панель);

и) составляют список вспомогательных приводов (систем смазки, вентиляции, гидрав-

Таблица 10-1

Внешние соединения

Номер кабеля (число и сечение жил)	Начало кабеля		Маркировка внешних связей	Конец кабеля		Примечание
	Номера блока зажимов, панели, привода	Маркировка зажимов		Маркировка зажимов	Номера блока зажимов, номера панели, привода	
К-701-10 (5×1,5 мм²)	Щит ЩП, панель 5, привод 701	5	300	24	Пульт 2 Р 10	
		16	301	25		
		31	302	26		
		60	303	27		

лики и т. д.), без которых не может быть осуществлена прокрутка электропривода;

к) составляют программу наладочных работ, уточняют методики проведения работ, подбирают бланки протоколов наладки для заполнения в процессе проведения работ.

2. Проверка внешним осмотром состояния электрооборудования, качества проведенной ревизии, качества и объема выполненных электромонтажных работ (сличением количества проложенных кабелей с необходимым количеством по таблице внешних связей).

3. Проверка соответствия установленного электрооборудования проекту, паспортизация электрической машины, резисторов и других аппаратов, параметры которых должны быть внесены в отчет по наладке.

4. Проверка и испытание электрических машин (производится по программе и методикам, изложенным в разд. 7).

5. Проверка соответствия монтажа внутренних соединений панелей, пультов, шкафов принципиальной схеме. Перед проверкой с целью исключения обходных цепей отключают на блоках зажимов все внешние связи цепей вторичной коммутации. Проверку производят с помощью пробника. Начинают проверку схемы шкафа, панели, пульта с цепей полюсов (фаз) источника оперативного тока, затем проверяют отдельные цепи. Проверяют все провода от контакта к контакту и до блока зажимов и при этом обязательно производят подсчет количества проводов на каждом контакте с целью выявления лишних проводов и связей, не отраженных на принципиальной схеме. Обнаруженные лишние провода, которые могут оказаться под напряжением, следует отключить с двух сторон. При проверке тщательно контролируют и корректируют при необходимости маркировку цепей на принципиальной схеме.

В процессе проверки внутренних соединений проверяют работу замыкающих и размыкающих контактов реле и контакторов путем нажатия и отпускания их якорей, зачищают при необходимости вспомогательные контакты, проверяют и регулируют провалы контактов. В процессе проверки внутренних связей проверяют также диаграммы работы ключей управления. Проверенные цепи отмечают на принципиальной схеме цветным карандашом.

6. Проверка соответствия монтажа внешних соединений принципиальной схеме. Проверку производят два наладчика по составленной таблице внешних связей с помощью пробника. Предварительно между проверяющими должна быть установлена надежная телефонная связь. Для этого целесообразно выделить резервные жилы из контрольных кабелей (целесообразно устанавливать двухпроводную связь), повесить на них бирки с надписью «телефон» и подключить их к блоку зажимов на резервные зажимы с тем, чтобы и в дальнейшем, особенно при прокрутке и настройке путевых и конечных выключателей, использовать эти провода для оперативной связи. После проверки каждого провода внешних связей его отмечают в таблице внешних связей и подключают на блок зажимов сразу с двух сторон. Подключать провода можно только в том случае, если это необходимо для работы схемы и возможно с учетом обеспечения безопасности окружающих.

Проверку внешних связей в силовых цепях и цепях возбуждения электродвигателей производят визуально или с помощью специальных пробников с встроенным высокочастотным генератором путем прокалывания иголкой изоляции силовых кабелей и проводов. Без особой необходимости отключать силовые цепи не рекомендуется. Следует иметь в виду, что правильное присоединение силовых проводов к двигателям гарантирует сразу правильное направление вращения двигателя (соединение шин *Ж, З, К* с зажимами *С1, С2, С3* соответственно обеспечивает вращение двигателя по часовой стрелке со стороны вала или по стрелке, если она имеется на щитке машины).

7. Измерение и испытание изоляции силовых цепей и цепей вторичной коммутации. Измерение сопротивления изоляции начинают с общих цепей, связанных с полюсами (фазами) оперативного напряжения, а затем продолжают для каждой цепи, потенциально не связанной с этими общими цепями, например отделенной от них с двух сторон замыкающими контактами реле и контакторов. Полупроводниковые элементы, имеющиеся в схеме управления, с целью сохранения от пробоя следует при измерении и испытании изоляции закоротить.

Методику измерения сопротивления и испытания изоляции — см. разд. 3. Нормы сопротивления и испытания изоляции см. ПУЭ, разд. I, гл. 1-8.

8. Настройка защитных и функциональных реле, прогрузка автоматических выключателей. Настройку производят по методике, изложенной в разд. 6. Методика настройки некоторых реле будет показана ниже при рассмотрении конкретных схем электроприводов.

9. Измерение сопротивления постоянному току реостатов и пускорегулирующих резисторов. Измерение производят по методике, изложенной в разд. 3 для электроприводов любой мощности и назначения. Измеряют общее сопротивление, которое не должно отличаться от паспортных данных более чем на 10 %, и проверяют целость отпаек.

10. Проверка элементов заземляющих устройств электрических машин, пультов, щитов и т. д. Проверку производят осмотром в пределах доступности. Не должно быть обрывов и дефектов в заземляющих проводниках, их соединениях и присоединениях.

11. Проверка функционирования релейно-контакторных схем под напряжением. Проверку производят при обесточенных силовых цепях после предварительной проверки полярности оперативного напряжения. Каждую цепь релейно-контакторной схемы проверяют отдельно между двумя полюсами (фазами) оперативного тока путем включения ключей управления и других аппаратов управления и имитации работы реле и контакторов нажатием и отпусканием их якорей. Таким образом должно быть проверено действие всех аппаратов управления во всех положениях и действие всех вспомогательных контактов реле и контакторов. Замыкание и размыкание контак-

тов контакторов в силовых цепях контролируют пробником.

Функционирование релейно-контакторных схем проверяют при номинальном и 0,9 номинального напряжении оперативных цепей. В установках выше 1000 В функционирование схем на отключение электропривода проверяют также при оперативном напряжении 0,8 номинального.

12 Опробование работы электропривода с ненагруженным механизмом или на холостом ходу двигателя. Опробование производят при наличии разрешения на прокрутку от электро- и механомонтажной организации и службы эксплуатации обученным персоналом эксплуатации под руководством наладчиков, если выполнены все мероприятия по технике безопасности. Как правило, нецелесообразно отсоединение двигателя от механизма. Для электроприводов, имеющих ограниченное перемещение, механизм для первой прокрутки должен быть установлен в среднее положение. Для таких электроприводов особенно важно обеспечить правильное направление вращения (это, как указывалось выше, достигается тщательной проверкой силовой схемы) и целесообразно предварительно выставить ограничение хода с помощью путевых выключателей. Перед прокруткой кроме указанных выше должны быть выполнены следующие работы:

установлена надежная телефонная связь между пультом, панелями управления и механизмом (если на последнем необходимо производить настройку путевых выключателей);

отрегулирован и опробован электромеханический тормоз, если он имеется на электроприводе;

опробованы и запущены в работу все вспомогательные приводы, обеспечивающие нормальную работу двигателя и механизма,— системы смазки, вентиляции, гидравлики.

Прокрутку электропривода производят в такой последовательности:

а) производят кратковременный толчок привода. При этом проверяют направление вращения, нормальную работу двигателя и механизма, работу электромеханических тормозов;

б) производят (для нерегулируемых электроприводов) запуск электропривода до номинальной частоты вращения двигателя. Для систем с глухоподключенным возбудителем проверяют вхождение синхронного двигателя в синхронизм. Для систем с подачей возбуждения двигателя в функции тока или скольжения синхронный двигатель запускают без возбуждения и измеряют величины, необходимые для окончательной настройки систем подачи возбуждения. При остановке приводов с асинхронными двигателями проверяют и подстраивают динамическое торможение и действие тормозов. Проверяют состояние подшипников и нагрев двигателя;

в) производят настройку конечных положений механизма при остановке привода с номинальной частоты вращения, а также настройку путевых выключателей по диаграмме их работы с учетом конкретных положений механизма по требованиям технологии;

г) производят настройку режимов пуска и реверса электропривода для регулируемых электроприводов и настройку систем возбуждения для синхронных электродвигателей.

13. Проверка работы электропривода под нагрузкой. Проверку производят в режиме, обеспечиваемом технологической установкой к моменту окончания наладочных работ.

14. Сдача электропривода во временную эксплуатацию. Сдачу оформляют актом или записью в специальном журнале. При этом заказчику передают протоколы измерения и испытания изоляции, проверки элементов и цепей заземления, вносят в комплект принципиальных схем заказчика произведенные в процессе наладки изменения.

15. Уточнение рабочих параметров функциональных и защитных реле, автоматических выключателей, резисторов, уставки которых изменялись в процессе опробования электропривода. Эту работу выполняют для внесения в протоколы по наладочным работам фактических уставок.

16. Оформление технического отчета и сдача электропривода в эксплуатацию по акту. Технический отчет по наладке электропривода должен состоять из следующих разделов: аннотации, содержания томов технического отчета по всему объекту, содержания данного тома технического отчета, пояснительной записки, протоколов наладки, исполнительных чертежей.

В зависимости от сложности налаживаемых электроприводов пояснительную записку можно и не оформлять. В пояснительной записке обосновывают выполненные в процессе наладки изменения схем, приводят осциллограммы работы регулируемых электроприводов, ссылки на документы, на основании которых настраивались защиты, и другие материалы, которые могут быть полезны для эксплуатации электроприводов и обобщения опыта наладочных работ.

В протоколах наладки должны быть представлены все сведения по измерениям, испытаниям, опробованиям, проведенным в соответствии с действующими директивными документами, инструкциями заводов-изготовителей и требованиями гл. 1-8 ПУЭ.

Приведенная программа работ для электроприводов переменного тока с контакторно-релейными схемами управления является общей и для регулируемых электроприводов и входит в программу их наладки как составная часть.

В дальнейшем при рассмотрении различных электроприводов будут указываться лишь дополнения к приведенной программе.

10-2. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменные величины и параметры электрических машин, кроме времени и постоянных времени, удобно выражать в относительных единицах, т. е. рассматривать отношения всех величин к базовым. Например, относительный ток i_* выражается через ток $i_{абс}$ в абсолютных единицах и базовый ток $I_б$; относительное со-

Таблица 10-2

Принятые обозначения базовых величин

Обозначение	Базовые величины	Выражение
$I_{s,б}$	Ток, А	Амплитудное значение номинального тока фазы статора
$U_{s,б}$	Напряжение, В	Амплитудное значение номинального напряжения (для частотно-управляемого СД — э. д. с.) фазы статора
$Z_{s,б}$; $R_{s,б}$, $X_{s,б}$	Сопротивления, Ом	$Z_{s,б} = R_{s,б} = X_{s,б} = \frac{U_{s,б}}{I_{s,б}}$
$S_б$; $P_б$; $Q_б$	Мощности, В·А; Вт; вар	$S_б = P_б = Q_б = \frac{3}{2} U_{s,б} I_{s,б}$ — номинальная полная мощность двигателя
$\Omega_б$	Угловая частота, 1/с	$\Omega_б = 2\pi f_н$ ($f_н$ — номинальная частота сети, 1/с=Гц)
$\Omega_{м,б}$	Угловая скорость, рад/с	$\Omega_{м,б} = \frac{\Omega_б}{p}$ (p — число пар полюсов двигателя)
$M_б$	Момент, Н·м	$M_б = \frac{S_б}{\Omega_{м,б}}$
$\Psi_{s,б}$	Потокосцепление, В·с	$\Psi_{s,б} = \frac{U_{s,б}}{\Omega_б}$
$U_{R,б}$	Напряжение цепей регулирования, В	—
$I_{R,б}$	Ток цепей регулирования, А	—

противление r_* выражается через сопротивление $R_{абс}$ в абсолютных единицах и базовое сопротивление $R_б$

$$i_* = \frac{i_{абс}}{I_б}; \quad r_* = \frac{R_{абс}}{R_б}.$$

Далее в этом разделе используют только относительные величины, поэтому индекс * исключен. По возможности сохранены обозначения, используемые в технической документации электрических машин, в частности индексы при переменных величинах и параметрах.

Базовые величины статора и механические выражаются через номинальные данные машины (табл. 10-2).

Переменные величины и параметры роторных обмоток и демпферных контуров рассматриваются приведенными к статору. Это может быть обеспечено выбором базовых величин для ротора. Такой же подход к промежуточной цепи постоянного тока асинхронного вентильного каскада и синхронного двигателя с инвертором тока.

Базовые мощности для этих цепей совпадают со статорными Базовый ток (амплитуда фазного синусоидального тока при симметричной системе токов трехфазного ротора, ток возбуждения или ток промежуточной цепи) создает в зазоре машины такую же основную гармонику м. д. с., как и симметричная система синусоидальных токов статора, амплитуда которых равна базовому току. Для промежуточной цепи при этом предполагается угол коммутации вентилей $\gamma_в = 0$.

Обозначения, используемые в данном разделе, сведены в табл. 10-3, индексы — в табл. 10-4.

В теории электрических машин переменного тока [10-1, 10-10] рассматриваются обобщенные векторы статора, которые выражают-

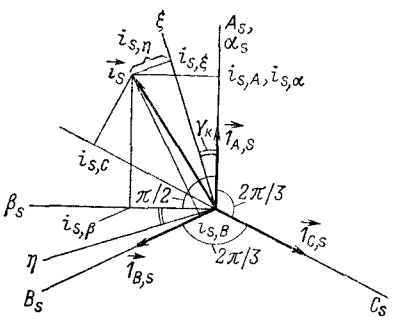


Рис. 10-1. Оси электрической машины переменного тока.

ся через мгновенные значения фазных переменных, например для трехфазного статора

$$\vec{i}_s = \frac{2}{3}\left(\vec{1}_{A,s}\, i_{s,A} + \vec{1}_{B,s}\, i_{s,B} + \vec{1}_{C,s}\, i_{s,C}\right). \tag{10-1}$$

В трехпроводной системе мгновенный фазный ток статора равен проекции вектора i_s

Таблица 10-3

Принятые обозначения величин

Обозначение	Величина
i	Ток
u	Напряжение
ψ	Потокосцепление
m	Электромагнитный момент двигателя
m_c	Момент нагрузки на валу
r	Активное сопротивление
x	Реактивное сопротивление
x'	Переходное реактивное сопротивление
x''	Сверхпереходное реактивное сопротивление
k	Коэффициент передачи
$H(p)$	Передаточная функция
ν	Угловая скорость ротора
ν_s	Угловая скорость магнитного поля статора
$\nu_\varkappa$	Угловая скорость системы координат *1*, *2*
$\nu_к$	Угловая скорость системы координат ξ, η
t	Время, с
T	Постоянная времени, с
T'	Переходная постоянная времени, с
T''	Сверхпереходная постоянная времени, с
T_1, T_2	Постоянные времени, характеризующие быстродействие оптимально настроенных контуров 2-го и 3-го порядков соответственно, с
T_j	Инерционная постоянная времени привода, с
J	Момент инерции привода, кг·м²
α	Угол управления тиристорами, рад, град
β	Угол опережения открывания тиристоров инвертора, рад, град
φ	Угол сдвига между основными гармониками напряжения и тока, град
$\gamma_в$	Угол коммутации тока в вентильном преобразователе, град
γ	Угол между осью d (или A_r) и осью A_s, град
$\gamma_к$	Угол между осью ξ и осью A_s, град
γ_s	Угол между осью p и осью A_s, град
$\varkappa$	Угол между осью *1* и осью A_s, град
δ	Угол между вектором потокосцепления статора и осью d ротора *СД*, град
ϑ	Угол между вектором основного потока и осью d ротора СД, град

Таблица 10-4

Обозначение индексов

Обозначение	Наименование
s	Статор
r	Ротор с симметричной обмоткой
f	Обмотка возбуждения СД
δ	Воздушный зазор
m	Взаимоиндукция
э	Эквивалентная величина
у	Управление
g, з	Заданное значение
с	Питающая сеть
о	Некоторый установившийся режим, точка линеаризации характеристик, опорная величина
др	Сглаживающий дроссель цепи постоянного тока
A, B, C	Составляющие по осям фаз A, B, C
α, β	Составляющие по осям α, β
d, q	Составляющие по осям d, q
1, *2*	Составляющие по осям *1*, *2*
ξ, η	Составляющие по осям ξ, η
р, а	Составляющие по осям p, a
σ	Рассеяние
c	Демпферная обмотка
п	Промежуточная цепь постоянного тока
→	(над буквой) обобщенный вектор
т	Трансформатор вентильного преобразователя

на ось данной фазы. Все это относится также к напряжениям, э. д. с., потокосцеплениям.

Для представления обобщенных векторов статора используют их проекции на ортогональные оси α_s, β_s, связанные со статором; при этом ось α_s совпадает с осью A_s статора, а ось β_s опережает ее (рис. 10-1).

Указанные проекции выражаются через фазные величины соотношениями такого вида:

$$i_{s,\alpha} = \frac{2}{3}\left(i_{s,A} - \frac{1}{2}\,i_{s,B} - \frac{1}{2}\,i_{s,C}\right);$$

$$i_{s,\beta} = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\,i_{s,B} - \frac{\sqrt{3}}{2}\,i_{s,C}\right). \quad (10\text{-}2)$$

При трехпроводной системе фазные переменные выражаются через эти проекции соотношениями вида

$$i_{s,A} = i_{s,\alpha}; \qquad i_{s,B} = -\frac{1}{2}\,i_{s,\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}\,i_{s,\beta}; \qquad i_{s,C} = -\frac{1}{2}\,i_{s,\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}\,i_{s,\beta} \quad (10\text{-}3)$$

Все указанное с заменой индексов используется также для ротора АД.

При анализе режимов машин переменного тока используют проекции обобщенных векторов на ортогональные оси ξ, η некоторой

системы координат, не совпадающие с осями α_s, β_s и не связанные со статором (рис. 10-1): для АД с короткозамкнутым ротором — оси *1*, *2*, причем ось *1* совпадает по направлению с вектором $\vec{\psi}_r$, ось *2* опережает ее; для машины двойного питания (МДП) — оси *p*, *a*, причем ось *a* совпадает с вектором $\vec{u}_s$, а ось *p* отстает от нее; для СД — оси *d*, *q*, причем продольная ось *d* совпадает с осью обмотки возбуждения, а поперечная ось *q* опережает ее.

Проекции на оси ξ, η указанной системы координат связаны с проекциями на оси α_s и β_s соотношениями вида

$$i_{s,\xi} = i_{s,\alpha}\cos\gamma_к + i_{s,\beta}\sin\gamma_к;$$
$$i_{s,\eta} = -i_{s,\alpha}\cos\gamma_к + i_{s,\beta}\sin\gamma_к; \quad (10\text{-}4)$$
$$i_{s,\alpha} = i_{s,\xi}\cos\gamma_к - i_{s,\eta}\sin\gamma_к;$$
$$i_{s,\beta} = i_{s,\xi}\sin\gamma_к + i_{s,\eta}\cos\gamma_к. \quad (10\text{-}5)$$

Выражение угла $\gamma_к$:
для АД с короткозамкнутым ротором $\gamma_к = \varkappa$; (10-6)

для МДП $\gamma_к = \gamma_s$; (10-7)

для СД $\gamma_к = \gamma$. (10-8)

Соотношения для угловой скорости системы координат

$$\nu_к = \frac{1}{\Omega_б}\frac{d\gamma_к}{dt}; \quad (10\text{-}9)$$

для АД с короткозамкнутым ротором $\nu_к = \nu_ж$; (10-10)

для МДП $\nu_к = \nu_s = 1$; (10-11)

для СД $\nu_к = \nu$. (10-12)

Далее приводятся соотношения для параметров электрической машины. Применительно к СД эти соотношения справедливы для продольных и поперечных параметров с дополнительными индексами *d* и *q* соответственно.

Соотношения между реактивными сопротивлениями:

$$x_s = x_m + x_{s,\sigma}; \quad x_r = x_m + x_{r,\sigma};$$
$$x_f = x_m + x_{f,\sigma}. \quad (10\text{-}13)$$

Соотношения для переходных реактивных сопротивлений АД:

$$x_s^* = \frac{x_s x_r - x_m^2}{x_r}; \quad x_r^* = \frac{x_s x_r - x_m^2}{x_s};$$
$$x_m' = \frac{x_s x_r - x_m^2}{x_m}; \quad (10\text{-}14)$$

для переходных реактивных сопротивлений СД

$$x_s' = \frac{x_s x_f - x_m^2}{x_f}; \quad x_f' = \frac{x_s x_f - x_m^2}{x_s};$$
$$x_m' = \frac{x_s x_f - x_m^2}{x_m}; \quad x_c' = \frac{x_c x_s - x_m^2}{x_s}; \quad (10\text{-}15)$$

для эквивалентного индуктивного сопротивления промежуточной цепи АВК

$$x_п = \frac{\pi^2}{9}x_r' + 2x_т + x_{др}. \quad (10\text{-}16)$$

Соотношения для эквивалентных активных сопротивлений: АД с короткозамкнутым ротором

$$r_э = r_s + \left(\frac{x_m}{x_r}\right)^2 r_r; \quad \rho = \frac{x_m}{x_r}r_r; \quad (10\text{-}17)$$

АВК

$$r_п = r_{п,с} + sr_{п,в}; \quad r_{п,с} = \frac{\pi^2}{9}r_p + 2r_т + r_{др};$$
$$r_{п,в} = \frac{\pi}{6}x_r' + \frac{\pi^2}{9}r_s. \quad (10\text{-}18)$$

Соотношения для постоянных времени:
а) общие

$$T_j = \frac{J\Omega_{м,б}}{M_б}; \quad (10\text{-}19)$$

$$T_s = \frac{x_s}{\Omega_б r_s}; \quad T_s' = \frac{x_s'}{\Omega_б r_s}; \quad (10\text{-}20)$$

б) для АД

$$T_r = \frac{x_r}{\Omega_б r_r}; \quad T_r' = \frac{x_r^*}{\Omega_б r_r};$$
$$T_э = \frac{x_s'}{\Omega_б r_э}, \quad (10\text{-}21)$$

T', T'' — корни системы уравнений ($T' > T''$),

$$T' + T'' = T_s + T_r;$$
$$T'T'' = T_s'T_r; \quad (10\text{-}22)$$

в) для СД

$$T_f = \frac{x_f}{\Omega_б r_f}; \quad T_c = \frac{x_c}{\Omega_б r_c};$$
$$T_f' = \frac{x_f'}{\Omega_б r_f}; \quad T_c' = \frac{x_c^*}{\Omega_б r_c};$$
$$T_{c,\sigma} = \frac{x_{c,\sigma}}{\Omega_б r_c}, \quad (10\text{-}23)$$

T', T'' — корни системы уравнений ($T' > T''$),

$$T' + T'' = T_f' + T_c'; \quad T'T'' = \frac{x_f' x_c' - x_m'^2}{\Omega_б^2 r_f r_c}. \quad (10\text{-}24)$$

Связь между токами и потокосцеплениями выражается соотношениями (без учета насыщения):
для АД

$$\vec{\psi}_s = \vec{\psi}_б + x_{s,\sigma}\vec{i}_s = x_s\vec{i}_s + x_m\vec{i}_r =$$
$$= \frac{x_m}{x_r}\vec{\psi}_r + x_s'\vec{i}_s;$$

$$\vec{\psi}_r = \vec{\psi}_\delta + x_{r,\sigma}\vec{i}_r = x_m\vec{i}_s + x_r\vec{i}_r = \frac{x_r}{x_m}\vec{\psi}_\delta - x_{r,\sigma}\vec{i}_s; \quad (10\text{-}25)$$

для СД (без демпферной обмотки)

$$\psi_{s,d} = \psi_{\delta,d} + x_{s,\sigma}i_{s,d} = x_{s,d}i_{s,d} +$$

$$+ x_{m,d}i_f = \frac{x_{m,d}}{x_f}\psi_f + x'_{s,d}i_{s,d}; \quad (10\text{-}26а)$$

$$\psi_{s,q} = \psi_{\delta,q} + x_{s,\sigma}i_{s,q} = x_{s,q}i_{s,q}; \quad (10\text{-}26б)$$

$$\psi_f = \psi_{\delta,d} + x_{f,\sigma}i_f = x_{m,d}i_{s,d} + x_f i_f =$$

$$= \frac{x_f}{x_{m,d}}\psi_{\delta,d} - x_{f,\sigma}i_{s,d}. \quad (10\text{-}26в)$$

Соотношения для электромагнитного момента:
общие

$$m = \psi_\delta i_s \sin\left(\vec{\psi}_\delta^{\wedge}, \vec{i}_s\right) = \psi_s i_s \sin\left(\vec{\psi}_{sp}^{\wedge}, \vec{i}_s\right); \quad (10\text{-}27)$$

для АД

$$m = \psi_r i_r \sin\left(\vec{i}_r^{\wedge}, \vec{\psi}_r\right); \quad (10\text{-}28)$$

для АВК

$$m = \frac{1}{\nu_s}\left(\frac{x_m}{x_s}u_s - \frac{\pi}{6}x'_r i_\text{п}\right)i_\text{п}$$

при $\gamma_\text{в} \leqslant \frac{\pi}{3}$; (10-29)

$$m = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{\nu_s}\sqrt{\left(\frac{x_m}{x_s}u_s\right)^2 - \left(\frac{\pi}{3}x'_r i_\text{п}\right)^2}\, i_\text{п}$$

при $\gamma_\text{в} > \pi/3$.

Передаточные функции оптимальных контуров:
2-го порядка

$$H_1(p) = \frac{1}{1 + 2T_1 p + 2T_1^2 p^2}; \quad (10\text{-}30)$$

3-го порядка

$$H_2(p) = \frac{1}{1 + 4T_2 p + 8T_2^2 p^2 + 8T_2^3 p^3}. \quad (10\text{-}31)$$

Б. НАЛАДКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

10-3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

1. Наладка нереверсивного электропривода без торможения. Наиболее простой способ пуска АД — прямое включение обмотки статора на сеть. Пуск двигателя этим способом

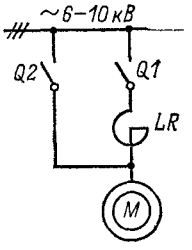


Рис. 10-2. Схема реакторного пуска.

сопровождается значительными бросками тока (до 6—7-кратного по отношению к номинальному току двигателя). Максимальные реле и автоматические выключатели должны быть отстроены от пусковых токов.

При необходимости уменьшить пусковой ток используется реакторный пуск (рис. 10-2). Вначале двигатель *M* подключается к сети через пусковой реактор *LR* выключателем *Q1*. После уменьшения пускового тока в процессе разгона двигателя включается выключатель *Q2*.

При наладке электропривода первый запуск осуществляют без включения выключателя *Q2*. При этом измеряют время спадания тока двигателя до установившегося значения. Уставку времени задержки включения выключателя *Q2* устанавливают равной измеренному времени и затем производят проверку работы электропривода по полной схеме.

Для электроприводов с асинхронными двигателями до 1000 В иногда применяют схемы, аналогичные рис. 10-2, но с резисторами вместо реакторов. Методика наладки таких электроприводов аналогична.

2. Наладка реверсивного электропривода с торможением. По схеме рис. 10-3, аналогичной схеме станции управления ПУ5522, осуществляются пуск привода в выбранном ключом направлении, динамическое торможение двигателя с наложением механического тормоза при установке ключа *SA* в нейтральное положение, торможение двигателя противовключением с последующим разгоном в обратном исходному направлении при переводе ключа из одного крайнего положения в другое. Конечные выключатели *SQ1* и *SQ2* ограничивают ход механизма в крайних положениях. Блокировочное реле *KB* в этой схеме обеспечивает прерывание динамического торможения и повторное подключение двигателя к сети, если ключом *SA* выбрано определенное направление вращения двигателя до окончания динамического торможения. Реле *KB* должно надежно втягиваться через последовательно включенную с ним катушку контактора *KM2* или *KM3*. Выдержка времени этого реле при отпадании должна быть на 20—30 % больше времени включения одного контактора, т. е. 0,2—0,3 с, и ее необходимо настраивать в реальной схеме (без подачи силового напряжения на двигатель). При этом искусственно замыкают контакты реле *KT2* в цепи катушки контактора *KM4* и подают напряже-

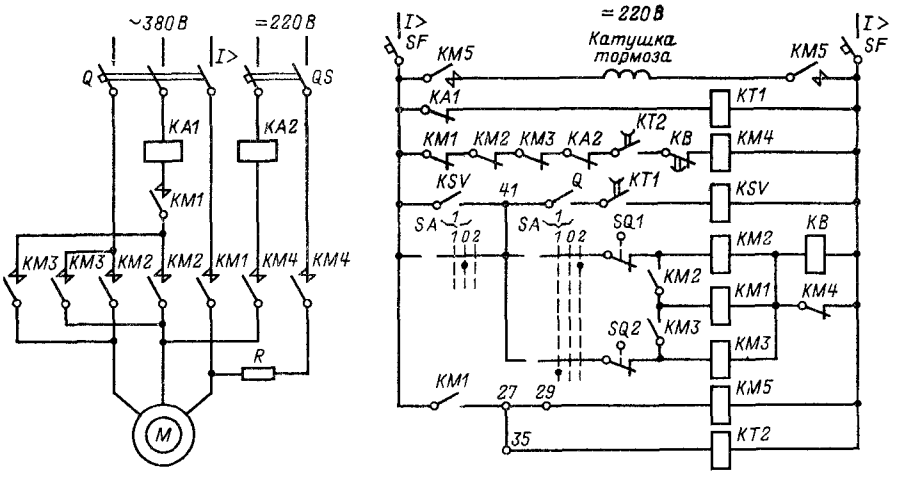


Рис. 10-3. Схема управления короткозамкнутыми АД с динамическим торможением и противовключением.

ние на схему. В нейтральном положении *SA* контактор *KM4* включится. При повороте ключа *SA* в любое положение должно включиться реле *KB* и своим размыкающим контактом отключить контактор *KM4*, который в свою очередь своим размыкающим контактом включит избранный ключом контактор направления (*KM2* или *KM3*) и зашунтирует катушку *KB*. За время отпадания *KB* должен включиться контактор направления. Это время должно быть минимально возможным, чтобы не задерживалось повторное подключение динамического торможения.

Сопротивление резистора динамического торможения *R* выбирают при опробовании электропривода с механизмом в соответствии с требуемой по технологии интенсивностью торможения. Ток динамического торможения может достигать 3—4-кратного значения номинального тока двигателя. Реле защиты цепи динамического торможения от коротких замыканий *KA2* отстраивают при этом от срабатывания при установленном токе динамического торможения. Выдержку времени реле *KT2* длительности динамического торможения устанавливают после выбора необходимого сопротивления резистора *R* чуть больше фактического времени торможения привода от номинальной частоты вращения до полной остановки.

Защиты силовой цепи от коротких замыканий и двигателя от перегрузки обеспечиваются в рассматриваемом электроприводе автоматическим выключателем *Q*. Ток теплового расцепителя автомата должен быть на 20—30 % выше номинального тока двигателя; максимальный расцепитель отстраивают от срабатывания при токах противовключения двигателя при опробовании привода. Реле *KA1*, защищающее двигатель от перегрузки, настраивают до опробования электропривода на срабатывание при токе, равном 2,5-кратному номинальному току двигателя. Реле *KT1* настраивают при опробовании привода по фактическому времени реверса привода от номинальной до номинальной частоты вращения.

10-4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ФАЗНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В этих электроприводах сравнительно простыми средствами осуществляются: пуск в заданном направлении с ограничением тока статора или ударных моментов; динамическое или двухтоковое торможение до полной остановки; реверс с ограничением тока статора или ударных моментов; работа на пониженной частоте вращения в случае небольшой продолжительности или при вентиляторном характере момента сопротивления; шаговый режим для установочных перемещений.

1. **Состав электропривода.** АД подключается к сети через тиристорную станцию управления. Простейшие тиристорные пускатели и станции управления (например, серий ПТ, ТСУ, КТСУ) обеспечивают бесконтактные пуск, торможение, реверс, некоторые логические операции, блокировки и защиты электропривода [10-4]. Другой разновидностью являются станции управления, которые дополнительно обеспечивают возможность регулирования скорости [10-7] (например, серии ТСУР). В этом случае в составе электропривода предусматривается тахогенератор.

2. **Тиристорная станция управления.** Силовой блок тиристорной станции управления содержит от двух до пяти пар встречно-параллельно включенных тиристоров, которые подключают обмотки статора асинхронного двигателя к сети переменного тока. Наиболее распространенная схема соединения тиристоров приведена на рис. 10-4. При открытых тиристорах *VD1* — *VD6* магнитное поле двигателя вращается в прямом направлении «вперед»; если открыты тиристоры *VD5*—*VD10*, то магнитное поле двигателя вращается в обратном направлении «назад». Тиристоры *VD1*, *VD9* и *VD4*, *VD8* обеспечивают питание статора постоянным током в режиме динамического торможения.

Регулирование первой гармоники подводимого к статору напряжения осуществляется изменением угла управления α, определя-

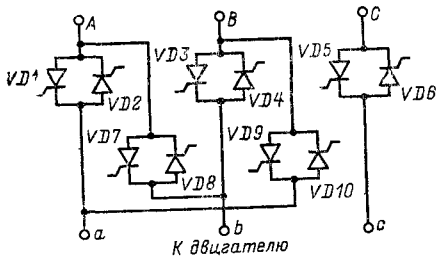


Рис. 10-4. Схема силовых цепей реверсивной тиристорной станции управления.

ющего фазу открывания тиристоров. Угловая скорость магнитного поля при этом остается неизменной. Так как электромагнитный момент асинхронного двигателя при каждом значении угловой скорости ν пропорционален квадрату напряжения первой гармоники, то введение обратной связи по частоте вращения, воздействующей на угол управления, позволяет поддерживать заданную частоту вращения двигателя. К. п. д. привода не превышает относительной скорости ν. Поэтому длительная работа привода на пониженной частоте вращения при больших моментах нагрузки не допустима по условиям нагревания.

Функциональная схема тиристорной станции управления, аналогичной ТСУР-2120, представлена на рис. 10-5. Задание необходимого режима работы («вперед», «назад», «торможение», «максимальная частота вращения», «пониженная частота вращения» и др.) производится кнопками и переключателями панели управления *ASB*, от которой сигналы поступают в блок режима *AC*.

В блоке режима сигналы запоминаются, осуществляется их взаимная блокировка, вырабатываются дискретные команды (логические сигналы) на открывание тиристоров силового блока *UV*, осуществляющих заданный режим, подаются на выход напряжения, определяющие угол управления тиристорами при работе в двигательном режиме на максимальной частоте вращения $u_{у,м}$ и в режиме динамического торможения $u_{у,т}$. Дискретная команда на открывание тиристоров при задании нового двигательного режима задерживается элементом *DT* на 0,01 с для исключения коротких замыканий при реверсе. Дискретная команда на открывание тиристоров при переводе в режим динамического торможения подается непосредственно на логический вход устройства фазного управления *AV*.

Напряжение $u_у$, определяющее угол управления, поступает на соответствующий вход устройства *AV* с выхода устройства выбора наибольшего напряжения *ASU*. Так как угол управления α пропорционален напряжению $u_у$, а напряжение на двигателе уменьшается при увеличении угла α, то оно определяется тем сигналом из поступающих на вход устройства *ASU*, который задает наименьшее напряжение на двигателе.

Для поддержания заданной частоты вращения часть напряжения тахогенератора постоянного тока *BR* после выпрямительного моста *VS* сравнивается с напряжением, задающим частоту вращения ν_g, которое поступает с устройства задания (переменного резистора) *ACH*. Положительная разность поступает на вход усилителя напряжения *AER*, а с его выхода через бесконтактный ключ *ASC* — на вход устройства выбора наибольшего напряжения *ASU*. Ключ *ASC* замкнут (передает сигнал от *AER* к *ASU*), когда переключатель на панели управления находится в положении «пониженная частота вращения» и отсутствуют запреты в блоке режима. Коэффициент усиления *AER* определяет жесткость искусственных механических характеристик и колебательность переходных процессов.

Если разность $\nu_g - |\nu|$ мала или отрицательна (т. е. $|\nu| > \nu_g$), то срабатывает полупроводниковый релейный элемент *DSR* и его выходной сигнал переводит станцию управления в режим динамического торможения. Когда частота вращения окажется меньше заданной, сигнал на выходе релейного элемента *DSR* исчезнет и блок режима *AC* переведет станцию управления в двигательный режим.

Устройство фазового управления *AV* формирует импульсы управления тиристорами шириной 30—165° с заданным углом управления α в пределах 0—150°. Для синхронизации с сетевым напряжением на вход устройства *AV* подаются с блока питания *UG* синхронизирующие напряжения. Если для уменьшения габаритов импульсных трансформаторов на тиристоры подаются пакеты высокочастотных импульсов управления, то на вход устройства фазового управления *AV* подводится прямоугольное напряжение с частотой 3—5 кГц от отдельного генератора *G*.

Для получения безударных переходных процессов при пуске и реверсе напряжение $u_{у,м}$, определяющее угол управления в двигательном режиме, подается с блока режима *AC* к устройству выбора наибольшего напряжения *ASU* через *RC*-фильтр *Z* с постоянной времени 0,01—0,3 с.

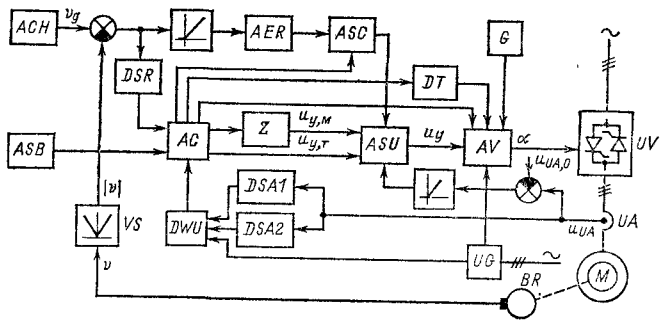


Рис. 10-5. Упрощенная функциональная схема тиристорной станции управления.

Для ограничения тока статора в переходных режимах выходное напряжение u_{UA} датчика тока *UA* сравнивается с уставкой токоограничения $u_{UA,0}$, и полученная разность подается на устройство выбора наибольшего напряжения *ASU*. При больших токах это приводит к снижению напряжения на двигателе. Датчик тока выполняется на трех трансформаторах тока с балластными резисторами на вторичной стороне. Напряжение с резисторов подается на трехфазный мостовой выпрямитель.

Защита от перегрузок по току осуществляется полупроводниковым релейным элементом *DSA1* с регулируемой уставкой. На входе релейного элемента *DSA1* включен фильтр, а на выходе — элемент временной задержки (на функциональной схеме не показаны) для отстройки от кратковременных перегрузок при пусках и реверсах. Выходной сигнал подается на многовходовый логический элемент ИЛИ—НЕ *DWU* прямо или через элемент памяти (триггер). Исчезновение выходного сигнала элемента *DWU* на входе блока режима приводит к немедленному снятию управляющих импульсов с тиристоров.

Защита от коротких замыканий осуществляется полупроводниковым релейным элементом *DSA2*, не имеющим фильтра на входе и задержки на выходе. Его действие аналогично рассмотренному выше.

3. **Наладка электропривода.** Должна быть проведена проверка на функционирование всей системы управления без силовой части путем контроля правильности фазировки, наличия и диапазона сдвига отпирающих импульсов тиристоров при управлении от устройства *ACH*.

Далее при заторможенном АД проводится настройка токоограничения переменным резистором в блоке защиты. Затем настраиваются защиты. Изменение уставки защиты от перегрузки по току производится переключателем в блоке защиты. При увеличении уставки тока одновременно происходит увеличение выдержки времени на срабатывание защиты. В последнем положении переключателя защита от перегрузок полностью отключается. Уставка защиты от токов короткого замыкания регулируется переменным резистором. Обе защиты должны быть настроены так, чтобы в наиболее тяжелых режимах (пуск, реверс) они не срабатывали.

После настройки защит и токоограничения производят пробный пуск при отключенной обратной связи по частоте вращения. При этом проверяют функционирование станции управления и полярность обратной связи по частоте вращения. Затем устанавливают минимальный коэффициент усиления усилителя *AER* и замыкают контур регулирования скорости. Плавно повышая коэффициент усиления добиваются требуемой жесткости механических характеристик при удовлетворительном качестве протекания переходных процессов.

10-5. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ, ОРИЕНТИРОВАННЫМ ПО ПОЛЮ

В этих электроприводах обеспечиваются высокие статические и динамические показатели: перегрузочная способность, диапазон и качество регулирования скорости.

1. **Состав электропривода** с рассматриваемой системой управления и связи между его основными частями показаны на функциональной схеме рис. 10-6. Асинхронный двигатель *M* с короткозамкнутым ротором питается от преобразователя частоты *UF*. Преобразователь частоты (ПЧ) управляется от устройства автоматического регулирования *ACL*. В это устройство вводятся обратные связи от датчиков тока статора *UA1—UA3*, измерителей индукции в воздушном зазоре двигателя *BY1*, *BY2*, датчика частоты вращения *BR*. Вводится задание скорости $v_з$ от органа ручного управления *BG* или системы автоматического управления технологическим агрегатом.

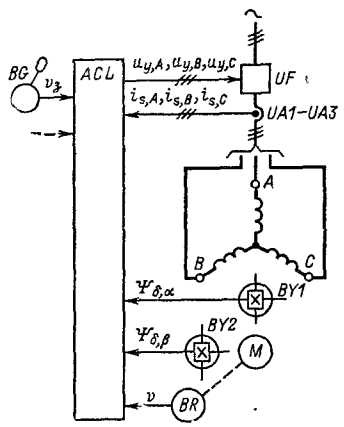


Рис. 10-6. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

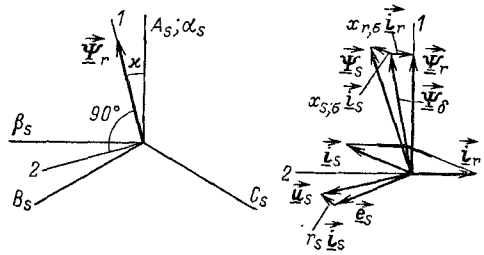


Рис. 10-7. Оси АД и векторная диаграмма в установившемся режиме.

2. **АД как объект автоматического регулирования.** При анализе электромагнитных процессов и построении САР используется система координат, образуемая ортогональными осями *1* и *2* (рис. 10-7). Ось *1* по направлению совпадает с обобщенным вектором потокосцепления ротора $\vec{\psi}_r$. Регулирование переменных в осях *1* и *2* называют ориентированным по полю ротора [10-8, 10-9].

При обычных допущениях аналитической теории машин переменного тока [10-10] получена структурная схема АД (рис. 10-8). Электромагнитные контуры представлены здесь тремя апериодическими звеньями. Два одина-

ковых звена имеют выходами токи i_{s1}, i_{s2} и входами напряжения u_{s1}, u_{s2} соответственно; передаточная функция для этих звеньев

$$H_i(p) = \frac{1}{r_э} \frac{1}{1 + T_э p}. \qquad (10\text{-}32)$$

Входом третьего звена является ток i_{s1}, выходом — потокосцепление ψ_{r1}; передаточная функция звена

$$H_\psi(p) = x_m \frac{1}{1 + T_r p}. \qquad (10\text{-}33)$$

В структуре АД имеются внутренние обратные связи, действующие на входы первых двух звеньев.

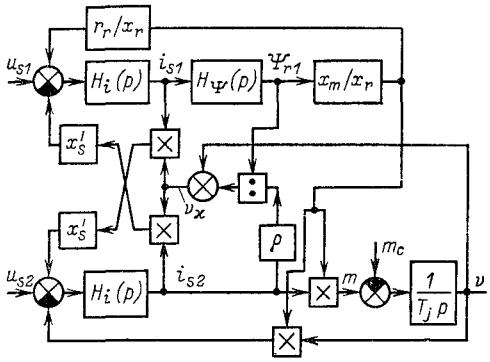


Рис. 10-8. Структурная схема АД.

3. **Целесообразные режимы.** Достаточно высокие показатели в отношении перегрузочной способности и качества регулирования скорости обеспечиваются при поддержании (с помощью САР) независимо от нагрузки потокосцепления ψ_{r1}, что совпадает с ψ_r — модулем обобщенного вектора потокосцепления ротора. По соотношению

$$m = \frac{x_m}{x_r} \psi_{r1} i_{s2} \qquad (10\text{-}34)$$

в таких режимах момент пропорционален току статора i_{s2} и может быть получена высокая кратность максимального момента.

Определенное ограничение по моменту связано с насыщением АД. С ростом момента увеличивается основной поток (рис. 10-7), и когда он достигает насыщения, нельзя уже использовать рассмотренные здесь структурную схему и режимы АД.

4. **Преобразователь частоты** *UF* (рис. 10-6) выполняется на основе тиристоров или силовых транзисторов. Наилучшие показатели электропривода в отношении диапазона и качества регулирования скорости обеспечиваются ПЧ, в которых возможно управление мгновенным значением фазных напряжений: непосредственным преобразователем частоты (см. § 11-11) или инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Здесь для определенности рассматривается электропривод с питанием от ПЧ с ШИМ. Если быстродействие САР ограничено, то такой ПЧ можно рассматривать как совокупность трех источников фазных э. д. с., каждый из которых представляет собой безынерционный пропорциональный элемент. Частота среза внутреннего контура САР не должна превышать значения

$$\omega_{с,пред} \approx \frac{\pi}{3} f_м, \qquad (10\text{-}35)$$

где $f_м$ — частота модуляции.

Соотношения между управляющими напряжениями $u_{у,A}$, $u_{у,B}$, $u_{у,C}$ соответствующих фаз (вводимыми из САР) и выходными напряжениями $u_{s,A}$, $u_{s,B}$, $u_{s,C}$ имеют вид

$$u_{s,A} = k_{UF} u_{у,A}; \quad u_{s,B} = k_{UF} u_{у,B}; \quad u_{s,C} = k_{UF} u_{у,C}, \qquad (10\text{-}36)$$

и в осях *1*, *2*

$$u_{s1} = k_{UF} u_{у1}; \quad u_{s2} = k_{UF} u_{у2}, \qquad (10\text{-}37)$$

где k_{UF} — коэффициент усиления по напряжению ПЧ.

5. **Устройство автоматического регулирования** (функциональная схема рис. 10-9) воздействует на вход ПЧ. Управляющие напряжения $u_{у,A}$, $u_{у,B}$, $u_{у,C}$ формируются преобразователем фаз *UPH1*. Входные сигналы этого преобразователя $u_{у,\alpha}$, $u_{у,\beta}$ поступают от преобразователя поворота *UQ1*. На входы преобразователя поворота поступают сигналы от собственно регулирующей части устройства $u_{у,1}$, $u_{у,2}$. Сигналы обратной связи по токам поступают от датчиков тока статора *UA1*—*UA3* (рис. 10-6) на преобразователь фаз *UPH2*. Выходные сигналы этого преобразователя $i_{s,\alpha}$, $i_{s,\beta}$ поступают на преобразователь поворота *UQ2*; сигналы i_{s1}, i_{s2} с выхода преобразователя поворота вводятся в собственно регулирующую часть устройства.

Для управления преобразователями поворота и для формирования сигнала обратной связи по потокосцеплению используются сигналы $\psi_{\delta,\alpha}$, $\psi_{\delta,\beta}$ от измерителей индукции в воздушном зазоре АД, размещенных по осям α_s, β_s. Эти сигналы поступают на входы суммирующих элементов *ACW1*, *ACW2* соответственно. На вторые входы элементов *ACW1*, *ACW2* поступают сигналы $i_{s,\alpha}$, $i_{s,\beta}$ от преобразователя фаз *UPH2*. Суммирующие элементы формируют сигналы $\psi_{r,\alpha}$, $\psi_{r,\beta}$ по соотношению (10-25). Эти сигналы вводятся в векторный анализатор *ACQ*. Здесь формируется сигнал амплитуды вектора $\vec{\psi}_r$

$$\left|\vec{\psi}_r\right| = \psi_{r1} = \sqrt{\psi_{r,\alpha}^2 + \psi_{r,\beta}^2} \qquad (10\text{-}38)$$

и сигналы

$$\sin\varkappa' = \frac{\psi_{r,\beta}}{\psi_{r1}}; \quad \cos\varkappa' = \frac{\psi_{r,\alpha}}{\psi_{r1}}, \qquad (10\text{-}39)$$

которые содержат пульсации, обусловленные зубчатостью статора и ротора, высшими пространственными гармониками магнитного поля. Поэтому они проходят через векторный фильтр *ACL1*; отфильтрованные сигналы $\sin\varkappa$, $\cos\varkappa$ управляют преобразователями поворота. В векторном фильт-

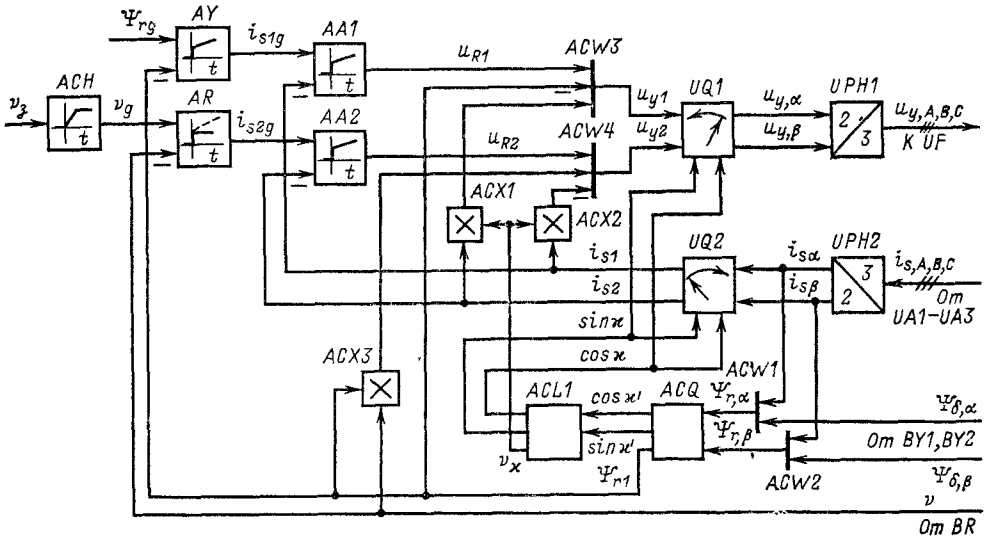


Рис. 10-9. Функциональная схема САР АД.

ре формируется также сигнал v_x, пропорциональный угловой скорости координат *1*, *2*. Этот сигнал используется при формировании компенсирующих обратных связей.

В собственно регулирующей части предусмотрены суммирующие элементы *ACW3*, *ACW4*. На их входы поступают сигналы от регуляторов тока статора *AA1*, *AA2* соответственно и компенсирующие обратные связи.

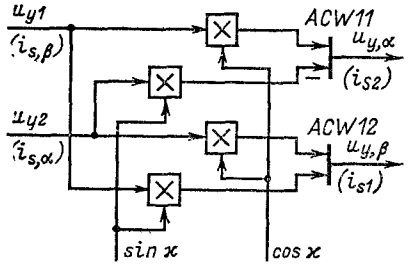


Рис. 10-10. Преобразователь поворота.

Задание на регулятор *AA1* тока i_{s1} поступает от регулятора потокосцепления *AY*. Задание на регулятор *AA2* тока i_{s2} поступает от регулятора частоты вращения *AR*. Задание регулятора частоты вращения поступает через задатчик интенсивности *ACH*.

На схеме показаны компенсирующие обратные связи. В их формировании используются множительные элементы *ACX1*—*ACX3*.

6. **Преобразователи поворота** *UQ1*, *UQ2* осуществляют преобразование координат от осей *1*, *2*, ориентированных по полю, к осям α_s, β_s статора (*UQ1*) и наоборот (*UQ2*). Преобразования выполняются по соотношениям вида (10-5) и (10-4). Каждый преобразователь содержит множительные, суммирующие и инвертирующие элементы (рис. 10-10).

При наладке следует проверить точность преобразования в фиксированных точках при постоянных входных сигналах. Эту операцию лучше проводить вне устройства регулирования. Окончательную проверку преобразователей поворота вместе с преобразователями фаз можно провести в устройстве регулирования при отключенном ПЧ. На входы $u_{y,1}$, $u_{y,2}$ преобразователя *UQ1* подается комбинация сигналов от внешнего регулируемого источника. Связи от датчиков тока на преобразователь фаз *UPH2* отключаются и на входы этого преобразователя подключаются сигналы $u_{y,A}$, $u_{y,B}$, $u_{y,C}$ выхода преобразователя *UPH1*.

На входы $\sin x$, $\cos x$ подаются сигналы от двухфазного генератора стабилизированной амплитуды и регулируемой частоты. В данной системе эти входы подключены к векторному фильтру, который при разомкнутой следящей системе (см. ниже п. 9) как раз является таким генератором. Изменяя частоту генератора во всем диапазоне и чередование фаз, следует проконтролировать чередование фаз сигналов $u_{y,A}$, $u_{y,B}$, $u_{y,C}$, равенство их амплитуд, фазовый сдвиг между ними. Основной является проверка напряжений на выходах i_{s1}, i_{s2} преобразователя *UQ2*. При идеальном функционировании системы преобразования координат эти напряжения должны быть равны соответственно напряжениям $u_{y,1}$ $u_{y,2}$. Погрешность по средним значениям и пульсации сигналов i_{s1}, i_{s2} характеризуют погрешность преобразователей. Проверку следует выполнять при нескольких комбинациях сигналов $u_{y,1}$, $u_{y,2}$. Допустимая погрешность по средним значениям примерно 2,5 % максимального сигнала; допустимая амплитуда пульсаций примерно 5 % максимального сигнала.

7. **Измерители индукции** *BY1*, *BY2* (рис. 10-6) представляют собой элементы Холла, размещенные в зазоре АД по осям α_s, β_s, с усилителями. При наладке следует подстроить передаточные коэффициенты усилите-

лей таким образом, чтобы при питании АД симметричным трехфазным напряжением (от независимого источника или от ПЧ при разомкнутой САР) совпадали амплитуды сигналов $\Psi_{\delta,\alpha}$, $\Psi_{\delta,\beta}$, вводимые в САР. Это можно проделать при наблюдении сигналов на осциллоскопе через фильтр (чтобы на точность настройки не влияли пульсации сигналов).

8. **Векторный анализатор** *ACQ* (рис. 10-9), реализующий соотношения (10-38) и (10-39), содержит квадраторы, нелинейный преобразо-

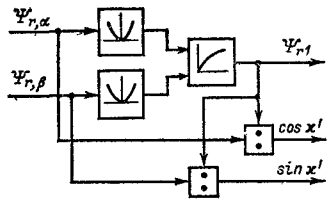


Рис. 10-11. Векторный анализатор.

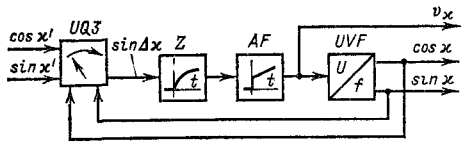


Рис. 10-12. Векторный фильтр.

ватель с зависимостью вида квадратного корня, делительные и суммирующие элементы (рис. 10-11). При наладке следует проверить точность реализации соотношений для нескольких комбинаций входных сигналов.

9. **Векторный фильтр** *ACL1* (рис. 10-12) представляет собой замкнутую следящую систему, содержащую преобразователь напряжение — частота *UVF*, преобразователь поворота *UQ3*, регулятор частоты *AF*, фильтр *Z*.

Преобразователь *UVF* — двухфазный управляемый генератор синусоидальных колебаний стабилизированной амплитуды сигналов $\sin\varkappa$, $\cos\varkappa$. Частота колебаний пропорциональна управляющему напряжению $v_\varkappa$. При изменении полярности управляющего напряжения изменяется чередование фаз на выходе генератора.

Преобразователь поворота *UQ3* формирует сигнал

$$\sin\Delta\varkappa = \sin(\varkappa - \varkappa') = \sin\varkappa\cos\varkappa' - \cos\varkappa\sin\varkappa'. \qquad (10\text{-}40)$$

Этот сигнал вводится в качестве отрицательной обратной связи на регулятор частоты *AF* через фильтр *Z*.

ПИ-регулятор частоты стремится поддерживать $\Delta\varkappa=0$. Выбором быстродействия замкнутого контура регулирования можно обеспечить фильтрацию пульсаций, которые содержатся в исходных сигналах $\sin\varkappa'$, $\cos\varkappa'$. Выходное напряжение регулятора $v_\varkappa$, пропорциональное скорости изменения угла $\varkappa$, используется в САР как сигнал угловой скорости системы координат. Сигналы $\sin\varkappa$, $\cos\varkappa$ управляют преобразователями поворота *UQ1*, *UQ2* (рис. 10-9).

Структурная схема следящей системы представлена на рис. 10-13. Быстродействие системы определяется выбором постоянной времени $T_\varkappa$ фильтра *Z*. Из условий симметричного оптимума передаточная функция регулятора должна иметь вид

$$H_{RF}(p) = \frac{T_{VF}(1+4T_\varkappa p)}{8T_\varkappa^2 p}. \qquad (10\text{-}41)$$

Во время наладки следует проверить преобразователь *UVF* при разомкнутой следящей системе: равенство амплитуд выходных сигналов, чередование фаз, фазовый сдвиг, незави-

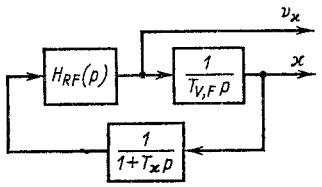


Рис. 10-13. Структурная схема следящей системы векторного фильтра.

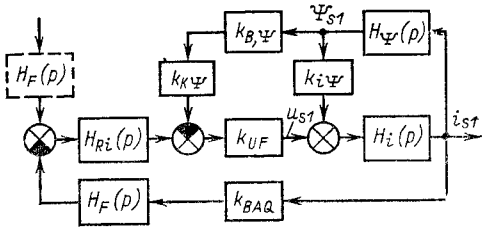


Рис. 10-14. Структурная схема контура регулирования тока i_{s1}.

симость амплитуды от частоты, постоянную времени T_{VF}. Затем от внешнего регулируемого источника вводится комбинация сигналов $\sin\varkappa'$, $\cos\varkappa'$, замыкается следящая система, проверяется равенство сигналов в установившемся режиме

$$\sin\varkappa = \sin\varkappa'; \quad \cos\varkappa = \cos\varkappa'.$$

Желательно проконтролировать переходную характеристику замкнутой системы, подавая на вход регулятора малый прямоугольный сигнал и наблюдая сигнал на выходе фильтра *Z*. Она должна соответствовать стандартной переходной характеристике САР по симметричному оптимуму (см. разд. 8).

10. **Контуры регулирования токов**. На рис. 10-14 показана структурная схема контура регулирования тока i_{s1} при нулевой угловой скорости системы координат *1*, *2*; такая же структурная схема справедлива и в общем случае, но при идеальной компенсации внутренних перекрестных связей АД между контурами токов i_{s1}, i_{s2}.

Апериодическое звено объекта регулирования с передаточной функцией $H_i(p)$ по

(10-32) охвачено внутренней положительной обратной связью через звено с передаточной функцией $H_{\psi}(p)$ по (10-33) и пропорциональное звено с передаточным коэффициентом

$$k_{i,\psi}=\frac{x_m}{x_r^2}\,r_r. \qquad (10\text{-}42)$$

Эта внутренняя обратная связь АД компенсируется в регулирующей части отрицательной обратной связью по потокосцеплению ψ_{r1}. Передаточный коэффициент обратной связи должен быть

$$k_{\text{к,п}}=\frac{k_{i,\psi}}{k_{\text{в},\psi}\,k_{UF}}. \qquad (10\text{-}43)$$

Частотно-регулируемый АД обычно имеет малое сопротивление ротора r_r, при этом компенсирующая связь по потокосцеплению довольно слабая.

Звено с передаточной функцией

$$H_F(p)=\frac{1}{1+T_F p} \qquad (10\text{-}44)$$

соответствует фильтру в цепи обратной связи по току i_{s1}. Постоянная времени фильтра не должна быть меньше

$$T_{F,min}=\frac{1}{2\omega_{\text{с,пред}}}.$$

Передаточная функция регулятора, обеспечивающая технический оптимум, должна иметь вид

$$H_{R,i}(p)=\frac{r_{\text{э}}}{k_{BAQ}\,k_{UF}}\,\frac{1+T_{\text{э}}p}{2T_1 p}, \qquad (10\text{-}45)$$

где k_{BAQ} — коэффициент передачи отрицательной обратной связи по току i_{s1}.

Наладку контура регулирования тока i_{s1} целесообразно проводить при остановленном АД и при нулевой угловой скорости системы координат. Для этого можно ввести на вход векторного фильтра вместо сигналов $\sin\varkappa'$, $\cos\varkappa'$ комбинацию постоянных сигналов.

В регуляторе тока *AA1* пропорциональную часть рекомендуется предварительно ослабить по сравнению с расчетом, интегральную часть в работу не вводить. После проверки полярности обратной связи по току i_{s1} следует замкнуть контур. Для уточнения параметров АД можно снять ЛАЧХ, считая входом исследуемого звена выходное напряжение регулятора *AA1* и выходом — сигнал i_{s1} с преобразователями поворота *UQ2* (рис. 10-9). Нужно установить постоянную составляющую тока i_{s1} примерно такой, которая обеспечивает номинальный основной поток АД.

Передаточная функция звена АД с охватывающей его положительной обратной связью

$$H_i'(p)=\frac{1}{r_s}\,\frac{1+T_r p}{(1+T'p)(1+T''p)}; \qquad (10\text{-}46)$$

ей соответствует асимптотическая ЛАЧХ, показанная на рис. 10-15 (кривая *1*). В эксперименте будет снята ЛАЧХ для передаточной функции $k_{BAQ}/k_{UF}H'_i(p)$. После этого можно постепенно от нуля увеличивать коэффициент компенсирующей связи по потокосцеплению, пока ЛАЧХ не примет вида, показанного на рис. 10-15 (кривая *2*), соответствующего передаточной функции $H_i(p)$. Компенсирующая связь после этого оказывается настроенной. Из ЛАЧХ определяются все параметры, необходимые для настройки регулятора. Настройку следует проверить по виду переходной характеристики замкнутого контура. Если ток i_{s1} контролируется до фильтра, то ступенчатый (прямоугольный) сигнал следует вводить на вход регулятора через дополнительный фильтр (тот фильтр, который показан пунктиром на рис. 10-14, находится уже в другом контуре). При контроле переходной характеристики должна быть установлена примерно такая же постоянная составляющая тока i_{s1}, как при снятии ЛАЧХ, а изменения тока i_{s1} должны быть невелики по сравнению с постоянной составляющей. Следует снять осциллограмму переходной характеристики.

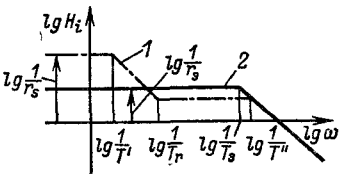


Рис. 10-15. ЛАЧХ для определения параметров АД.

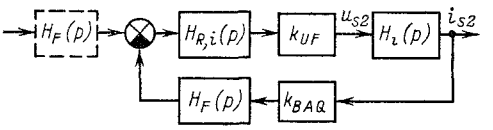


Рис. 10-16. Структурная схема контура регулирования тока i_{s2}.

Для АД с малым сопротивлением ротора разница между ЛАЧХ *1* и *2* (рис. 10-15) невелика. В этом случае компенсирующую связь по потокосцеплению можно не вводить, а параметры для настройки регулятора приближенно определить по кривой *1*: здесь можно считать $T_{\text{э}}\approx T''$, а эквивалентное сопротивление $r_{\text{э}}$ определить по среднечастотной части ЛАЧХ.

Структурная схема контура регулирования тока i_{s2} при идеальной компенсации внутренних связей АД (рис. 10-16) совпадает со схемой контура регулирования тока i_{s1}, поэтому совпадают и передаточные функции регуляторов. При наладке следует установить на регуляторе *AA2* такие же параметры, как на *AA1*.

11. **Контур регулирования потокосцепления.** Структурная схема контура показана на рис. 10-17. Здесь обозначено

$$H_J(p)=\frac{1}{k_{BAQ}\,H_F(p)}\,H_1(p), \qquad (10\text{-}47)$$

где $H_1(p)$ — стандартная передаточная функция замкнутого технически оптимального контура по (10-30). Передаточная функция регулятора потокосцепления должна по условиям

технического оптимума иметь вид

$$H_{R\Psi}(p) = \frac{k_{BAQ}}{k_{B,\Psi}} \frac{1 + T_r p}{4T_1 p}; \qquad (10\text{-}48)$$

это —ПИ-регулятор.

Параметры для настройки регулятора могут быть определены из ЛАЧХ для передаточной функции $H_{\Psi}(p)$; ЛАЧХ эту можно снять в том же эксперименте, что и для передаточной функции $H_i'(p)$ (см. выше п. 10). После наладки регуляторов токов следует проверить полярность обратной связи и замкнуть контур потокосцепления. Настройку регулятора следует проверить по переходной характеристике.

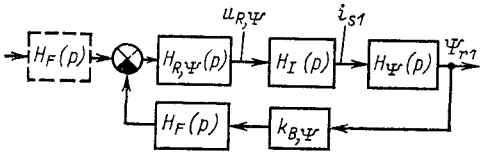


Рис. 10-17. Структурная схема контура регулирования потокосцепления.

Она должна иметь стандартный вид, соответствующий передаточной функции $H_2(p)$ по (10-31). Для контроля переходной характеристики этого контура остаются в силе те же замечания в отношении постоянной составляющей, амплитуды колебаний тока, дополнительного фильтра, что и для контура регулирования тока i_{s1} (см. выше п. 10).

12. **Компенсирующие обратные связи и их наладка**. Здесь речь идет о связях в САР, которые компенсируют внутренние связи АД: перекрестные связи между контурами регулирования токов i_{s1}, i_{s2} — обратная связь по э. д. с. вращения (рис. 10-8). Параметры компенсирующих связей рассчитывают непосредственно исходя из структурной схемы АД. Проверить и уточнить настройку компенсирующей связи, вводимой в контур регулирования тока i_{s1} (рис. 10-9), удобнее всего при изменениях тока i_{s2}, например в пускотормозных режимах. Связь должна быть настроена так, чтобы изменения напряжения регулятора тока u_{R1} были минимальны. Вторая компенсирующая перекрестная связь, вводимая в контур регулирования тока i_{s2}, должна иметь аналогичные параметры. После этого можно проверить настройку компенсации э. д. с. вращения. При правильной настройке этой связи напряжение регулятора тока u_{R2} не должно заметно изменяться в процессе пуска с неизменным моментом.

13. **Контур регулирования частоты вращения** в частотно-регулируемом электроприводе с АД синтезируется и налаживается точно таким же образом, как в системе подчиненного регулирования привода постоянного тока (разд. 8).

После наладки контура регулирования частоты вращения следует снять осциллограммы переходных процессов электропривода при типовых воздействиях: разгоне и торможении при линейном изменении задания скорости v_g, а если есть возможность, то и при скачкообразных изменениях нагрузки на валу АД.

Процессы изменения скорости в этих режимах должны быть близки к стандартным процессам приводов постоянного тока. Помимо скорости следует регистрировать токи i_{s1}, i_{s2}, ток одной из фаз статора, управляющие напряжения ПЧ. Необходимо проверить режимы АД в динамике и их соответствие режимам, указанным в п. 3 (см. выше).

В. НАЛАДКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

10-6. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

1. **Электропривод с регулированием частоты вращения**. По схеме рис. 10-18, аналогичной схеме станции управления ПУ6421, обеспечивается длительная работа привода на трех частотах вращения (в зависимости от положения командоконтроллера *SA*), пуск привода с ускорением, наложение механического тормоза при установке *SA* в нейтральное положение и противовключение двигателя. Сопротивления резисторов *R1*, *R2* и *R3* в роторных цепях двигателя выбирают в зависимости от требований технологии: если основным по технологии является работа привода на пониженных частотах вращения, то значения резисторов определяются требуемыми механическими характеристиками; если по технологии требуется в основном работа на максимальной частоте вращения, то значения резисторов и выдержки времени реле *KT1*, *KT2* выбирают из условий обеспечения необходимых токов переключения. Поверочный расчет резисторов проводят по методике [10-2].

Если привод имеет большие маховые массы (а в основном только для таких электроприводов может быть важным обеспечение минимального времени пуска и реверса), то значения резисторов в роторных цепях и выдержки времени реле ускорения *KT1*, *KT2* можно настраивать, контролируя ток статора по амперметру. При правильном выборе числа ступеней пусковых резисторов и выдержек времени реле ускорения токи при переключениях на всех ступенях будут одинаковыми.

Реле *KV* настраивают так, чтобы оно надежно втягивалось при реверсе с частоты вращения, соответствующей второй ступени ускорения (*KM7* включен, *KM8* отключен), и отпадало при реверсировании в момент остановки двигателя (100 % номинального напряжения ротора). Для облегчения настройки реле служит резистор *R4*.

Реле *KA1*—*KA3* отстраивают от срабатывания при токах пуска и реверса привода.

2. **Электропривод по схеме электрического вала**. Механизмы, имеющие электропривод по схеме электрического вала (упрощенная схема на рис. 10-19), обычно не допускают раздельную работу двигателей. Поэтому для настройки электрического вала двигатели следует отсоединить от механизма. Вначале поочередно проверяют направление вращения обоих двигате-

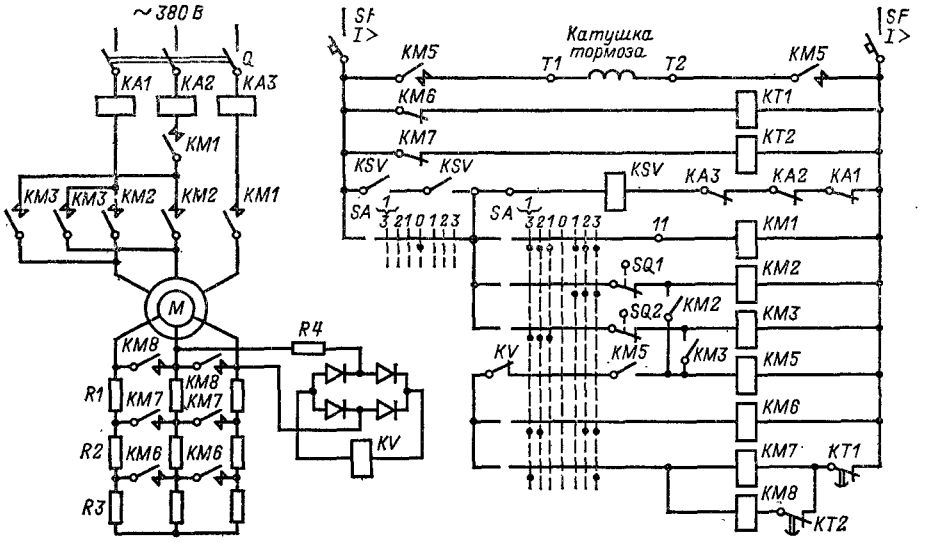


Рис. 10-18. Схема управления реверсивным АД с фазным ротором.

лей при замыкании их роторов на имеющиеся роторные резисторы R, а также проверяют с помощью фазоуказателя чередование фаз в роторе. Направление вращения двигателей и чередование фаз в роторе должны быть одинаковыми. Затем один из двигателей соединяют с механизмом, надежно затормаживают, после

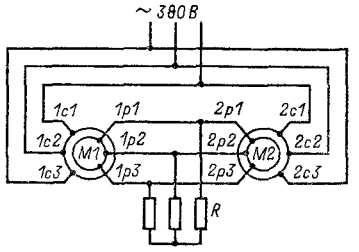


Рис. 10-19. Схема электрического вала на АД с фазным ротором.

чего собирают схему электрического вала. После подачи силового напряжения незаторможенный двигатель, сделав несколько оборотов и качания, установится в определенном положении. В этом положении двигатель соединяют с механизмом, растормаживают первый двигатель и производят опробование электрического вала с механизмом. Прочие наладочные работы на таком электроприводе особенностей не имеют.

10-7. АСИНХРОННЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ КАСКАДЫ

Каскадные электроприводы используются для плавного регулирования частоты вращения, главным образом в сравнительно небольшом диапазоне от 1,3 : 1 до 3 : 1, хотя выпускаемые промышленностью агрегаты позволяют получать диапазон регулирования до 30 : 1.

1. **Состав электропривода** (рис. 10-20). В общем случае асинхронный вентильный каскад (АВК) содержит асинхронный двигатель M с фазным ротором, вводные коммутационные аппараты (на схеме не показаны), реверсивный тиристорный пускатель AC, трехфазный мостовой выпрямитель VS на кремниевых неуправляемых вентилях, сглаживающий дроссель LZ в

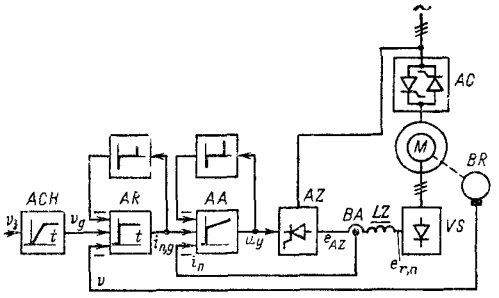


Рис. 10-20. Функциональная схема системы подчиненного регулирования частоты вращения АВК.

цепи постоянного тока, трехфазный мостовой тиристорный инвертор AZ, ведомый сетью, силовой трансформатор (на схеме не показан), связывающий инвертор с сетью, систему управления, устройства защиты и пр. Силовой трансформатор может отсутствовать в АВК, предназначенных для питания от сети 380 В. Тиристоры реверсивного пускателя иногда используются для подачи выпрямленного тока в обмотки статора при торможении.

2. **Функционирование электропривода.** Энергия скольжения через контактные кольца подается на выпрямитель VS, а затем энергия из цепи постоянного тока возвращается инвертором AZ в сеть переменного тока. Таким образом, через преобразователь проходит не вся

мощность, потребляемая асинхронным двигателем, а только мощность скольжения. Эта мощность тем меньше, чем уже диапазон регулирования частоты вращения вниз от номинальной. Коэффициент мощности АВК сравнительно низкий. Он уменьшается по мере уменьшения частоты вращения и момента сопротивления нагрузки. Регулирование частоты вращения основано на том, что при введении про-

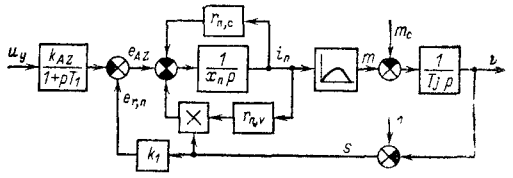


Рис. 10-21. Структурная схема АВК.

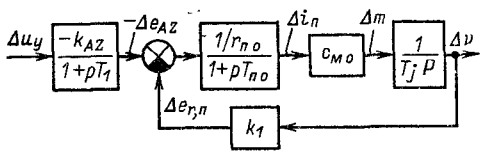


Рис. 10-22. Линеаризованная структурная схема АВК.

тиво-э. д. с. уменьшаются ток ротора и электромагнитный момент. Под действием момента нагрузки частота вращения уменьшается и растет э. д. с. ротора. Это приводит к росту тока ротора и электромагнитного момента до тех пор, пока не установится равновесие $m = m_c$ при меньшей частоте вращения. Уменьшение противо-э. д. с. приводит к увеличению частоты вращения.

3. **АВК как объект регулирования.** Свойства электропривода с замкнутой САР определяются главным образом процессами в цепи выпрямленного тока. Электромагнитными переходными процессами АД пренебрегают, что не препятствует реализации высокого быстродействия. В цепи выпрямленного тока учитываются только гладкие составляющие э. д. с. выпрямителя и инвертора.

При указанных, а также некоторых дополнительных допущениях [10-5] АВК как объект регулирования может быть представлен структурной схемой рис. 10-21. Здесь учтены эквивалентная индуктивность по (10-16) и эквивалентное активное сопротивление цепи выпрямленного тока. Эквивалентное активное сопротивление по (10-18) имеет постоянную составляющую и составляющую, пропорциональную скольжению. При изменении скольжения от номинального до $s=1$ эквивалентное активное сопротивление возрастает в 2—5 раз.

Электромагнитный момент АД нелинейно зависит от выпрямленного тока по (10-29), что отражено нелинейным элементом на структурной схеме.

При синтезе систем автоматического управления АВК пользуются линеаризованной структурной схемой (рис. 10-22). Линеаризация производится в окрестностях рабочей точки с координатами s_0, $i_{п0}$. Цепь выпрямленного тока представляется апериодическим звеном с параметрами

$$r_{п0} = r_{п.с} + s_0 r_{п.р}; \quad T_{п0} = \frac{x_п}{\Omega_б r_{п0}}. \qquad (10\text{-}49)$$

Приращение электромагнитного момента двигателя полагается пропорциональным приращению выпрямленного тока

$$\Delta m = c_{м0} \Delta i_п. \qquad (10\text{-}50)$$

Линеаризация выражения (10-50) позволяет найти из (10-29) для первой рабочей области роторного выпрямителя ($\gamma_в \leqslant \pi/3$)

$$c_{м0} = \frac{1}{\nu_s}\left(\frac{x_m}{x_s} u_s - \frac{\pi}{3} x'_r i_{п0}\right); \qquad (10\text{-}51)$$

для второй рабочей области ($\gamma_в > \pi/3$; большие токи)

$$c_{м0} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1}{\nu_s} \times \times \frac{\left(\frac{x_m}{x_s} u_s\right)^2 - 2\left(\frac{\pi}{3} x'_r i_{п0}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{x_m}{x_s} u_s\right)^2 - \left(\frac{\pi}{3} x'_r i_{п0}\right)^2}} \qquad (10\text{-}52)$$

4. **Система регулирования** [10-5] выполняется двухконтурной (рис. 10-20). Внутренний контур регулирования выпрямленного тока с регулятором *AA* подчинен внешнему контуру регулирования частоты вращения с регулятором *AR*. Задание частоты вращения вводится через задатчик интенсивности *ACH*, обратная связь по току поступает от датчика тока *BA*, по частоте вращения — от тахогенератора *BR*.

При настройке внутреннего контура на технический оптимум применяется ПИ-регулятор тока с передаточной функцией

$$H_{AA}(p) = \frac{1 + T_{п0} p}{2T_1 k_{AZ} p \, 1/r_{п0}}. \qquad (10\text{-}53)$$

Так как $r_{п0}$ и $T_{п0}$ являются функциями скольжения, то характер переходных процессов во внутреннем контуре при фиксированной настройке регулятора тока *AA* также зависит от скольжения. Если регулятор тока настроен на технический оптимум при номинальном скольжении, то во всем диапазоне регулирования перерегулирование по току не превышает 5 %, но с увеличением скольжения уменьшается быстродействие.

Если отношение среднего значения эквивалентной постоянной времени контура выпрямленного тока к T_1 превышает 5—10, то использование регулятора тока с передаточной функцией

$$H_{AA}(p) = \frac{1 + 4T_1 p}{8T_1^2 \frac{k_{AZ}}{r_{п0} T_{п0}} p} \qquad (10\text{-}54)$$

позволяет получить настройку на симметричный оптимум и тем самым существенно уменьшить влияние скольжения на показатели качества переходного процесса.

Контур регулирования частоты вращения выполняется так же, как в приводах постоянного тока, с П- или с ПИ-регулятором *AR*. По-

скольку АВК не развивает тормозного момента, ограничение выхода регулятора *AR* выполняется несимметричным.

5. **Наладка электропривода.** Инвертор *AZ* налаживается по обычным программе и методике наладки нереверсивного тиристорного преобразователя. Проверку нагрузочных режимов инвертора можно провести при его работе как выпрямителя на сглаживающий дроссель. Проверяются функционирование, передаточный коэффициент и полярность выходного сигнала датчика тока. Начальный угол управления тиристоров инвертора устанавливается $\alpha_{нач}=\alpha_{max}$ на уровне 150—160°.

После проверки функционирования регулирующего устройства и настройки защит целесообразно проверить работу электропривода в разомкнутой САР. Для этого должны быть отключены обратные связи, регуляторы переведены в П-режим. Постепенным повышением сигнала задания разгоняют электропривод, проверяют значение и полярность напряжения тахогенератора, полярность обратных связей на входах регуляторов.

Целесообразно далее провести предварительную настройку регулятора тока при заторможенном АД. Наладка проводится так же, как в приводах постоянного тока.

После получения типовых переходных процессов в замкнутом контуре тока следует примерно в 5—10 раз ослабить интегральную часть регулятора (увеличением емкости). Уточнение интегральной части регулятора проводится при расторможенном двигателе. Контур скорости разомкнут, на вход задания регулятора тока подается сигнал, содержащий постоянную составляющую и прямоугольные колебания. Включается регулирующее устройство, привод разгоняется. Постоянная составляющая должна быть выбрана таким образом, чтобы в течение разгона ток оставался непрерывным. Интегральную составляющую подбирают таким образом, чтобы при скорости, близкой к максимальной, переходная характеристика контура соответствовала типовой.

Параметры регулятора частоты вращения подбираются в замкнутой САР при минимальной частоте вращения АД.

10-8. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

1. **Назначение.** Электроприводы средней и большой мощности с асинхронизированными синхронными двигателя (АСД) (используются также термины «машина двойного питания», «управляемая машина переменного тока») предназначены для рабочих машин с очень редкими пусками и реверсами, со сравнительно небольшим диапазоном регулирования скорости (до 1 : 2). Для таких рабочих машин электропривод с АСД является наиболее экономичным регулируемым электроприводом. В пределах рабочего диапазона скоростей электропривод должен обеспечивать:

поддержание заданной скорости с требуемой точностью;

ускорение и замедление с заданным темпом;

высокую кратность максимального момента;

выдачу в сеть необходимой реактивной мощности;

форсированное гашение поля при отключении статора от сети.

2. **Состав.** Электропривод с АСД (рис. 10-23) содержит:

1) асинхронизированный синхронный двигатель *M*, имеющий примерно такую же конструкцию, как асинхронный двигатель с фазным ротором;

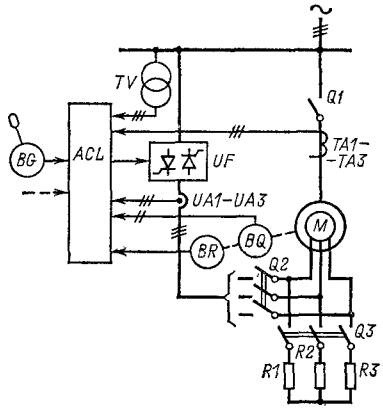


Рис. 10-23. Функциональная схема электропривода с АСД.

2) тиристорный преобразователь частоты *UF*, к которому в рабочих режимах подключен ротор АСД;

3) устройство автоматического регулирования *ACL*;

4) датчик углового положения ротора *BQ*;

5) датчик частоты вращения *BR*;

6) датчики токов фаз ротора *UA1—UA3*;

7) трансформаторы токов фаз статора *TA1—TA3*;

8) трансформатор напряжения *TV* (может быть использован общий трансформатор напряжения секции шин, к которой подключен АСД);

9) ручной задатчик скорости *BG*;

10) пусковые резисторы *R1—R3*;

11) силовые коммутационные аппараты *Q1*, *Q2*, *Q3* (выключатели, контакторы).

3. **Функционирование.** Перед пуском привода включен силовой аппарат *Q3*, преобразователь частоты отключен от ротора (аппарат *Q2* отключен). Пуск производится включением аппарата *Q1* (это обычный асинхронный пуск с резисторами в цепи ротора). При входе АСД в рабочий диапазон скорости к ротору подключается преобразователь частоты *UF* аппаратом *Q2*, пусковые резисторы отключаются. Рабочий диапазон угловой скорости обычно составляет $1-s_{max}<\nu<1+s_{max}$ — от некоторой скорости ниже синхронной до скорости выше синхронной. В этом диапазоне происходит обмен энергией между ротором АСД и питающей сетью. ПЧ позволяет управлять магнитным полем ротора, благодаря этому ток, потребляемый приводом от сети, может быть установлен как отстающим, так и опережающим. Это свойство, общее с СД, отражено в названии двигателя.

Относительно небольшой диапазон скорости объясняется тем, что привод экономичен только при небольшом максимальном скольжении $s_{max} \leqslant 1/3$: в этом случае мала мощность ПЧ, ограничен его частотный диапазон, повышены энергетические показатели.

4. **Тиристорный преобразователь частоты** в электроприводе с АСД должен иметь частотный диапазон $0—s_{max}f_н$; для $f_н=50$ Гц и $s_{max}=1/3$ максимальная частота преобразователя составляет $16^2/_3$ Гц. В этом диапазоне может быть использован непосредственный преобразователь частоты (НПЧ), который и применяется в большинстве приводов с АСД.

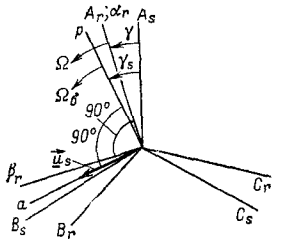


Рис. 10-24. Оси АСД.

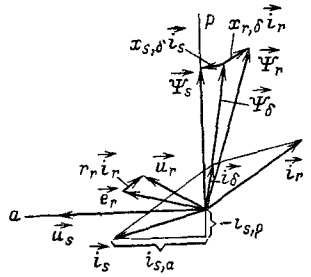


Рис. 10-25. Векторная диаграмма АСД в установившемся режиме.

НПЧ для трехфазного ротора АСД представляет собой совокупность трех реверсивных выпрямителей-инверторов, точно таких же, какие используются в электроприводах постоянного тока. Поскольку АСД является источником реактивной мощности, желательно использовать эту мощность в аварийных режимах питающей сети. Для этого СИФУ и другие устройства тиристорных преобразователей должны быть работоспособны в расширенном диапазоне напряжения собственных нужд аналогично тиристорным возбудителям сетевых СД (см. § 10-10). Если такая возможность обеспечивается по техническим данным тиристорных преобразователей, то она должна быть проверена при наладке (см. § 10-10, п. 4). Во всяком случае, установка защиты минимального напряжения мгновенного действия должна соответствовать зоне работоспособности НПЧ.

5. **АСД как объект автоматического регулирования.** Наряду с обычными допущениями аналитической теории машин переменного тока [10-10] здесь принято, что обобщенный вектор напряжения статора $\vec{u}_s$ вращается с неизменной угловой скоростью $\Omega_б$ (относительная скорость $\nu_s=1$) и имеет неизменное абсолютное значение $u_s=u_{s0}$. Активное сопротивление статора и свободные составляющие статорных потокосцеплений не учитываются.

Анализ проводится в системе координат, образованной ортогональными осями p, a. Ось a совпадает по направлению с вектором $\vec{u}_s$, ось p остает от нее. Проекции $i_{s,a}$, $i_{s,p}$ представляют собой активный и реактивный токи статора.

На рис. 10-24 показаные оси АСД и углы между осями, на рис. 10-25 — векторная диаграмма одного из установившихся режимов.

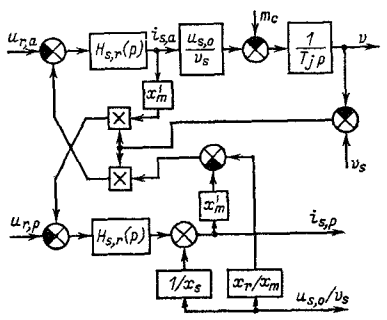


Рис. 10-26. Структурная схема АСД.

Структурная схема АСД при принятых допущениях показана на рис. 10-26. Она содержит два одинаковых апериодических звена с передаточной функцией

$$H_{s,r}(p)=\frac{x_m}{x_s}\,\frac{1}{r_r}\,\frac{1}{1+T'_r p}, \qquad (10\text{-}55)$$

а также интегрирующее звено механического движения. Выходом первого апериодического звена является реактивный ток статора, второго — активный ток статора и пропорциональный ему момент; входами звеньев являются напряжения ротора $u_{r,p}$, $u_{r,a}$.

Между апериодическими звеньями имеются перекрестные обратные связи — э. д. с. скольжения. Эти связи тем сильнее, чем больше по абсолютному значению скольжение.

6. **Система регулирования** (функциональная схема рис. 10-27) имеет подчиненную структуру. Она содержит два внутренних контура — активного и реактивного токов статора. Заданием активного тока является выход регулятора скорости *AR*. Задание реактивного тока формируется так же, как в системе АРВ СД, питаемого от сети (§ 10-10, пп. 10, 14). На функциональной схеме формирование задания реактивного тока не показано и далее не рассматривается.

Регулирование активного и реактивного токов осуществляется ПИ-регуляторами *AAW*, *AAC*. Сигналы обратной связи формируются датчиками активного тока *UAW* и реактивного тока *UAC*. В датчики вводится трехфазная система напряжений, пропорциональных фазным токам статора, от резисторов *R1—R3*, включенных во вторичные цепи трансформаторов тока статора. Кроме того, в каждый датчик вводится трехфазная система напряжений от трансформатора *TV1*; системы напряжений

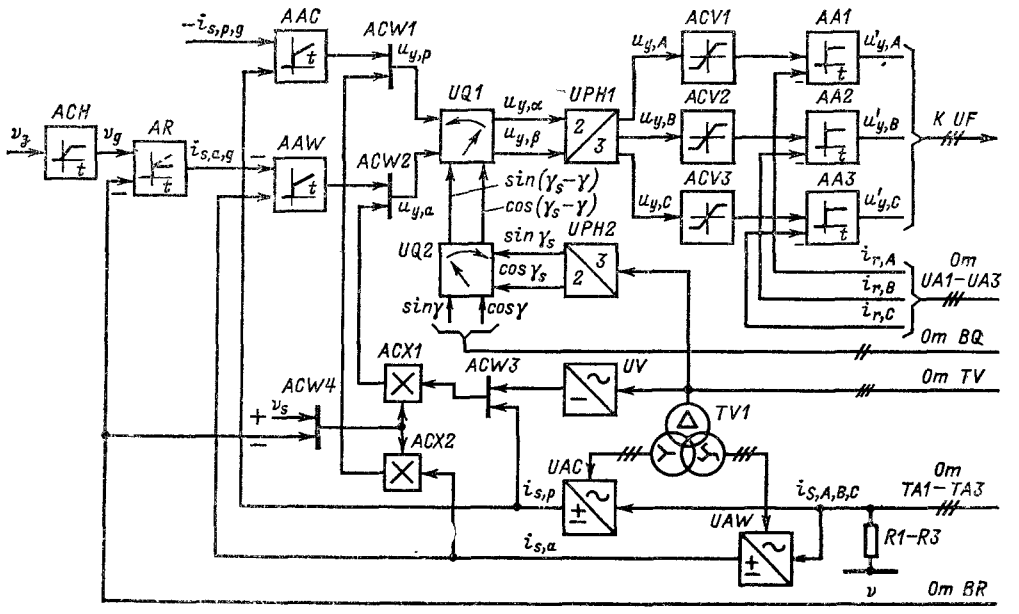


Рис. 10-27. Функциональная схема САР АСД.

двух датчиков имеют взаимный сдвиг 90° (1/4 периода). Трансформатор *TV1* подключен к измерительному трансформатору напряжения *TV* секции шин, от которой питается АСД.

Помимо сигналов задания и основных обратных связей в контуры регулирования активного и реактивного токов вводятся компенсирующие обратные связи. Они подключены к суммирующим элементам *ACW1*, *ACW2* от множительных элементов *ACX1*, *ACX2*. Один из входов элемента *ACX1* подключен к выходу суммирующего элемента *ACW3*, сигнал суммирующего элемента пропорционален

$$\left(\frac{x_r}{x_m}\,\frac{u_{s0}}{\nu_s} - x'_m\, i_{s,p}\right).$$

Для формирования такого сигнала входы суммирующего элемента подключены к датчику напряжения *UV* и к датчику реактивного тока. Один вход множительного элемента *ACX2* подключен к датчику активного тока, сигнал на этом входе пропорционален $x'_m i_{sa}$. Вторые входы множительных элементов подключены к суммирующему элементу *ACW4*, сигнал этого элемента пропорционален величине ν_s—ν. Выходные сигналы суммирующих элементов *ACW1*, *ACW2*: $u_{y,p}$, $u_{y,a}$ представляют собой проекции обобщенного вектора управляющего напряжения $\vec{u}_y$ на оси координат *p*, *a*, вращающиеся синхронно с напряжением сети. Между тем, для управления ПЧ нужны проекции вектора $\vec{u}_y$ на оси ротора A_r, B_r, C_r (рис. 10-24). Переход к этим проекциям осуществляется с помощью преобразователя поворота *UQ1* и преобразователя фаз *UPH1*. Преобразователь *UQ1* осуществляет поворот вектора на угол γ_s—γ. Его выходные сигналы $u_{y,\alpha}$, $u_{y,\beta}$ — проекции вектора $\vec{u}_y$ на оси α_r, β_r выражаются формулами вида (10-5), но для угла γ_s—γ. Преобразователь фаз *UPH1* осуществляет переход от проекций $u_{y,\alpha}$, $u_{y,\beta}$ двухфазной системы к проекциям $u_{y,A}$, $u_{y,B}$, $u_{y,C}$ трехфазной системы. Этот преобразователь реализует соотношения вида (10-3).

Сигналы $\sin(\gamma_s-\gamma)$, $\cos(\gamma_s-\gamma)$ формируются преобразователем поворота *UQ2*. На его входы подаются сигналы от преобразователя фаз *UPH2*, представляющие собой двухфазную систему напряжений, связанных с питающей сетью: $\sin\gamma_s$, $\cos\gamma_s$; кроме того, подаются сигналы $\sin\gamma$, $\cos\gamma$ от датчика углового положения ротора *BQ*.

Преобразователи поворота и преобразователи фаз в САР АСД такие же, как для АД с короткозамкнутым ротором (см. § 10-5), поэтому здесь эти преобразователи и их наладка не рассматриваются.

В ряде вариантов САР вводятся дополнительные обратные связи по фазным токам ротора. Для этой цели предусмотрены суммирующие элементы *AA1*—*AA3*, играющие роль дополнительных регуляторов фазных токов. Отрицательные обратные связи подаются от датчиков токов ротора *UA1*—*UA3*. Входные сигналы регуляторов фазных токов ограничиваются нелинейными элементами *ACV1*—*ACV3*.

Контур регулирования частоты вращения и формирование задания частоты вращения выполняются здесь так же, как в приводах постоянного тока. Отличие лишь в том, что задание скорости изменяется в ограниченной зоне $1-s_{max}<\nu_g<1+s_{max}$. Далее контур частоты вращения специально не рассматривается.

7. **Датчик углового положения ротора (ДП) и его наладка.** Этот датчик формирует сигналы $\sin\gamma$, $\cos\gamma$. Используются как аналого-

вые, так и дискретные датчики углового положения. Аналоговый датчик углового положения в большинстве вариантов действует по принципу синус-косинусного вращающегося трансформатора (с тем же числом полюсов, что АСД). Такой датчик (рис. 10-28) имеет обмотку возбуждения, подключенную к источнику переменного напряжения $u_{оп}$ повышенной частоты, синусоидального или прямоугольного, а также двухфазную измерительную обмотку. Сигналы этой обмотки проходят через два демодулятора *UR1*, *UR2*.

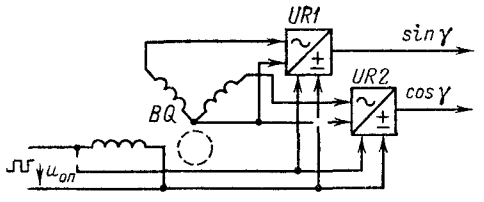


Рис. 10-28. Датчик углового положения ротора.

К ДП предъявляются довольно высокие требования по точности. Допустимая средняя погрешность по углу (точность установки датчика) примерно 1—2°, допустимая инерционность ДП определяется дополнительной погрешностью по углу также примерно 1—2° при максимальной частоте вращения. В пределах периода допустима дополнительная погрешность 2—4°.

Наладка ДП помимо операций по проверке элементов и прохождения сигналов включает следующие операции:

а) проверка чередования фаз ($\sin\gamma$, $\cos\gamma$) при положительном направлении вращения; эту операцию можно проводить при отключенном АСД;

б) проверка точности датчика в пределах одного оборота вала; здесь строятся зависимости сигналов датчика от угла поворота вала и сравниваются с необходимыми, оценивается дополнительная погрешность;

в) сочленение датчика с валом АСД; для выполнения этой операции устанавливают ротор АСД в такое положение, при котором совпадают оси обмоток фаз *A* статора и ротора: в этом положении взаимная индуктивность эквивалентной обмотки *BC* ротора и обмотки *A* статора — нулевая, взаимная индуктивность эквивалентной обмотки *AB* ротора и обмотки *A* статора — положительная; далее с помощью выбора положения сочленения ДП и поворота статора ДП нужно установить выходные сигналы ДП: $\sin\gamma$ — нулевой, $\cos\gamma$ — положительный; после фиксации и сочленения следует проверить погрешность установки датчика.

8. **Наладка дополнительных регуляторов фазных токов ротора.** Задача дополнительных обратных связей по фазным токам — уменьшить влияние неидеальности характеристик тиристорных преобразователей, входящих в ПЧ. Поэтому связь по фазному току должна быть возможно более сильной и регуляторы должны обладать быстродействием, близким к предельному.

Наладку удобнее проводить при остановленном АСД с замкнутым накоротко статором. Рассматривается случай, когда тиристорные преобразователи, входящие в ПЧ, соединены по схеме $\curlyvee$ (по отношению к нагрузке); при анализе можно всегда считать, что и обмотки ротора соединены по схеме $\curlyvee$. Налаживается один из регуляторов, например регулятор фазы *A* (после наладки этого регулятора на остальных устанавливаются аналогичные параметры). Преобразователи других фаз должны быть отключены от цепи нагрузки; следует установить соответствующие перемычки (рис. 10-29).

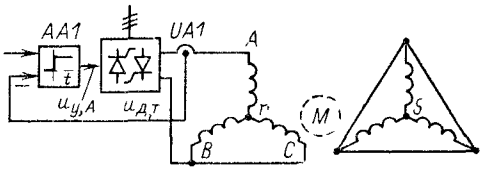


Рис 10-29. Схема эксперимента для определения переходной постоянной времени T_r и наладки дополнительных регуляторов фазных токов.

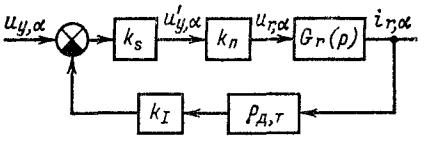


Рис. 10-30. Структурная схема контура дополнительных обратных связей по фазным токам.

Из принятой структурной схемы АСД (рис 10-26) вытекает при $\psi_s=0$, $s=0$ операторное соотношение для тока $i_{r,\alpha}$

$$I_{r,\alpha}(p) = G_r(p)\, U_{r,\alpha}(p), \qquad (10\text{-}56)$$

где проводимость

$$G_r(p) = \frac{1}{r_r}\,\frac{1}{1+T'_r p}. \qquad (10\text{-}57)$$

Это соотношение использовано в структурной схеме для тока $i_{r,\alpha}$, показанной на рис. 10-30 Тиристорный преобразователь здесь идеализирован и представлен пропорциональным звеном с относительным передаточным коэффициентом $k_п$. Как уже указывалось, такое представление правомерно, если частота среза замкнутого контура регулирования не превышает определенного значения; для трехфазного мостового преобразователя, питаемого от сети 50 Гц, предельная частота среза $\omega_{с,пред}\approx$ $\approx$300 рад/с Регулятор фазного тока представлен на структурной схеме звеном с передаточным коэффициентом k_s, датчик тока — с коэффициентом $\rho_{д,т}$, цепь обратной связи — с коэффициентом k_I.

Из условия предельного быстродействия необходимо иметь

$$k_I = \frac{r_r\,\omega_{с,пред}\,T'_r}{\rho_{д,т}\,k_п\,k_s}. \qquad (10\text{-}58)$$

В условиях данного эксперимента

$$i_{r,A} = i_{r,\alpha};\quad u_{r,A} = \frac{3}{2}\,u_{r,\alpha}. \qquad (10\text{-}59)$$

Следует проверить полярность обратной связи по фазному току, установить ослабленный коэффициент обратной связи и замкнуть контур. Затем желательно снять ЛАЧХ; сигнал от генератора при этом подается в качестве задания на регулятор фазного тока, в качестве входного сигнала звена рассматривается напряжение $u_{у,A}$, выходного — напряжение $u_{д,т}$. Снятая ЛАЧХ соответствует передаточной функции

$$H'_A(p) = \frac{2}{3}\,\rho_{д,т}\,k_п\,G_r(p); \qquad (10\text{-}60)$$

из нее можно определить параметры r_r, T'_r.

Далее можно усиливать обратную связь до предельного значения k_I. Следует иметь в виду, что из-за соотношений (10-58), (10-60) при этом значении k_I переходная характеристика (гладкая составляющая) должна иметь вид экспоненты с постоянной времени

$$T'_A \approx \frac{1{,}5}{\omega_{с,пред}}. \qquad (10\text{-}61)$$

При снятии ЛАЧХ и переходной характеристики в сигнале задания должна быть постоянная составляющая такого значения, чтобы ток не реверсировался и, более того, тиристорный преобразователь всегда был в зоне непрерывного тока.

9. **Проверка координатных преобразований** проводится после проверки всех преобразователей поворота и преобразователей фаз в отдельности. Цель данной проверки — убедиться в правильности функционирования этих преобразователей в совокупности. Проверка проводится при отключенном ПЧ, в регуляторах *AAC*, *AAW* должна работать только П-часть. Все операции, кроме специально оговоренных, проводятся при отключенном АСД. Лучше выполнить эти работы до сочленения ДП с валом АСД.

Вначале следует проверить выходные сигналы преобразователя фаз *UPH2*. Выходной сигнал $\cos\gamma_s$ должен совпадать по фазе с линейным напряжением u_{sBC} статора (проверяется по отношению ко вторичным напряжениям измерительного трансформатора напряжения *TV*), сигнал $\sin\gamma_s$ — отставать от него на $^1/_4$ периода.

Далее контролируются осциллоскопом управляющие напряжения ПЧ: $u_{у,A}$, $u_{у,B}$, $u_{у,C}$. ДП устанавливается в положение $\gamma=0$. На вход регулятора реактивного тока *AAC* вводится условно положительный сигнал (для схемы рис. 10-27). Проверяются чередование фаз управляющих напряжений, фазный сдвиг между ними, пропорциональность амплитуды входному сигналу в рабочей зоне. Если полярность выходных напряжений используемого ПЧ (по его характеристике) совпадает с полярностью управляющих напряжений, то напряжение $u_{у,A}$ должно совпадать по фазе с сигналом $\cos\gamma_s$. Затем полезно ввести дополнительно еще один регулируемый сигнал на вход регулятора активного тока *AAW*. При увеличении этого сигнала в условно положительном направлении управляющие напряжения ПЧ должны сдвигаться в сторону опережения.

Дополнительную проверку следует провести при повороте ДП в положительном направлении. Управляющие напряжения при этом должны сдвигаться в сторону опережения.

10. **Датчики реактивного и активного токов** представляют собой трехфазные двухполупериодные демодуляторы. Отличие от соответствующих датчиков, применяемых в устройствах серии КТУ-ВС для сетевых СД (§ 10-10, п. 12), только в числе фаз; нет принципиальных отличий и в методике наладки датчиков. На предварительной стадии кроме датчиков

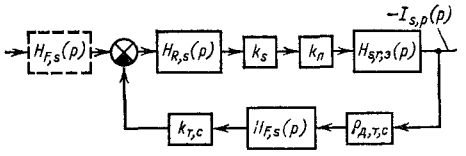


Рис. 10-31. Структурная схема контура регулирования реактивного тока.

нужно проверить трансформатор *TV1* и его фазировку. Работу датчиков следует проверить также при пробном пуске АСД в асинхронном режиме. В этом режиме реактивная и активная составляющие тока статора положительны, и можно проверить полярность и выходные напряжения датчиков.

11. **Контуры регулирования реактивного и активного токов статора и их наладка.** Наиболее простой подход к синтезу регуляторов реактивного и активного токов основан на предположении, что внутренние перекрестные связи АСД идеально компенсируются обратными связями, вводимыми на входы суммирующих элементов *ACW1*, *ACW2* от множительных элементов *ACX1*, *ACX2* (рис. 10-27). В этом случае контуры регулирования реактивного и активного токов автономны и аналогичны. Один из них — для реактивного тока — показан на рис. 10-31. Здесь $\rho_{д,т,с}$ — передаточный коэффициент датчика реактивного тока, $k_{т,с}$ — передаточный коэффициент обратной связи по реактивному току.

Звено с передаточной функцией

$$H_{F,s}(p) = \frac{1}{1+T_1 p} \qquad (10\text{-}62)$$

соответствует фильтру датчика реактивного тока. Постоянную времени T_1 при отсутствии дополнительных обратных связей по фазным токам желательно выбрать из условий предельного быстродействия.

Для шеститактного НПЧ с частотой питания 50 Гц $T_1 \approx 1{,}5$ мс. При наличии дополнительных обратных связей по фазным токам постоянную T_1 увеличивают примерно в 2 раза.

Передаточная функция

$$H_{s,r,э}(p) = \frac{x_m}{x_s}\,\frac{1}{r_{r,э}}\,\frac{1}{1+T'_{r,э}p} \qquad (10\text{-}63)$$

соответствует свойствам АСД при наличии дополнительных регуляторов фазных токов. Параметры $r_{r,э}$, $T'_{r,э}$ выражаются через параметры АСД и контуров регулирования фазных токов

$$r_{r,э} = r_r + k_п k_s k_I \rho_{д,т}; \qquad (10\text{-}64)$$

$$T'_{r,э} = \frac{r_r}{r_{r,э}} T'_r \qquad (10\text{-}65)$$

(если дополнительные связи по фазным токам отсутствуют, то $r_{r,э}=r_r$; $T'_{r,э} = T'_r$).

По условиям технического оптимума передаточная функция регулятора должна иметь вид

$$H_{R,s}(p) = \frac{r_{r,э}}{k_п k_s k_{т,с} \rho_{д,т,э}} \frac{x_s}{x_m} \frac{1 + T'_{r,э} p}{2T_1 p}. \qquad (10\text{-}66)$$

Это ПИ-регулятор; П-часть его передаточной функции не изменяется от наличия дополнительных связей по фазным токам, а И-часть тем больше, чем сильнее эти дополнительные связи.

Параметры регуляторов должны быть уточнены после экспериментального определения параметров АСД (п. 8). Затем следует проверить полярность обратных связей. Это можно сделать при пробном включении АСД в асинхронном режиме. ПЧ должен быть отключен, в регуляторах должна работать только П-часть, задания от входов регуляторов должны быть отсоединены, отсоединены также компенсирующие обратные связи. Вначале подключается обратная связь по активному току на регулятор *AAW*, обратная связь по реактивному току отключена. Напряжения управления должны примерно совпадать по фазе с фазными напряжениями ротора $u_{r,A}$, $u_{r,B}$, $u_{r,C}$ (если выходные напряжения ПЧ однополярны с напряжениями управления); по отношению к линейным напряжениям $u_{r,AB}$, $u_{r,BC}$, $u_{r,CA}$ должно быть отставание примерно на $^1/_{12}$ периода. При подключении только обратной связи по реактивному току напряжения управления должны отставать примерно на $^1/_4$ периода от соответствующих фазных напряжений ротора. В этом эксперименте можно использовать двухлучевой осциллоскоп и потенциальный разделитель напряжения (датчик напряжения) для подключения к цепи ротора.

После этого должны быть проведены подготовительные операции по замыканию контура частоты вращения. Привод должен быть запущен по полной схеме и выведен на частоту вращения, близкую к синхронной. На этой частоте вращения проверяется переходная характеристика контура регулирования реактивного тока. Ступенчатое задание должно вводиться через дополнительный фильтр, показанный пунктиром на структурной схеме контура (рис. 10-31). Переходная характеристика должна иметь стандартный вид, соответствующий передаточной функции (10-30). После подстройки параметров регулятора реактивного тока по виду переходной характеристики аналогичные параметры устанавливаются на регуляторе активного тока, снимается отчетная осциллограмма переходной характеристики контура реактивного тока.

12. **Компенсирующие обратные связи и их наладка.** Эти обратные связи предназначены для компенсации внутренних перекрестных связей АСД между контурами регулирования реактивного и активного токов (рис. 10-26). Идеализированная структурная схема компенсирующих связей показана на рис. 10-32; здесь не учитываются фильтры всех датчиков. Дополнительные обозначения: $k_к$ — передаточный коэффициент от множительного к суммирующему элементу (от *ACX2* к *ACW1*, от *ACX1* к *ACW2*, рис. 10-27); $k_{к,н}$ — передаточный коэффициент от датчика напряжения к суммирующему элементу *ACW3*, $k_{к,т}$ — передаточный коэффициент от датчиков активного и реактивного токов к множительным элементам; $k_{д,н}$ — передаточный коэффициент датчика напряжения; коэффициент $k_{к,\nu}$ выражает напряжения множительных элементов через соответствующие переменные:

$$u_{к,р} = k_{к,\nu}(\nu_s - \nu) k_{к,т} u_{д,т,а},$$
$$u_{к,а} = k_{к,\nu}(\nu_s - \nu)(k_{к,н} u_{д,н} - k_{к,т} u_{д,т,р}). \qquad (10\text{-}67)$$

Фактически этот коэффициент зависит от параметров датчика частоты вращения и связей на множительные элементы. Коэффициенты $k_{к,н}$, $k_{к,\nu}$ выбираются исходя из условий работы множительных элементов; коэффициенты $k_к$, $k_{к,т}$ зависят от параметров САР и АСД и подлежат уточнению при наладке.

В соответствии со структурной схемой АСД (рис. 10-26) для компенсации перекрестных связей должны выполняться условия

$$k_к = \frac{1}{k_п k_s k_{к,н} k_{д,н} k_{к,\nu}}; \qquad (10\text{-}68)$$

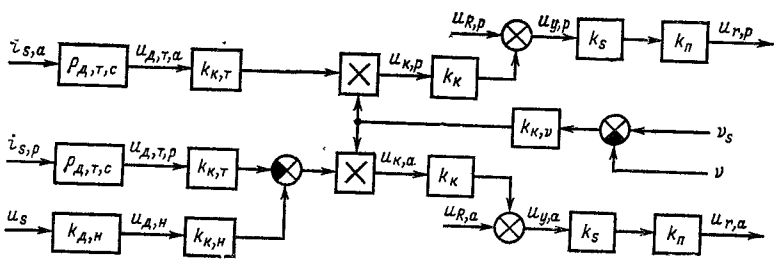


Рис. 10-32. Структурная схема компенсирующих обратных связей.

$$k_{к,т} = \frac{k_{д,н}}{\rho_{д,т,с}} x_m^* .$$

Эти значения должны быть установлены предварительно.

Наладку компенсирующих связей целесообразно проводить в два этапа: вначале при небольшом скольжении (около 10 %), а затем при максимальном скольжении. На х. х. АСД следует установить частоту вращения примерно 90 % синхронной, задание реактивного тока нулевое. Контролируется напряжение $u_{R,а}$ на выходе регулятора активного тока *AAW*. Изменением параметра $k_к$ на входе суммирующего элемента *ACW2* это напряжение нужно свести к нулю. Затем вводится задание реактивного тока, при этом напряжение $u_{R,а}$ сдвигается с нуля; его нужно вернуть на нуль изменением параметра $k_{к,т}$ на входе суммирующего элемента *ACW3*. Аналогичные параметры нужно установить в контуре второй компенсирующей связи. После этого нужно снизить скорость АСД, довсдя скольжение до максимального, и повторить операции.

После наладки компенсирующих связей следует проверить и снять осциллограммы переходных характеристик контура регулирования реактивного тока на скоростях $\nu = 1 - s_{max}$, $\nu = 1 + s_{max}$. Эти характеристики не должны заметно отличаться от стандартных характеристик для передаточной функции (10-30).

13. **Процессы электропривода при изменениях задания скорости и нагрузки.** После наладки контура частоты вращения, которая выполняется так же, как в электроприводах постоянного тока с системами подчиненного регулирования, следует проверить и снять осциллограммы переходных процессов при типовых воздействиях:

а) ускорении и замедлении при линейном изменении задания частоты вращения в полном диапазоне при неизменной нагрузке на валу;

б) при скачкообразных изменениях нагрузки на валу и неизменном задании частоты вращения (если есть возможность создать такой режим); задание реактивного тока в этих процессах должно быть неизменным, лучше выполнить это при нулевом задании реактивного тока.

Следует контролировать и регистрировать как минимум частоту вращения, активный и реактивный токи статора, ток в одной фазе ротора.

Процессы частоты вращения и момента (активного тока) должны быть близки к стандартным процессам электроприводов постоянного тока (при совпадающих параметрах привода и САР). Отклонение реактивного тока от задания в этих процессах должно быть весьма незначительным.

Г. НАЛАДКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

10-9. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЭЛЕКТРОМАШИННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Схемы включения статорных цепей синхронных двигателей аналогичны схемам включения асинхронных двигателей. Особенности наладки приводов с СД зависят в основном от схемы возбуждения двигателей. Наладка привода с глухоподключенным возбудителем является наиболее простой. Кроме обычно выполняемых наладочных работ, оговоренных в § 10-1, должна быть тщательно проверена взаимная полярность обмотки возбуждения *LE* и якоря возбудителя *ME* (полярность должна соответствовать показанной на рис. 10-33). При глухоподключенном возбудителе полярность тока возбуждения СД может быть произвольной, поэтому амперметр в цепи обмотки возбуждения *LM* двигателя должен быть с двусторонней шкалой.

Если возбудитель не связан с валом СД, то перед пуском привода снимают характеристику холостого хода возбудителя и характеристику зависимости тока возбуждения СД от тока возбуждения возбудителя. В случае установки возбудителя на одном валу с СД последнюю характеристику снимают одновременно со снятием U-образной характеристики двигателя.

На рис. 10-33 показана схема электропривода с подачей возбуждения СД в функции тока статора. Перед опробованием такого электропривода должна быть проверена надежность всех соединений в роторной цепи; резистор гашения поля *RFV* должен быть тщательно отревизован, желательно прогрузить его номинальным током.

Реле *KA*, которое дает команду на подачу тока возбуждения СД, настраивают на отпадание при токе, соответствующем скольжению примерно 5 %. Этот ток определяют при

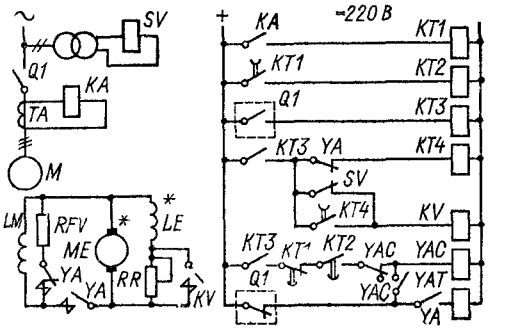


Рис 10-33. Электропривод с СД с подачей возбуждения в функции тока статора.

первом опробовании двигателя без возбуждения.

Уставку реле *KT1*, которое своим размыкающим контактом подает напряжение на катушку включения *YAC* контактора *YA*, принимают 0,5—1 с и корректируют в процессе опробования привода.

Необходимо иметь в виду, что возбуждение двигателя не следует подавать слишком

рано, но нельзя подавать и слишком поздно, так как в последнем случае явнополюсный двигатель может войти в синхронизм и без возбуждения, а после подачи возбуждения может иметь место большой бросок тока из-за переполюсовки ротора.

При реакторном пуске СД возможны два варианта: при легком пуске (до 30 % номинальной нагрузки на валу) реактор шунтируют через 3—4 с после подачи возбуждения; при тяжелом пуске вначале шунтируют реактор, а через 3—4 с после этого подают возбуждение.

Выдержку времени реле *KT2*, защищающего катушку включения *YAC* от перегрева, устанавливают 3—4 с для обеспечения надежной постановки контактора *YA* на защелку. После пуска привода снимают U-образную характеристику СД на холостом ходу (методику снятия характеристики — см. разд. 7). На основании характеристики сверяют полученное значение тока возбуждения СД, при котором на холостом ходу $\cos\varphi=1$, с паспортным.

Ток возбуждения двигателя устанавливают по соотношению

$$i_{f,min,\text{доп}} \approx 1,3\frac{m_{c,max}}{m_{max}} i_{f,\text{н}}, \qquad (10\text{-}69)$$

где $i_{f,\,min,\,\text{доп}}$ — минимально допустимый ток возбуждения; $i_{f,\,\text{н}}$ — номинальный ток возбуждения двигателя по паспорту; $m_{c,max}$ — наибольший возможный момент нагрузки на валу СД; m_{max} — максимально допустимый момент нагрузки по паспорту двигателя.

Если время приложения момента $m_{c,\,max}$ к валу двигателя менее 2с, то ток возбуждения можно выбирать по этому же соотношению, но без коэффициента запаса 1,3.

Если при наибольшей нагрузке на валу СД может быть снята U-образная характеристика, то ток возбуждения устанавливают примерно на 30 % выше, чем ток возбуждения, соответствующий $\cos\varphi=1$ по этой характеристике.

10-10. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ТИРИСТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В современных электроприводах с СД, питаемыми от сети, используются тиристорные устройства возбуждения и регулирования (ТУВР). Применяются ТУВР нескольких серий (ТВУ, ТЕ, КТУ-ВС и др.). Несмотря на схемные и конструктивные отличия, ТУВР разных серий имеют много общего в назначении, составе, функционировании, методике наладки.

1. **Назначение.** ТУВР предназначено для питания обмотки возбуждения СД, автоматического регулирования тока возбуждения в зависимости от режима СД и питающей сети, автоматического управления цепью возбуждения в процессе пуска, а при необходимости также и для динамического торможения СД.

2. **Состав.** ТУВР, как правило, содержит следующие основные части (рис. 10-34):

а) тиристорный возбудитель *ME*, от которого питается обмотка возбуждения синхронного двигателя *M*;

б) трансформатор *T*, через который осуществляется питание силовой цепи возбудителя;

в) устройство *FV* для шунтирования обмотки возбуждения в процессе пуска и для защиты возбудителя от перенапряжений (в частности, при выпадении СД из синхронизма);

г) устройство *ACL* для автоматического регулирования возбуждения (АРВ); это устройство воздействует на вход системы импульсно-фазового управления (СИФУ) возбудителя; на входы устройства вводятся сигналы от датчика тока возбуждения *UAE*, трансформатора тока в цепи статора *TA*, трансформатора напряжения *TV*, подключенного к тем же шинам, что и статор СД.

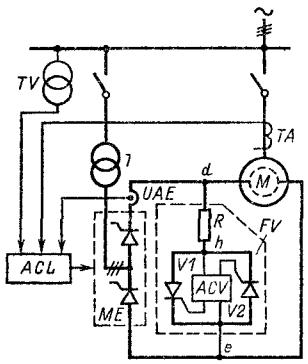


Рис. 10-34. Функциональная схема СД с ТУВР.

3. **Функционирование ТУВР.** Перед пуском СД ТУВР подготовлено к работе, но управляющие импульсы на тиристоры не проходят.

Во время пуска обмотка возбуждения СД замкнута на шунтирующее устройство *FV*.

При повышении частоты вращения СД до подсинхронной подается возбуждение — управляющие импульсы пропускаются на тиристоры возбудителя. ТУВР обеспечивает ток возбуждения, необходимый для втягивания СД в синхронизм. Происходит втягивание в синхронизм. Шунтирующее устройство размыкается. С выдержкой времени после подачи возбуждения АРВ включается по полной схеме, СД переходит в нормальный рабочий режим. ТУВР обеспечивает автоматическое регулирование тока возбуждения СД в зависимости от режима СД и сети.

При отключении СД от сети происходит интенсивное гашение поля за счет перехода возбудителя *ME* в инверторный режим. Если предусмотрено динамическое торможение СД, то в этом режиме ТУВР также обеспечивает необходимый ток возбуждения.

В режимах синхронизации, гашения поля, динамического торможения система АРВ либо полностью разомкнута (на вход СИФУ возбудителя подается соответствующее напряжение), либо замкнут только контур регулирования тока возбуждения и на его вход введено соответствующее неизменное задание (последний вариант использован, например, в ТУВР серии КТУ-ВС).

С выдержкой времени после отключения СД от сети или после окончания динамического торможения ТУВР возвращается в исходное состояние.

4. Тиристорный возбудитель и особенности его наладки. Возбудитель *ME* — это тиристорный выпрямитель-инвертор по трехфазной мостовой или трехфазной нулевой схеме, снабженный СИФУ, устройствами защиты и сигнализации и т. д. Опорное напряжение СИФУ должно поступать от того же источника, к которому подключен трансформатор *T*.

По сравнению с обычными тиристорными преобразователями к возбудителю СД предъявляется дополнительное требование — надежная работа в расширенном диапазоне напряжения собственных нужд и опорного напряжения [примерно $(0{,}5 \div 1{,}1)U_н$]. Дело в том, что СД должен нормально работать, и даже с форсировкой возбуждения; при кратковременном глубоком понижении напряжения сети вплоть до отключения защитой минимального напряжения (уставка $0{,}65U_н$) должна обеспечиваться также работа СД при кратковременных повышениях напряжения в сети.

Соответственно этому при наладке следует дополнительно проверить функционирование СИФУ и других устройств возбудителя во всем диапазоне напряжения собственных нужд и опорного напряжения. Эту проверку целесообразно проводить при отключенном питании силовой цепи. В крайних режимах необходимо проверить наличие управляющих импульсов во всем диапазоне напряжения управления $u_у$, диапазон изменения угла α, параметры управляющих импульсов (напряжение, ток, длительность) всех тиристоров.

В тиристорных возбудителях СД с короткими управляющими импульсами, как и в аналогичных возбудителях машин постоянного тока, предусматривается дополнительная шунтирующая *R*- или *RC*-ветвь для подхвата тиристоров. Эта ветвь необходима из-за большой электромагнитной инерции обмотки возбуждения. В процессе наладки такого возбудителя следует обеспечить надежность и плавность нарастания тока возбуждения от нуля при изменении управляющего напряжения $u_у$.

5. Устройство шунтирования обмотки возбуждения и его наладка. Шунтирование обмотки возбуждения в процессе пуска или при превышении допустимого напряжения осуществляется через резистор *R* открытием одного из тиристоров *V1*, *V2*. Эти тиристоры управляются от блока *ACV* в функции напряжения u_{he} (рис. 10-34). Тиристор *V1* отпирается при $u_{he} > u_{ср}$, тиристор *V2* — при $u_{he} < -u_{ср}$, где $u_{ср}$ — напряжение сравнения. Возможны две основные разновидности блока *ACV*: с неизменным или с изменяемым напряжением сравнения.

В первом варианте (рис. 10-35, *а*) напряжение сравнения приходится выбрать таким образом, чтобы в рабочих режимах тиристоры *V1*, *V2* не открывались на уровне примерно $1{,}5u_{f,max}$, где $u_{f,max}$ — максимально возможное мгновенное напряжение возбудителя. Но при этом в пусковом режиме при малых скольжениях возможно появление пауз в токе обмотки возбуждения, что приводит к уменьшению асинхронного момента СД и затрудняет вхождение в синхронизм. Во втором варианте (рис. 10-35, *б*) этот недостаток устранен, поскольку напряжение сравнения в пусковом режиме может быть уменьшено во много раз (в примере схемы — замыканием контакта реле *K*).

После подачи возбуждения тиристоры *V1*, *V2* должны закрыться. У большинства приводов для этого не нужны специальные меры. Если привод пускается без нагрузки, то после подачи возбуждения и до полного включения АВР устанавливается ток возбуждения, близкий к току возбуждения х. х. i_{f0}.

При обычных параметрах СД и принятых кратностях форсировки напряжения угол управления тиристоров возбудителя в этом режи-

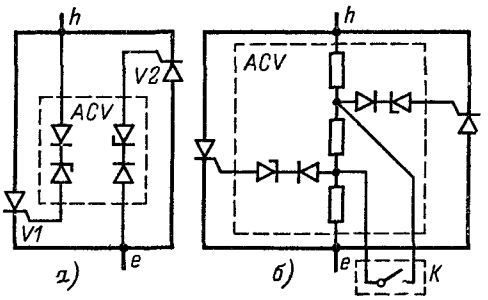


Рис. 10-35. Схемы шунтирующего устройства.

Рис. 10-36. Выходное напряжение ТВ в режиме синхронизации.

ме $\alpha_x > 75°$, чему соответствует напряжение возбудителя, показанное на рис. 10-36. В кривой напряжения имеются интервалы, в которых напряжение отрицательно; в таком интервале тиристор *V1* закроется, даже если он был открыт до подачи возбуждения.

Для более тяжелых случаев, а также для повышения надежности ТУВР необходимы специальные меры закрывания тиристора *V1*. Например, в ТУВР серии ТВУ предусмотрен режим с кратковременным периодическим увеличением угла управления. Этот режим продолжается до закрытия шунтирующего устройства, что контролируется дополнительным датчиком тока.

При наладке шунтирующего устройства необходимо проверить и при необходимости настроить напряжения открывания тиристоров *V1*, *V2*. Эту операцию можно проделать при подключении независимого регулирующего маломощного источника через добавочный резистор к зажимам *d*, *e* шунтирующего устройства (шунтирующее устройство при этом должно быть отсоединено от возбудителя и обмотки возбуждения СД).

Одной из задач наладки является уточнение необходимого сопротивления резистора *R*. Это может быть проделано по данным пуска СД. Пробный пуск лучше проводить при отсоединенном возбудителе. Если максимальное напряжение на обмотке возбуждения СД во время пуска превысит допустимый уровень (как указывалось, примерно $1{,}5u_{f,max}$),

то сопротивление резистора следует уменьшить.

Далее при пуске по полной схеме следует проверить закрывание тиристоров шунтирующего устройства.

6. **Требования к АРВ:**

а) обеспечивать повышение статической и динамической устойчивости СД;

б) обеспечивать наиболее экономичный режим СД, смежных электроприемников узла нагрузки и питающей сети за счет снижения

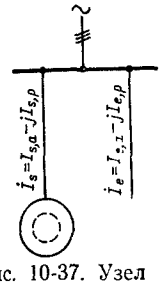


Рис. 10-37. Узел нагрузки.

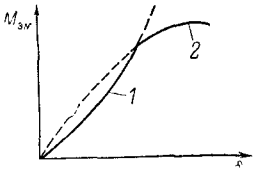


Рис. 10-38. Угловая характеристика СД. $1-I_{s,p}=\text{const}$; $2-i_f=i_{f,max}$

потерь энергии и повышения стабильности напряжения;

в) *при глубоких посадках напряжения* в узле нагрузки (ниже $0{,}85u_{s,н}$) обеспечивать форсировку возбуждения [ток возбуждения при форсировке должен составлять $(1{,}4\div1{,}8)\,i_{f,н}$];

г) по возможности демпфировать качания активной мощности СД.

7. **Оптимальные режимы СД с АРВ.** Анализ условий работы СД в узле нагрузки (рис. 10-37) показывает, что в каждый момент времени СД должен работать с оптимальным реактивным током статора

$$i_{s,p,опт}=i_{p,c}+g\,(u_s-u_{s,н})-ki_{ep},+i_{s,p,дин}, \qquad (10\text{-}70)$$

где $i_{e,p}$ — реактивный ток смежных электроприемников; g, k — коэффициенты, зависящие от параметров СД и смежных электроприемников; $i_{s,p,дин}$ — составляющая реактивного тока СД, *необходимая для демпфирования качаний ротора в переходных процессах*. Следовательно, в установившихся режимах СД должен *работать с реактивным током*, который определяется режимом питающей сети и не зависит от нагрузки на валу СД.

Такое регулирование удовлетворяет также требованию повышения перегрузочной способности СД. На рис. 10-38 показан вид угловой характеристики СД при реактивном токе статора, не зависящем от момента $M_{эм}$, и при ограничении тока возбуждения на уровне $i_{f,max}$. Максимальный момент СД при таком регулировании совпадает с максимальным моментом нерегулируемого СД при токе возбуждения $i_{f,max}$. Когда реактивный ток смежных электроприемников не измеряется, можно обеспечить регулирование, близкое к оптимальному, изменяя реактивный ток СД в функции напряжения узла нагрузки.

8. **СД, питаемый от сети, как объект автоматического регулирования.** Используется система координат, образованная ортогональными осями d, q; ось d — это продольная ось ротора (ось обмотки возбуждения), ось q опережает ее. Ось d соответствует оси ξ (рис. 10-1), ось q — оси η. Для анализа процессов СД обычно используют уравнения Парка—Горева [10-1] при дополнительных допущениях: не учитывают активное сопротивление статора и свободные составляющие статорных потокосцеплений. На этой основе построена линеаризованная структурная схема СД как объекта регулирования (рис. 10-39) для малых отклонений переменных. Управляющим сигналом здесь является отклонение напряжения возбуждения Δu_f, выходными переменными электромагнитных контуров — отклонения активного и реактивного токов статора $\Delta i_{s,a}$, $\Delta i_{s,p}$, возмущениями — отклонения момента нагрузки Δm_c и напряжения статора Δu_s.

Значения переменных в выбранном режиме линеаризации обозначены $\delta_0, i_{s,p0}$ и т. д. Передаточные функции звеньев на схеме

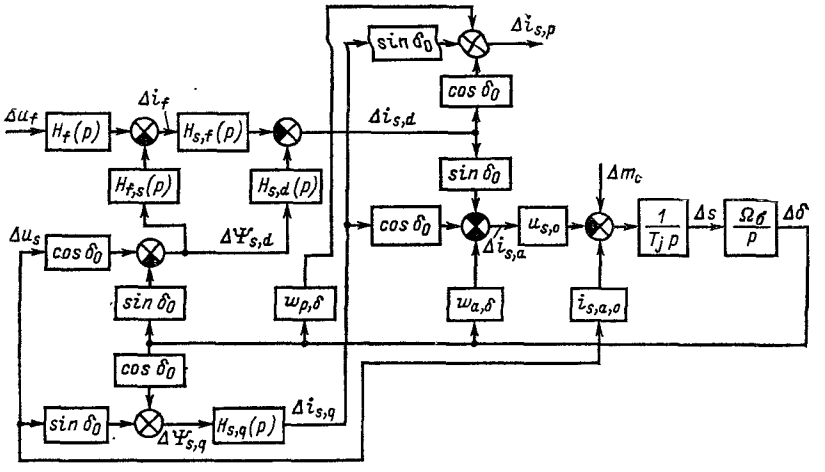


Рис. 10-39. Линеаризованная структурная схема СД, питаемого от сети.

$$H_f(p) = \frac{\Delta I_f(p)}{\Delta U_f(p)} =$$

$$= \frac{1}{r_f} \frac{1 + T'_{c,d} p}{\left(1 + T'_d p\right)\left(1 + T''_d p\right)}; \quad (10\text{-}71)$$

$$H_{s,d}(p) = \frac{\Delta I_{s,d}(p)}{\Delta \psi_{s,d}(p)} = \frac{1}{x_{s,d}} \frac{1 + T_{c,d} p}{1 + T'_{c,d} p}; \quad (10\text{-}72)$$

$$H_{s,q}(p) = \frac{\Delta I_{s,q}(p)}{\Delta \psi_{s,q}(p)} = \frac{1}{x_{s,q}} \frac{1 + T_{c,q} p}{1 + T'_{c,q} p}; \quad (10\text{-}73)$$

$$H_{f,s}(p) = -\frac{\Delta I_f(p)}{\Delta \psi_{s,d}(p)} =$$

$$= \frac{x_{m,d}}{x_{s,d}} \frac{1 + T_{c,d,\sigma} p}{\left(1 + T'_d p\right)\left(1 + T''_d p\right)}; \quad (10\text{-}74)$$

$$H_{s,f}(p) = -\frac{\Delta I_{s,d}(p)}{\Delta I_f(p)} =$$

$$= \frac{x_{m,d}}{x_{s,d}} \frac{1 + T_{c,d,\sigma} p}{1 + T'_{c,d} p}; \quad (10\text{-}75)$$

$$w_{a,\delta} = i_{s,d0} \cos \delta_0 + i_{s,q0} \sin \delta_0,$$

$$w_{p,\delta} = -i_{s,d0} \sin \delta_0 + i_{s,q0} \cos \delta_0. \quad (10\text{-}76)$$

Анализ структурной схемы показывает, что при увеличении нагрузки чувствительность реактивного тока к управляющему сигналу падает, а чувствительность активного тока — возрастает. Объект регулирования в большинстве режимов колебательный, слабодемпфированный; без специальных мер переходные процессы сопровождаются колебаниями угла δ и активного тока (рис. 10-40); эти колебания низкочастотные (0,5—5 Гц).

9. **Режимы СД без АРВ** также выявляют свойства его как объекта регулирования. При набросе нагрузки на валу (рис. 10-40) в обмотке возбуждения наводится дополнительный ток, который затем затухает примерно с постоянной времени T''_d.

Благодаря этому перегрузочная способность СД для кратковременных нагрузок значительно выше, чем статическая.

При снижении напряжения в узле нагрузки реактивный ток СД уменьшается (увеличивается опережающий ток $-i_{s,p}$), что качественно соответствует оптимальным условиям. При внезапном снижении напряжения сети (рис. 10-41) в обмотке возбуждения наводится дополнительный ток; благодаря этому еще увеличивается опережающий реактивный ток $-i_{s,p}$; со временем наведенный ток возбуждения затухает.

Таким образом, естественная реакция СД на возмущения является благоприятной, и от АРВ требуется поддержать и усилить эти положительные качества СД.

10. **Система АРВ с подчиненной структурой** рассматривается здесь в таком виде, как она реализована в ТУВР серии КТУ-ВС. В этой системе (рис. 10-42) предусмотрены три подчиненных контура регулирования: внутренний контур — тока возбуждения, следующий контур — реактивного тока статора и внешний контур — напряжения.

Напряжение управления поступает на вход тиристорного возбудителя от регулятора тока возбуждения *AAE*. Отрицательная обратная связь вводится на этот регулятор от датчика тока возбуждения *UAE* через фильтр *Z1*. В режимах вхождения в синхронизм и динамического торможения регулятор *AAE* работает с постоянными заданиями.

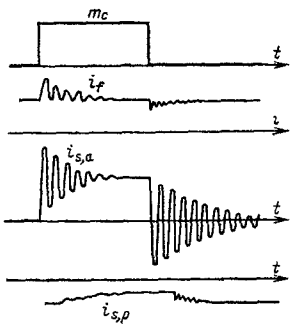


Рис. 10-40. Процессы СД при скачкообразных изменениях нагрузки.

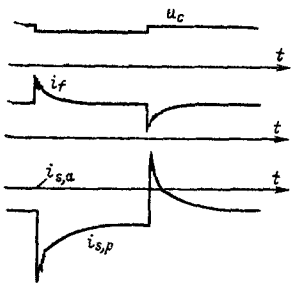


Рис. 10-41. Процессы СД при скачкообразных изменениях напряжения сети.

В рабочем режиме задание тока возбуждения поступает от регулятора реактивного тока *AAC*. Сигнал обратной связи по реактивному току формируется датчиком реактивного тока *UAC*; на входы датчика подключены напряжение резистора *R1*, включенного во вторичную цепь трансформатора тока статора СД, и напряжение от трансформатора *TV1*; этот трансформатор питается от трансформатора напряжения *TV*, подключенного с СД к общим шинам. Выходное напряжение регулятора *AAC* ограничивается с помощью нелинейного элемента *ACV1*; благодаря этому ограничиваются пределы изменения тока возбуждения СД.

Задание реактивного тока поступает через ограничивающий нелинейный элемент *ACV2* от регулятора напряжения *AV*. Обратная связь по напряжению подается от датчика напряжения *UV*. На вход датчика напряжения подключено напряжение от трансформатора напряжения *TV1*.

На вход элемента *ACV2* может быть подан дополнительный сигнал, пропорциональный реактивному току индуктивных электроприемников узла нагрузки. Для его измерения исполь-

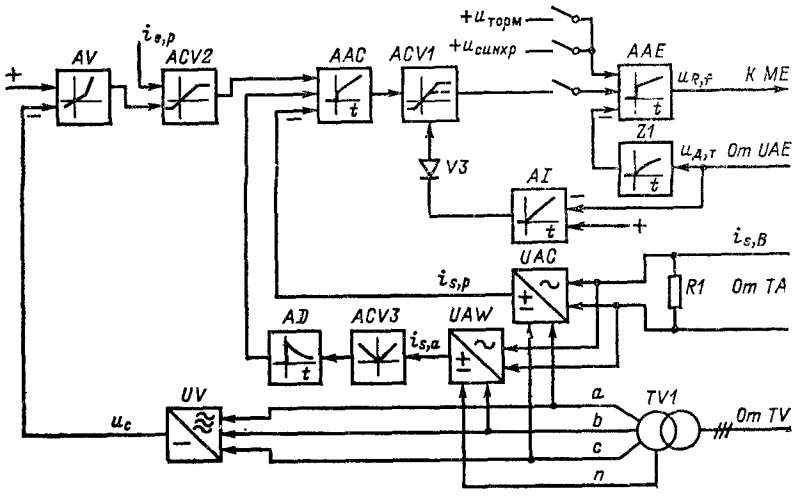


Рис. 10-42. Функциональная схема системы АРВ.

зуется дополнительное устройство; к выходу этого устройства подключаются системы АРВ всех СД, питаемых от общих шин (такое устройство может поставляться комплектно с одним или несколькими ТУВР серии КТУ-ВС).

Для демпфирования качаний активной

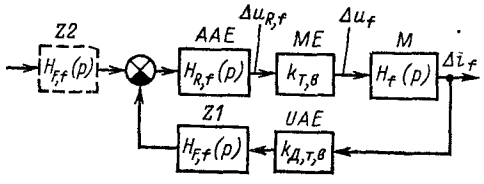


Рис. 10-43. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения.

мощности используется гибкая обратная связь по активному току. Эта связь подается от датчика активного тока *UAW* через нелинейный элемент *ACV3* и дифференцирующий регулятор *AD*. На входы датчика активного тока подключены напряжение резистора *RI* и напряжение от трансформатора *TV1*.

Защита СД от длительной перегрузки осуществляется интегральным ограничителем тока возбуждения *AI*, который воздействует на систему АРВ через диод *V3*. В устройствах КТУ-ВС воздействие осуществляется на нелинейный элемент *ACV1* — под действием ограничителя снижается верхний уровень ограничения тока возбуждения.

11. **Контур регулирования тока возбуждения.** Этот контур должен поддерживать ток возбуждения на заданном уровне в режимах синхронизации и динамического торможения СД, а в рабочих режимах обеспечивать ограничение тока возбуждения снизу и сверху.

Структурная схема контура показана на рис. 10-43. Передаточная функция СД в этом контуре определяется (10-71); внутренние связи по углу δ и по напряжению статора, влияющие на этот контур, не учитываются. Тиристорный возбудитель представлен как линейное безынерционное звено; такое представление справедливо, если статическая характеристика «вход—выход» возбудителя в рабочей зоне линейна, в контуре имеется фильтр с постоянной времени не менее 1,5 мс (для шеститактного тиристорного преобразователя) и контур настроен по техническому оптимуму.

Чтобы обеспечить стандартную передаточную функцию замкнутого контура по техническому оптимуму (10-30) для СД с наиболее распространенными параметрами ($T''_d < 0{,}01$ с), можно рекомендовать следующий выбор передаточных функций регулятора и фильтров:

$$H_{R,f}(p) = \frac{1 + T'_d p}{2k_{т,в}\, k_{д,т,в}\, T''_d p}; \qquad (10\text{-}77)$$

$$H_{F,f}(p) = \frac{1}{1 + T'_{c,d} p}.$$

При таком выборе постоянная времени, характеризующая быстродействие контура, равна сверхпереходной постоянной времени СД $T_1 = T''_d$.

Регулятор тока возбуждения по (10-77) — ПИ. Нужно отметить, что при характерных параметрах СД интегральная часть передаточной функции регулятора оказывает очень малое влияние на статические и динамические характеристики системы; в этих случаях интегральная часть может быть исключена.

Наладку контура можно проводить при отключенном СД со статором, замкнутым накоротко. Для уточнения параметров СД желательно снять ЛАЧХ цепи возбуждения. Лучше, чтобы при эксперименте контур регулирования был замкнут, регулятор *AAE* включен как пропорциональный с малым передаточным коэффициентом. Напряжение от генератора можно вводить на один из входов задания регулятора *AAE*, в качестве входного сигнала измерять напряжение регулятора $u_{R,f}$, в каче-

стве выходного — напряжение датчика тока возбуждения $u_{д,т}$.

По результатам эксперимента следует построить асимптотическую ЛАЧХ; ее вид соответствует рис. 10-44. Как и для цепи возбуждения машины постоянного тока, точное построение асимптотической ЛАЧХ по реальной затруднено, но высокая точность здесь не требуется. По характерным точкам асимптотической ЛАЧХ, как показано на рис. 10-44, определяются параметры СД: T'_d, T''_d, $T'_{c,d}$ и необходимые параметры регулятора и фильтров. Эти параметры могут быть реализованы выбором соответствующих элементов схемы, а затем проверены по переходным характеристикам фильтра и регулятора.

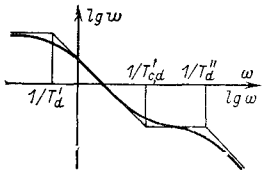


Рис. 10-44. ЛАЧХ цепи возбуждения СД.

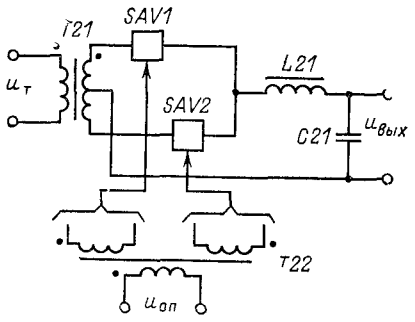


Рис. 10-45. Датчик реактивного (активного) тока.

С установленными параметрами контур следует замкнуть, проверить переходную характеристику замкнутого контура (она должна иметь стандартный вид, см. разд. 8), при необходимости подстроить параметры регулятора, снять отчетную осциллограмму.

В реальной системе АРВ фильтр *Z2*, показанный на рис. 10-43, как отдельный элемент отсутствует. Его передаточная функция входит в передаточную функцию для следующего контура регулирования — реактивного тока. Поэтому для получения переходной характеристики стандартного вида следует подавать задание через дополнительный фильтр, вводимый только для этого эксперимента.

Без фильтра *Z2* передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения имеет вид

$$H_f(p) = \frac{1}{k_{д,т,в}}\left(1 + T'_{c,d}\,p\right) H_1(p). \qquad (10\text{-}78)$$

Отсутствие фильтра *Z2* в реальной схеме приводит к появлению перерегулирования в токе возбуждения при быстром выходе на ограничение; это явление может иметь место при внезапном понижении напряжения в сети. Однако перерегулирование невелико (около 25 % при характерных параметрах СД), нужно лишь так согласовать уровень ограничения тока и отключаемый ток возбудителя, чтобы при перерегулировании не происходило отключения.

12. **Датчики активного и реактивного токов.** Каждый из этих датчиков представляет собой демодулятор. В ТУВР серии КТУ-ВС в качестве датчиков составляющих тока статора использован элемент ДМ2. Он представляет собой однофазный двухполупериодный демодулятор с фильтром. Схема элемента показана на рис. 10-45. В элемент вводится опорное напряжение $u_{оп}$ и напряжение из токовой цепи

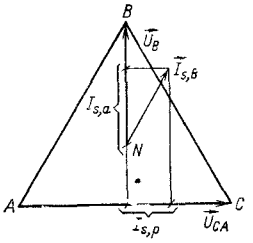


Рис. 10-46. Векторная диаграмма для датчиков реактивного и активного токов.

$u_т = R_т i$, синусоидальные переменные одной частоты (50 Гц)

$$u_{оп} = U_{оп,m} \sin \Omega t;$$
$$u_т = R_т I_m \sin(\Omega t + \chi); \qquad (10\text{-}79)$$

постоянная составляющая выходного напряжения

$$U_{вых} = k_{д,м} R_т I_m \cos\chi. \qquad (10\text{-}80)$$

пропорциональна проекции вектора тока $\dot{\mathbf{I}}$ на направление вектора опорного напряжения $\dot{\mathbf{U}}_{оп}$.

На датчики активного и реактивного токов напряжение $u_т$ подается с резистора *R1*, включенного во вторичную цепь трансформатора тока фазы *B* статора СД. Опорное напряжение для датчика активного тока пропорционально фазному напряжению $u_{s,B}$ статора СД, а для датчика реактивного тока — линейному напряжению $u_{s,CA}$. Как следует из (10-80) и векторной диаграммы рис. 10-46, выходные напряжения демодуляторов (постоянные составляющие) пропорциональны соответственно активной и реактивной составляющим тока статора.

Выходное напряжение демодулятора содержит гармоники; в элементе ДМ2 гармоники с номерами, кратными 2—100 Гц и выше. Гармоники подавляются фильтром. В элементе ДМ2 использован *LC*-фильтр. С учетом фильтров выходные напряжения датчиков (в отн. ед.) в операторной форме имеют вид

$$U_{д,а,т}(p) = k_{д,т,с} H_{F,s}(p) I_{s,а}(p);$$
$$U_{д,р,т}(p) = k_{д,т,с} H_{F,s}(p) I_{s,р}(p). \qquad (10\text{-}81)$$

Передаточная функция фильтра

$$H_{F,s}(p) = \frac{1}{1 + 2\zeta_{F,s} T_{F,s} p + T^2_{F,s} p^2}. \qquad (10\text{-}82)$$

При наладке рекомендуется снять статические характеристики датчика. Эксперимент может быть проведен по схеме рис. 10-47. Сопротивление резистора *R11* должно быть равно сопротивлению резистора *R1* в схеме АРВ (рис. 10-42). Датчик должен быть нагружен на такую же нагрузку, как в схеме АРВ.

Достаточно ограничиться тремя характеристиками: а) $\chi=0°$, 180°; б) $\chi=45°$, $\chi=-135°$; в) $\chi=\pm 90°$. Здесь указаны углы χ, входящие в (10-79) для двух ветвей характеристики с

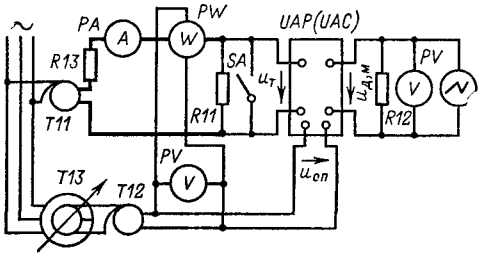


Рис. 10-47. Схема эксперимента для проверки датчиков реактивного и активного токов.

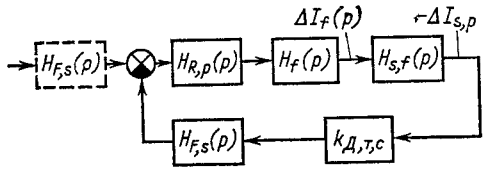


Рис. 10-48. Структурная схема контура регулирования реактивного тока.

противоположной полярностью выходного напряжения.

Измеряются опорное напряжение $U_{оп}$, ток I, мощность P, постоянная составляющая выходного напряжения $U_{д,м}$, амплитуда пульсаций выходного напряжения $U_{д,м,п,т}$. Проверяются линейность характеристики, отклонение выходного напряжения от расчетного значения $U_{д,м}=KP$. Желательно также определить динамические параметры фильтра. Это можно проделать по виду переходного процесса на выходе при размыкании контакта *SA*, шунтирующего резистора *R11*, путем сопоставления с переходными характеристиками колебательных звеньев 2-го порядка.

13. **Контур регулирования реактивного тока и его наладка.** Для синтеза и настройки контура определяющим является режим х. х. СД ($\delta=0$). Структурная схема контура для этого режима линеаризации показана на рис. 10-48 (при равенстве входных коэффициентов регулятора ААЕ). Синтез передаточной функции регулятора может быть выполнен с использованием метода суммирования малых постоянных времени (разд. 8). Передаточная функция регулятора должна иметь вид

$$H_{R,р}(p)=\frac{x_{s.d}}{x_{m.d}}\,\frac{k_{Д,т,в}}{k_{Д,т,с}}\,\frac{1+2\zeta_{F.s}T_{F.s}p}{4T_2p}, \qquad (10\text{-}83)$$

где

$$T_2=T_1-T_{c,d,\sigma}. \qquad (10\text{-}84)$$

Это ПИ-регулятор. При таком выборе передаточной функции регулятора переходная характеристика замкнутого контура мало отличается от характеристики контура с передаточной функцией

$$H_р(p)=\frac{1}{k_{Д,т,с}}H_2(p), \qquad (10\text{-}85)$$

где $H_2(p)$ — стандартная передаточная функция по (10-31).

Фильтр на входе задания, показанный на рис. 10-48 пунктиром, как отдельный элемент в реальной схеме отсутствует (он входит, например, в датчик реактивного тока смежных электроприемников). Поэтому при экспериментах со скачкообразными заданиями желательно ввести такой фильтр дополнительно на время эксперимента. Можно ограничиться апериодическим фильтром с постоянной времени $2\zeta_{Fs}T_{Fs}$.

При наладке следует прежде всего проверить векторную диаграмму напряжений, подаваемых на датчик реактивного тока, полярность обратной связи по реактивному току. Это лучше всего проделать на х. х. СД, работающего с замкнутым контуром регулирования тока возбуждения при разомкнутом контуре регулирования реактивного тока. Затем следует проверить постоянную времени *RC*-цепи в обратной связи регулятора. По данной методике эта постоянная должна соответствовать параметрам фильтра датчика (10-83).

После этих подготовительных операций можно на х. х. СД замкнуть контур, проверить и подстроить (сопротивлением резистора, через который обратная связь по реактивному току вводится в регулятор) вид переходной характеристики, снять отчетную осциллограмму переходной характеристики. Далее следует проверить работу контура при изменениях нагрузки на валу СД. Если СД работает с резкопеременной нагрузкой, то следует снять осциллограмму процессов СД при работе с замкнутым контуром реактивного тока. Если нагрузка СД в течение длительных интервалов времени остается неизменной, то желательно снять осциллограмму процессов СД при неизменной нагрузке на валу и малых скачкообразных изменениях задания реактивного тока.

14. **Контур регулирования напряжения и его наладка.** Сигнал обратной связи в этом контуре формируется датчиком напряжения, который представляет собой трехфазный мостовой диодный выпрямитель с фильтром.

В требуемой зависимости задания реактивного тока от напряжения (рис. 10-49) можно выделить две зоны: зону рабочих напряжений со слабым наклоном характеристики и зону аварийно пониженных напряжений с сильным наклоном. Такая зависимость реализуется нелинейным элементом в регуляторе напряжения *AV* (рис. 10-42).

Наклон характеристики в рабочей зоне определяется условиями оптимального регулирования (п. 7), однако наклон характеристики регулятора не должен быть ниже наклона естественной характеристики СД при постоянстве тока возбуждения

$$\Delta i_{s,р}=\frac{1}{x_{s,d}}\Delta u_s. \qquad (10\text{-}86)$$

Наклон в аварийной зоне определяется требованием, чтобы при снижении напряжения примерно от 0,95 до $0{,}85u_{s,н}$ ток возбуждения нарастал до потолочного значения $i_{f,max}$. Напряжение в узле нагрузки зависит от реактивного тока СД

$$\Delta u_c \approx -x_c \Delta i_{s,p}, \qquad (10\text{-}87)$$

поэтому контур напряжения — действительно замкнутый контур автоматического регулирования. Структурная схема контура (при равен-

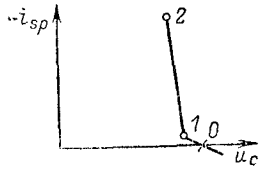


Рис. 10-49. Вид требуемой зависимости реактивного тока от напряжения в узле нагрузки.

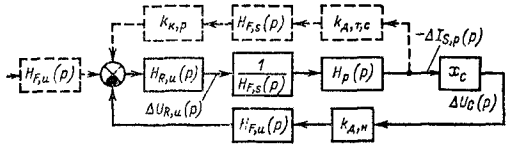


Рис. 10-50. Структурная схема контура регулирования напряжения.

стве входных коэффициентов на регуляторе *ААС*) показана на рис. 10-50.

Если принять пропорциональный регулятор напряжения (как это выполнено в ТУВР серии КТУ-ВС).

$$H_{R,u}(p) = k_{R,u}, \qquad (10\text{-}88)$$

то тогда целесообразно реализовать фильтр в цепи обратной связи по напряжению с такой же передаточной функцией, как в цепи обратной связи по реактивному току,

$$H_{F,u}(p) = H_{F,s}(p). \qquad (10\text{-}89)$$

При этом передаточный коэффициент регулятора напряжения ограничен по качеству переходных процессов величиной

$$k_{R,u,max} \approx \frac{1}{2}\frac{k_{д,т,с}}{k_{д,н}}\frac{1}{x_c}. \qquad (10\text{-}90)$$

Такой коэффициент регулятор должен иметь в зоне аварийно пониженных напряжений.

Для СД большой мощности относительное сопротивление сети довольно велико (до $x_c \approx \approx 0{,}1$); в этих случаях передаточный коэффициент (10-90) недостаточен для реализации характеристики рис. 10-49 в зоне аварийно пониженных напряжений.

Наиболее радикальной мерой, снимающей ограничение крутизны зависимости реактивного тока от напряжения и одновременно обеспечивающей стандартный характер переходных процессов в контуре напряжения, является введение компенсирующей положительной обратной связи по реактивному току от датчика реактивного тока на вход регулятора напряжения. Эта связь показана пунктиром на структурной схеме рис. 10-50. Передаточный коэффициент этой связи

$$k_{к,р} = \frac{k_{д,н}}{k_{д,т,с}} x_c; \qquad (10\text{-}91)$$

напряжение регулятора *AV*

$$u_{R,u} = \varphi(u_\Sigma); \quad u_\Sigma = u_{д,н} + k_{к,р} u_{д,р}; \qquad (10\text{-}92)$$

максимально допустимый передаточный коэффициент регулятора напряжения

$$k_{R,u,max} = \frac{k_{д,т,с}}{k_{д,н}}\frac{1}{x_c} = \frac{1}{k_{к,р}}. \qquad (10\text{-}93)$$

При таком коэффициенте крутизна зависимости реактивного тока от напряжения была бы бесконечной. Однако реализовать такой коэффициент не следует (ухудшаются условия работы СД при кратковременных перерывах питания), нужно лишь реализовать требуемую зависимость $-i_{s,p}=f(u_c)$, показанную на рис. 10-49. Для этого точки характеристики регулятора (10-92) должны быть связаны с точками требуемой характеристики рис. 10-49 соотношениями

$$u_{\Sigma n} = k_{д,н} u_{c,n} + k_{к,р} k_{д,т,с}(-i_{s,p,n});$$
$$u_{R,u,n} = k_{д,т,с}(-i_{s,p,n}), \qquad (10\text{-}94)$$

где $n=0, 1, 2$.

Результирующая обратная связь по реактивному току, приведенная ко входу регулятора *ААС*, при наличии компенсирующей связи не изменяется от изменения передаточного коэффициента регулятора *AV*, она остается такой же, как без регулятора *AV*. Благодаря этому обеспечивается стандартный характер переходных процессов.

При наладке контура регулирования напряжения следует проверить датчик напряжения: изоляцию цепей, передаточный коэффициент при напряжениях $(0{,}5 \div 1{,}15)u_{s,н}$; установить необходимые параметры фильтра в цепи обратной связи по напряжению, настроить по точкам характеристику регулятора напряжения. Эти операции выполняются вне ТУВР. Затем при работающем ТУВР с разомкнутым контуром напряжения проверяется полярность обратной связи по напряжению. После этого можно замкнуть контур. Желательно проверить вид переходной характеристики на х. х. СД.

15. **Демпфирование качаний.** Колебания угла δ и активной мощности СД, возникающие при быстрых изменениях нагрузки на валу (п. 9) или активной мощности смежных электроприемников, — неблагоприятное явление. Из-за них увеличиваются потери энергии в СД, питающей сети и смежных электроприемниках, снижается надежность СД и смежных электроприемников.

Один из методов демпфирования колебаний — гибкая связь по активному току, который использован в ТУВР серии КТУ-ВС. На рис. 10-51, *а* представлена упрощенная структурная схема СД при демпфировании качаний за счет связи по активному току; здесь не учитывается поперечный демпферный контур ротора, регулятор реактивного тока предпола-

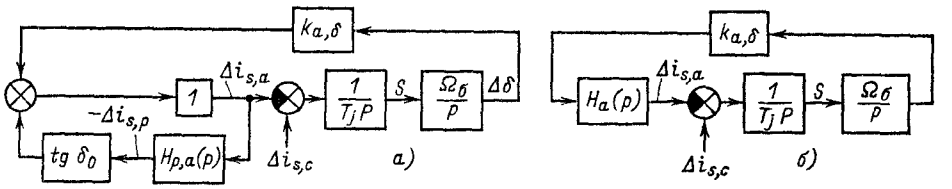


Рис. 10-51. Структурная схема СД с демпфированием качаний за счет гибкой связи по активному току.

гается идеальным, напряжение сети неизменным. Обозначено

$$k_{a,\delta} = \left(\frac{u_s}{x_{s,q}} - i_{s,p0}\right)\frac{1}{\cos^2\delta_0}; \qquad (10\text{-}95)$$

$$H_{p,a}(p) = \frac{\Delta I_{s,p}(p)}{\Delta I_{s,a}(p)} \qquad (10\text{-}96)$$

— передаточная функция замкнутого контура регулирования реактивного тока вместе с цепью обратной связи по активному току.

Если эта передаточная функция имеет вид

$$H_{p,a}(p) = \frac{1}{tg\,\delta_0}\,\frac{T_{a1}p}{1+T_{a2}p}, \quad T_{a1} < T_{a2}, \qquad (10\text{-}97)$$

то в преобразованной структурной схеме (рис. 10-51, *б*) передаточная функция

$$H_a(p) = \frac{1+T_{a2}p}{1+T_{a3}p}; \quad T_{a3} = T_{a2} - T_{a1}. \qquad (10\text{-}98)$$

Целесообразно выбрать

$$T_{a2} = \sqrt{2\frac{k_{a,\delta}T_j}{\Omega_б}}; \quad T_{a3} = \frac{1}{4}T_{a2}; \quad T_{a1} = \frac{3}{4}T_{a2}; \qquad (10\text{-}99)$$

тогда передаточная функция разомкнутого контура структурной схемы рис. 10-51, *б*

$$H_\delta(p) = \frac{1+4T_{a3}p}{8T_{a3}^2p^2}, \qquad (10\text{-}100)$$

что соответствует условиям симметричного оптимума.

При идеальном регуляторе реактивного тока передаточная функция дифференцирующего регулятора *AD* (рис. 10-42) должна совпадать с $H_{p,a}(p)$. Самый грубый учет неидеальности регулятора *AAC* приводит к передаточной функции

$$H_{R,D}(p) = \frac{1}{tg\,\delta_0}\,\frac{T_{a1}p}{1+(T_{a2}-2T_2)p}; \quad (T_{a2}-2T_2) > T_1, \qquad (10\text{-}101)$$

где T_2 — постоянная времени в передаточной функции замкнутого контура регулирования реактивного тока. Параметры передаточной функции (10-101) существенно зависят от режима линеаризации. Целесообразно выбрать их для некоторого усредненного режима ($\delta_0 \approx \approx 30°$).

В целом гибкая связь по активному току является недостаточно эффективным средством демпфирования качаний. Причины этого: а) при отличии режима от расчетного условия оптимального демпфирования перестают выполняться; б) сами условия демпфирования относятся к малым отклонениям.

При больших отклонениях из-за нелинейности объекта регулирования и главным образом из-за ограниченного напряжения возбудителя эти условия уже не обеспечивают удовлетворительного демпфирования, и наоборот, если обеспечить демпфирование больших качаний, система оказывается неустойчивой в малом.

Настройка гибкой обратной связи по активному току в реальных условиях оказывается весьма критичной — заметное демпфирование начинает проявляться вблизи границы автоколебаний.

Перед наладкой демпфирования следует установить расчетные параметры регулятора *AD*. Затем ввести демпфирующую связь и попытаться подстроить параметры этого регулятора по виду процессов при быстрых изменениях нагрузки СД. В приводах со спокойной нагрузкой можно наблюдать процессы нагруженного СД при скачкообразных изменениях задания реактивного тока. Самое важное убедиться, что ни в одном из режимов демпфирующая связь не вызывает автоколебаний.

16. **Наладка защиты от перегрузки по току возбуждения** сводится к проверке прохождения сигналов, настройке заданного уровня тока возбуждения и постоянной интегрирования. Необходимые настройки можно выполнить до пробного пуска, при остановленном СД, после замыкания контура регулирования тока возбуждения. Увеличивая ток возбуждения, следует отметить значение тока при котором интегратор *AI* (рис. 10-42) сойдет с ограничения, это и будет заданный уровень тока возбуждения. Он должен составлять примерно 1,1 $i_{f,н}$. Постоянная интегрирования настраивается таким образом, чтобы при кратности максимального тока возбуждения $i_{f,max}/i_{f,н} = 1{,}8$ время от включения максимального тока до начала снижения тока возбуждения составляло примерно 25 с (при меньшей кратности тока время соответственно увеличится). Этим с запасом перекрывается время работы защиты от понижения напряжения, и вместе с тем СД надежно защищается от перегрева.

10-11. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Это регулируемые электроприводы средней и большой мощности с высокими энергетическими показателями [10-6]. Можно выделить две группы приводов: 1) тихоходные с широким диапазоном регулирования частоты вращения; 2) быстроходные со сравнительно нешироким диапазоном частоты вращения и плавным режимом работы.

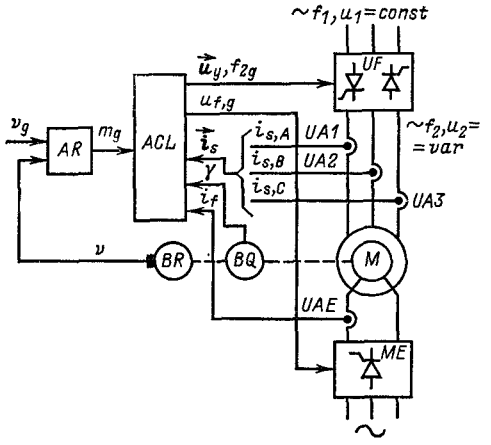


Рис. 10-52. Обобщенная функциональная схема электропривода с частотно-управляемым синхронным двигателем.

Обобщенная функциональная схема электропривода показана на рис. 10-52. Статор двигателя *M* питается от преобразователя частоты *UF* с непосредственной связью (НПЧ) или со звеном постоянного тока и зависимым инвертором тока. Обмотка возбуждения двигателя питается от тиристорного возбудителя *ME*. На валу двигателя установлен датчик углового положения ротора *BQ*, сигнал с выхода которого подан на вход блока регулирования момента двигателя *ACL* и через него определяет частоту и фазу токов, протекающих в обмотках статора синхронного двигателя СД. На вход *ACL* в качестве сигналов обратной связи поданы также сигналы, пропорциональные токам статора и ротора СД. Заданное значение момента двигателя формируется регулятором частоты вращения *AR*, на вход которого поданы сигналы заданного ν_g и фактического ν значений частоты вращения ротора СД. Последний сигнал поступает с выхода измерителя частоты вращения двигателя-тахогенератора. Управление напряжениями и токами статора осуществляется в функции углового положения ротора по принципу вентильного двигателя. Поэтому в таких электроприводах невозможен асинхронный режим: в любом установившемся режиме угловые скорости ротора и поля статора совпадают.

Устройство *ACL* без регулятора частоты вращения обеспечивает идеально мягкую механическую характеристику привода, как и регулятор тока в приводах постоянного тока с подчиненным регулированием.

1. **Тихоходные электроприводы.** Эти электроприводы выполняются на основе НПЧ, обеспечивающего быстродействующее управление мгновенными фазными напряжениями. Частота может регулироваться от нуля до 16—20 Гц. При необходимости могут быть обеспечены высокая перегрузочная способность, качественное регулирование скорости, частые реверсы.

СД как объект автоматического регулирования. Используется система координат, образованная осями *d*, *q* ротора, ось *d* соответствует оси ξ (рис. 10-1), ось *q* — оси η. Рассматривается СД без демпферной клетки с шихтованным магнитопроводом. При обычных допущениях аналитической теории синхронной машины [10-10] получена структурная схема СД как объекта регулирования (рис. 10-53).

В этой структурной схеме имеются три апериодических звена, на входы которых как управляющие воздействия поступают продольное $u_{s,d}$ и поперечное $u_{s,q}$ напряжения статора и напряжение возбуждения u_f, на выходах образуются токи $i_{s,d}$, $i_{s,q}$ и потокосцепление ψ_f. Между апериодическими звеньями и интегральным звеном с постоянной T_j имеются суммирующие и множительные элемен-

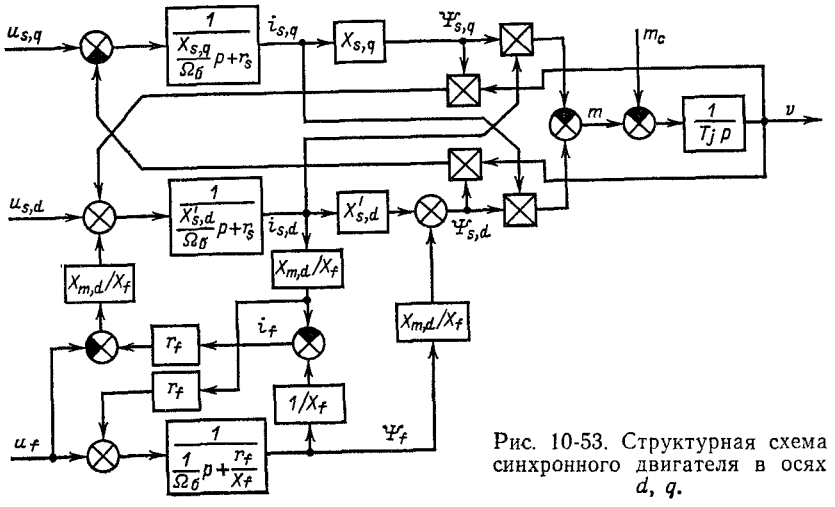


Рис. 10-53. Структурная схема синхронного двигателя в осях *d*, *q*.

ты, показывающие образование момента двигателя. Показаны также внутренние обратные связи по э. д. с. вращения: с напряжением $u_{s,q}$ суммируется э. д. с. — $\nu\psi_{s,d}$, с напряжением $u_{s,d}$ суммируется э. д. с. $\nu\psi_{s,q}$.

Электромагнитные цепи статора СД по продольной оси (цепи продольной реакции якоря) являются магнитосвязанными с цепями ротора (трансформаторная связь). Эта связь является специфической для СД и отражена на структурной схеме в виде перекрестных связей.

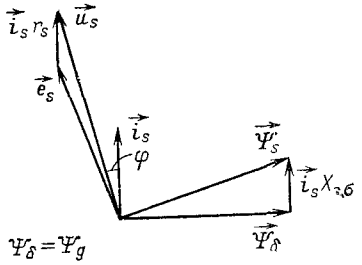


Рис. 10-54. Векторная диаграмма установившихся режимов СД при регулировании на поддержание основного потока.

Целесообразные режимы. Достаточно высокие энергетические и динамические показатели электропривода могут быть обеспечены, если поддерживается на заданном неизменном уровне основной поток СД

$$\psi_\delta = \psi_g = \text{const} \qquad (10\text{-}102)$$

и вектор тока статора $\vec{i}_s$ поддерживается перпендикулярным вектору основного потока $\vec{\psi}_\delta$. Векторная диаграмма СД в подобном установившемся режиме показана на рис. 10-54.

При таком регулировании момент двигателя оказывается пропорциональным току статора

$$|m| = \psi_g i_s. \qquad (10\text{-}103)$$

Электропривод теоретически не имеет ограничений по перегрузочной способности.

В этих режимах с ростом двигательного момента увеличивается угол δ между вектором основного потока и продольной осью, увеличивается ток возбуждения, несколько увеличиваются полное потокосцепление статора ψ_s и напряжение статора. Ток статора отстает от напряжения статора, однако фазовый сдвиг незначителен.

В электроприводе с СД возможно двухзонное регулирование скорости, но целесообразные режимы при этом довольно сложны, а системы регулирования для таких режимов недостаточно отработаны. Поэтому здесь двухзонное регулирование не рассматривается.

Электропривод с регулированием в осях ротора. Применяют при высоких требованиях к качеству регулирования скорости и (или) перегрузочной способности.

Функциональная схема электропривода показана на рис. 10-55. В таком электроприводе регулирование переменных осуществляется в синхронно вращающейся системе координат, образованной осями d, q ротора. Система регулирования имеет подчиненную структуру и содержит три внутренних контура регулирования в соответствии с тремя апериодическими звеньями в структурной схеме СД (рис. 10-53) — контуры регулирования поперечного $i_{s,q}$ и продольного $i_{s,d}$ токов статора и контур регулирования потокосцепления возбуждения ψ_f с регуляторами *AAq*, *AAd*, *AV* соответственно. Эти контуры подчинены внешнему контуру регулирования частоты вращения с регулятором *AR*.

Выходные сигналы регуляторов *AAd*, *AAq* представляют собой проекции обобщенного вектора управляющего напряжения $\vec{u}_y$ на оси координат d, q; в установившемся режиме привода это — постоянные напряжения. Между тем для управления НПЧ необходимы проекции вектора $\mathbf{u}_y$ на оси статора. Переход к этим проекциям осуществляется преобразователем поворота *UQ1* и преобразователем фаз *UPH1*. Преобразователь поворота осуществляет переход к напряжениям $u_{y,\alpha}$, $u_{y,\beta}$ в системе координат α_s, β_s, связанной со статором, по соотношениям вида (10-5). Преобразователь фаз *UPH1* осуществляет переход от проекций вектора $u_{y,\alpha}$, $u_{y,\beta}$ двухфазной системы к проекциям $u_{y,A}$, $u_{y,B}$, $u_{y,C}$ трехфазной системы в соответствии с выражениями вида (10-3). Сигналы обратных связей по токам $i_{s,d}$, $i_{s,q}$ поступают на входы регуляторов *AAd*, *AAq* с выходов датчиков токов *UA1—UA3* фаз статора через преобразователь фаз *UPH2* и преобразователь поворота *UQ2*. Преобразователь *UPH2* осуществляет переход от трехфазной к двухфазной системе координат по соотношениям вида (10-2), преобразователь *UQ2* — от системы координат α_s, β_s к системе координат d, q по соотношениям вида (10-4). Преобразователи поворота *UQ1*, *UQ2* и преобразователи фаз *UPH1*, *UPH2* в САР с СД такие же, что и для САР с АД с короткозамкнутым ротором (см. § 10-5, п. 6), поэтому здесь эти преобразователи и их наладка не рассматриваются.

Для управления преобразователями поворота используется датчик углового положения ротора *BQ*, формирующий сигналы $\sin\gamma$, $\cos\gamma$. Датчик углового положения ДП в рассматриваемом электроприводе такой же, как и для привода с машиной двойного питания (см. § 10-8, п. 7); требования к нему и методы наладки такие же.

Как уже указывалось, одним из важнейших требований к НПЧ является пропорциональность между э. д. с. преобразователя и напряжением управления в каждой фазе по соотношению вида (10-36). Для НПЧ с раздельным управлением группами вентилей линеаризация характеристик может быть достигнута введением дополнительных обратных связей по фазным токам (в других вариантах — обратных связей по токам $i_{s,\alpha}$, $i_{s,\beta}$, i_{s0}). Для этой цели предусматриваются суммирующие элементы, играющие роль дополнительных регуляторов фазных токов, так же как в электроприводе с АСД (§ 10-8, элементы *AA1—AA3*, рис. 10-27).

Регулятор потокосцепления возбуждения *AV* управляет нереверсивным тиристорным воз-

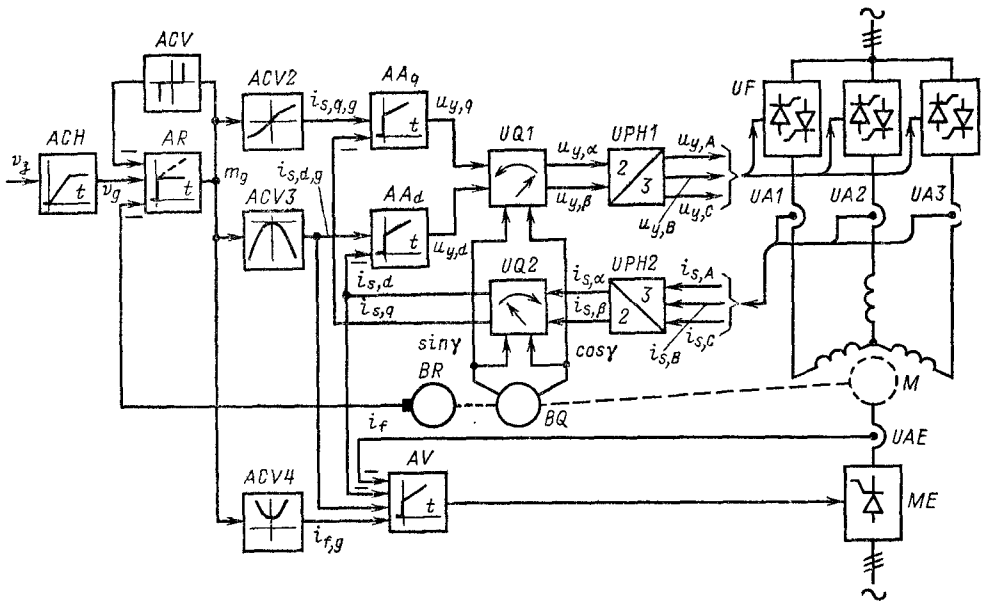


Рис. 10-55. Функциональная схема синхронного электропривода с регулированием в осях ротора.

будителем *ME*. В качестве сигналов обратной связи на вход этого регулятора поданы сигналы $i_{s,d}$ с выхода преобразователя *UQ2* и сигнал i_f с выхода датчика тока возбуждения *UAE*. Резисторы на входе усилителя, выполняющего функции регулятора *AV*, в цепях связи с преобразователем *UQ2* и датчиком тока *UAE* выбирают так, чтобы выполнялось условие (10-26в).

Задание на входы регуляторов *AAq*, *AAd*, *AV* внутренних контуров регулирования поступает с выхода регулятора *AR* через нелинейные элементы *ACV2—ACV4*.

Для поддержания потока в воздушном зазоре СД ψ_δ на неизменном заданном уровне (10-102) и для поддержания перпендикулярности обобщенных векторов тока статора $\vec{i}_s$ и потока в зазоре $\vec{\psi}_\delta$ характеристики нелинейных элементов *ACV2—ACV4* должны быть соответственно выбраны по следующим соотношениям:

$$i_{s,q,g} = \frac{\psi_g m_g}{\sqrt{\psi_g^4 + m_g^2 x_{m,q}^2}}; \quad (10\text{-}104)$$

$$i_{s,d,g} = -\frac{m_g^2 x_{m,q}}{\psi_g \sqrt{\psi_g^4 + m_g^2 x_{m,q}^2}}; \quad (10\text{-}105)$$

$$i_{f,g} = \frac{1}{x_{m,d}} \frac{\psi_g^4 + m_g^2 x_{m,d} x_{m,q}}{\psi_g \sqrt{\psi_g^4 + m_g^2 x_{m,q}^2}}, \quad (10\text{-}106)$$

где $i_{s,q,g}$, $i_{s,d,g}$, $i_{f,g}$ — сигналы на выходах элементов *ACV2*, *ACV3*, *ACV4* соответственно; m_g — заданное значение момента двигателя — сигнал на выходе регулятора частоты вращения *AR*.

Масштабный коэффициент на входе регулятора *AV* по $i_{f,g}$ такой же, как на входе обратной связи по i_f, на входе по $i_{s,d,g}$ — как на входе обратной связи по $i_{s,d}$.

В результате задание потокосцепления определяется соотношением

$$\psi_{f,g} = x_f i_{f,g} + x_{m,d} i_{s,d,g}. \quad (10\text{-}107)$$

Обратная связь по частоте вращения на вход *AR* подается с выхода тахогенератора *BR*. Заданное значение частоты вращения формируется задатчиком интенсивности *ACH*. Нелинейный элемент *ACV1* ограничивает задание момента двигателя на допустимом уровне, который в данном электроприводе может достигать 5—7-кратного значения.

Схема рис. 10-55 построена при пренебрежении внутренними перекрестными связями по э. д. с. вращения и между статорными и роторными цепями по продольной оси, имеющимися в структурной схеме СД (рис. 10-53). Влияние обратных связей по э. д. с. вращения и возможности их компенсации рассмотрены в [10-3]. Перекрестные связи по продольной оси, как показывают анализ и опыт наладки, являются очень слабыми и могут при наладке системы не учитываться.

Наладка электропривода с регулированием в осях ротора начинается с предварительных работ по программе § 10-1, наладки НПЧ и возбудителя, проверки и настройки блоков и модулей регулирующего устройства.

Преобразователи поворота и фаз налаживаются по методике § 10-5, п. 6.

По расчетным параметрам электропривода должны быть настроены характеристики нелинейных элементов *ACV2—ACV4*.

Наладка датчика положения ротора проводится по методике § 10-8, п. 7.

Проверяется функционирование регулирующего устройства, настраиваются входные це-

ии и цепи обратной связи регуляторов по расчетным данным.

При остановленной машине и питании напряжением промышленной частоты известными методами следует определить параметры СД: коэффициент трансформации между обмоткой возбуждения и статором, реактивные сопротивления $x_{s,\sigma}$ (приближенно по реактивному сопротивлению нулевой последовательности), $x_{s,d}$, $x_{s,q}$, x_f, x'_f. Большинство этих параметров затем уточняют в процессе наладки.

Далее целесообразно включить возбудитель на обмотку возбуждения СД при разомкнутой обмотке статора, замкнуть контур регулирования тока возбуждения через регулятор *AV*, ослабленный и переведенный в П-режим, с заданием от источника сигналов. В этой схеме можно снять характеристику намагничивания СД. Для этого ротор нужно установить в положение, где $\gamma=0$ (можно по датчику углового положения), на зажимы фазы *A* статора подключить веберметр. Задание регулятора *AV* следует изменять ступенью от нуля. При каждом скачке задания измеряются установившийся ток возбуждения и потокосцепление статора (по веберметру).

Следующей операцией является наладка дополнительных регуляторов фазных токов. Ротор следует затормозить в положении, где $\gamma=0$, обмотку возбуждения отключить от возбудителя и замкнуть накоротко. Наладка проводится по методике § 10-8, п. 8, начиная с фазы *A*.

Далее можно проверить полярность обратных связей по продольному и поперечному токам статора, вводя соответствующие задания на входы регуляторов фазных токов.

Настройку и проверку переходных процессов во внутренних контурах регулирования производят по той же методике, как это выполняется для внутренних контуров привода постоянного тока (см. разд. 8). При этом вначале настраивают регулятор поперечного тока, затем продольного тока статора, последним — регулятор возбуждения. СД должен быть заторможен: режим должен быть выбран так, чтобы фазные токи были непрерывны. Для измерения сигнала ψ_f обратной связи регулятора полезно применить вспомогательный суммирующий элемент.

Следует проверить соотношение передаточных коэффициентов обратных связей по токам i_f и $i_{s,d}$ на регулятор *AV*. Это можно проделать при ослабленном регуляторе *AV* и ступенчатых изменениях задания регулятора *AAd*. В сигнале ψ_f не должно быть быстроизменяющейся составляющей.

Передаточные функции регуляторов выбираются так же, как и в системах подчиненного регулирования с двигателями постоянного тока, с учетом передаточных функций апериодических звеньев

$$H_{AAd}(p)=\frac{\frac{x_{s,d}}{\Omega_б}p+r_s}{2T_1p};$$

$$H_{AAq}(p)=\frac{\frac{x_{s,q}}{\Omega_б}p+r_s}{2T_1p};$$

$$H_{AV}(p)=\frac{\frac{1}{\Omega_б}p+\frac{r_s}{x_f}}{2T_1p}. \quad (10\text{-}108)$$

Для уточнения параметров СД можно снять ЛАЧХ, считая входом исследуемого звена выход соответствующего регулятора, а выходом — сигналы $i_{s,q}$, $i_{s,d}$ на выходе преобразователя поворота *UQ2* и сигнал ψ_f.

Кроме контроля переходного процесса в настраиваемом контуре необходимо контролировать взаимное влияние контуров (лучше всего это делать, контролируя напряжения на выходах регуляторов). Контур поперечного тока не должен влиять на токи в двух других контурах, и наоборот (это зависит от точности установки датчика положения и точности вычисления токов $i_{s,q}$, $i_{s,d}$). Взаимное влияние контуров возбуждения и продольного тока статора должно быть минимальным (в противном случае на вход регулятора продольного тока и регулятора возбуждения необходимо подавать компенсирующие связи, вид и параметры которых определяют по структурной схеме СД (рис. 10-53).

Наиболее сложным этапом является наладка установившихся режимов привода, которые определяются характеристиками нелинейных элементов *ACV2—ACV4*. Нужно сформировать вышеуказанные целесообразные режимы.

Рекомендуется уточнить характеристики нелинейных элементов на основании экспериментальных данных по параметрам и кривой намагничивания СД с учетом влияния насыщения по методике [10-11].

Для качественной наладки режимов целесообразно использовать специализированное аналоговое вычислительное устройство, которое из сигналов датчиков тока и напряжения статора формирует сигналы, пропорциональные потокосцеплениям $\psi_{\delta,\alpha}$, $\psi_{\delta,\beta}$, и далее сигналы, пропорциональные моменту, значению q_δ и модулю вектора основного потока, по соотношениям

$$m=\psi_{\delta,\alpha}i_{s,\beta}-\psi_{\delta,\beta}i_{s,\alpha};\quad q_\delta=\psi_{\delta,\alpha}i_{s,\alpha}+\psi_{\delta,\beta}i_{s,\beta};\quad \psi_\delta^2=\psi_{\delta,\alpha}^2+\psi_{\delta,\beta}^2 \quad (10\text{-}109)$$

(величина q_δ связана с реактивной мощностью СД).

В установившихся режимах налаженного электропривода должны выполняться соотношения

$$m=m_g;\quad q_\delta=0;\quad \psi_\delta=\psi_g; \quad (10\text{-}110)$$

это следует проверить во всем диапазоне моментов СД и в разных экспериментах: при заторможенном СД; при пуске, реверсе и торможении; при изменении нагрузки на валу вращающегося СД. Кроме того, при пуске, реверсе и торможении на х. х. следует проверить пропорциональность выходного сигнала регулятора частоты вращения (сигнала m_g) динамическому моменту СД, определяемому по времени пуска (реверса, торможения). Эту проверку следует проводить при разных ускорениях, вплоть до максимального. Для выполнения этого этапа необходимо предварительно замкнуть и грубо настроить контур регулирования частоты вращения.

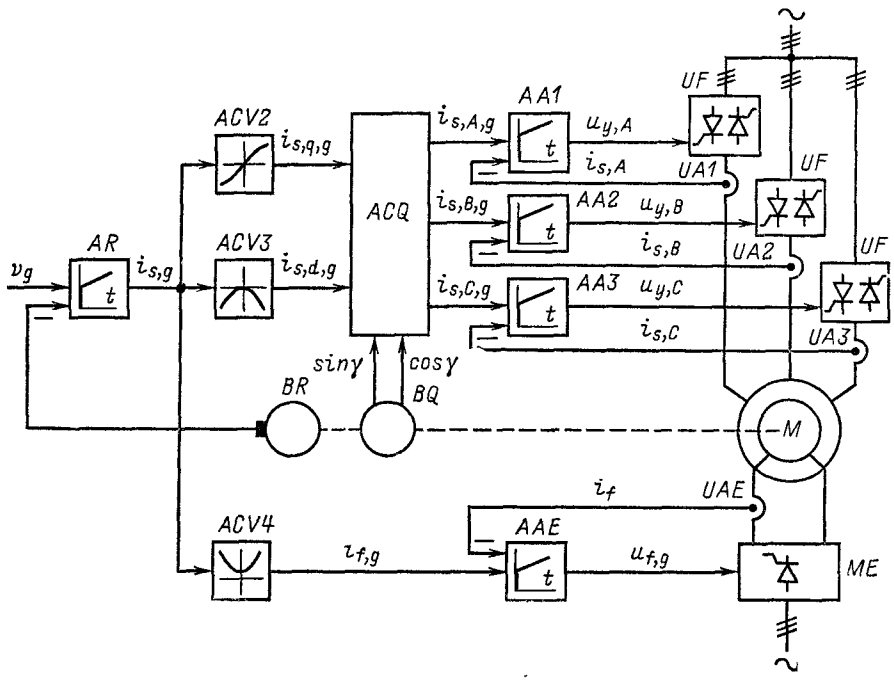


Рис. 10-56. Функциональная схема синхронного электропривода с частотно-токовой системой регулирования.

Окончательная настройка контура частоты вращения проводится после наладки установившихся режимов по такой же методике, как и для приводов постоянного тока.

Электроприводы с частотно-токовым регулированием применяются в диапазоне частот примерно до 5 Гц для механизмов с плавными режимами работы (например, для крупных цементных мельниц).

Функциональная схема электропривода показана на рис. 10-56. Отличия от предыдущего варианта: а) отсутствуют регуляторы токов $i_{s,d}$, $i_{s,q}$ и задания $i_{s,d,g}$, $i_{s,q,g}$ непосредственно преобразуются в задания фазных токов; б) используются обычно ПИ-регуляторы фазных токов *AA1—AA3*; в) регулятор *AAE* является регулятором тока возбуждения.

В данном приводе точность формирования установившихся режимов зависит от быстродействия контуров регулирования фазных токов. Поэтому при наладке следует обеспечить быстродействие, близкое к предельному.

Контур регулирования тока возбуждения сильно связан с контурами токов статора. Это необходимо учитывать при выборе параметров и наладке регулятора *AAE*. Его передаточную функцию можно принять в виде

$$H_{AAE}(p)=\frac{\frac{x_f^*}{\Omega_б}p+r_f}{2T_1 p}, \quad (10\text{-}111)$$

причем постоянная T_1 должна быть увеличена по сравнению с контурами статора: $T_1 > 4T_{1min}$.

В установившихся режимах такого электропривода токи и потокосцепления зависят не только от момента, но и от частоты вращения. Поэтому следует проверить эти режимы во всем диапазоне частот и при необходимости выполнить компромиссную настройку нелинейных элементов.

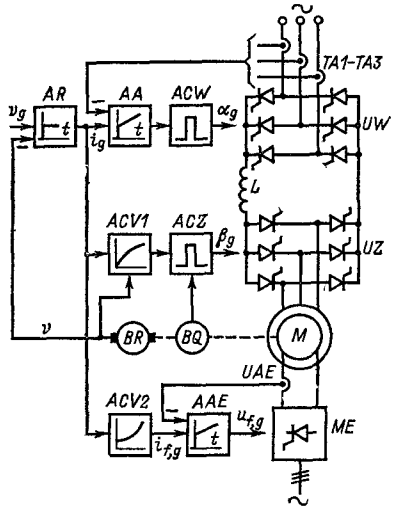


Рис. 10-57. Функциональная схема электропривода с вентильным двигателем.

2. **Быстроходные электроприводы**. Чаще всего эти электроприводы выполняются на основе преобразователя частоты со звеном постоянного тока и зависимым инвертором тока.

К таким электроприводам применяют термин «вентильный двигатель» в узком смысле.

Функциональная схема электропривода показана на рис. 10-57. Здесь используется синхронный двигатель M с демпферной клеткой или массивным ротором. Зависимый инвертор тока UZ через систему импульсно-фазового управления ACZ управляется дискретным датчиком положения ротора BQ. Инвертор получает питание от выпрямителя UW, управляемого через систему импульсно-фазового управления ACW ПИ-регулятором тока AA. В качестве сигнала обратной связи по току промежуточной цепи, который примерно пропорционален току статора двигателя, взято напряжение трансформаторов тока $TA1$—$TA3$.

Нелинейный элемент $ACV1$ формирует необходимую зависимость угла управления тиристоров инвертора от момента и скорости.

Нелинейный элемент $ACV2$ формирует необходимую зависимость тока возбуждения от момента СД.

Указанные нелинейные зависимости определяются в соответствии с условиями коммутации и целесообразными режимами СД.

Условия коммутации и целесообразные режимы. В рассматриваемом электроприводе коммутация вентилей преобразователя частоты осуществляется за счет э. д. с. вращения двигателя и инвертор работает как ведомый двигателем. Так как в этом электроприводе единственным источником реактивной мощности является сам СД, то его ток по условиям коммутации вентилей должен быть принципиально опережающим. С ростом нагрузки сдвиг фаз между током и напряжением СД должен увеличиваться, поэтому момент СД оказывается ограниченным.

Условия коммутации формируются таким образом, чтобы во всех режимах обеспечивалось необходимое время на восстановление запирающих свойств тиристоров, например в виде

$$\sin\beta = \frac{1}{\psi_\delta}\left[\psi'' \cos(\nu\varepsilon) - x''_{s,d}\, i_{s,d}\right], \qquad (10\text{-}112)$$

$$\beta \geqslant \frac{\pi}{2};$$

$$\psi'' = \sqrt{\psi_\delta^2 - 2\left(x''_{s,d} - x_{s,\sigma}\right) i_s \cos\beta + \left(x''_{s,d} - x_{s,\sigma}\right)^2 i_s^2}\,, \qquad (10\text{-}113)$$

где ε — угол, предоставляемый на восстановление запирающих свойств тиристоров при базовой частоте.

Удовлетворительные показатели привода могут быть обеспечены в режимах, где независимо от нагрузки поддерживается основной поток ψ_δ, а угол β между векторами $\vec{i}_s$, $\vec{\psi}_\delta$ поддерживается по условиям коммутации (10-112) и (10-113). При таком регулировании с ростом момента нелинейно увеличивается потокосцепление ψ'' по (10-133), определяющее условия коммутации, увеличиваются углы ϑ и β, растет ток возбуждения.

Особенности наладки САР. Здесь нужно отметить работы по датчику положения ротора: согласование направления вращения двигателя с порядком поступления импульсов от датчика положения BQ, а также установка датчита положения. Вначале проверяется правильность чередования импульсов управления на вентилях инвертора при вращении датчика положения без подачи напряжения на силовую схему.

При установке ДП исходят из того, что на идеальном холостом ходу при нулевой частоте вращения вектор первой гармоники тока статора должен быть направлен по оси q. Если ось d ротора установить по оси эквивалентной обмотки AB статора, то импульсы управления на вентили инвертора должны поступать так, чтобы открывались вентили, обеспечивающие переход тока от I_{AC} к I_{BC}.

Индуктивное сопротивление x''_d двигателя для цепи постоянного тока играет роль эквивалентного активного сопротивления, пропорционального частоте вращения. В связи с этим передаточную функцию регулятора тока AA принимают (с запасом по интегральной части) из условий начальной рабочей частоты вращения ν_0 в виде

$$H_{AA}(p) = \frac{\frac{x_\text{п}}{\Omega_\text{б}} p + r_\text{п}}{2T_1 p}, \qquad (10\text{-}114)$$

где $x_\text{п} \approx x_\text{др} + \frac{\pi^2}{9} x''_d$; $r_\text{п} \approx \frac{\pi^2}{9} r_s + r_\text{др} + \frac{\pi}{6} x''_d \nu$.

При наладке предварительно настраивают регулятор тока на получение стандартных процессов, закоротив инвертор со стороны постоянного тока, а затем уточняют настройку в рабочих режимах.

Контур тока возбуждения настраивают при закороченном статоре СД по той же методике, что и для сетевых СД (см. § 10-10), при этом передаточную функцию регулятора тока возбуждения AAE также выбирают по (10-77).

После пуска привода должна быть проверена достаточность запаса угла опережения открывания вентилей инвертора при всех частотах вращения в рабочем диапазоне и при всех нагрузках, вплоть до максимальных, определяемых выходом регулятора AR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

10-1. **Важнов А. И.** Основы теории переходных процессов синхронных машин.— М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.—312 с.

10-2. **Вешеневский С. Н.** Характеристики двигателей в электроприводе.— 6-е изд. — М.: Энергия, 1977. — 432 с.

10-3. **Влияние** э. д. с. вращения на динамику системы регулирования скорости синхронного двигателя./А. М. Вейнгер, А. С. Гусев, И. М. Серый, А. А. Янко-Триницкий. — Изв. вузов, сер. Электромеханика, 1972, № 10, с. 1075—1084.

10-4. **Поскробко А. А., Братолюбов В. В.** Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе — М.: Энергия, 1978. — 192 с.

10-5. **Сандлер А. С., Тарасенко Л. М.** Ди-

намика каскадных асинхронных электроприводов. — М.: Энергия, 1977. — 200 с.

10-6. **Современное** состояние и перспективы развития электроприводов переменного тока с преобразователями частоты с непосредственной связью/О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, В. Д. Кочетков и др. — Электричество, 1973, № 11, с. 21—24.

10-7. **Шубенко В. А., Браславский И. Я.** Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. — М.: Энергия, 1972. — 200 с.

10-8. **Blaschke F.** Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für Transvektor-Regelung von Drehfeldmaschinen. — Siemens-Z., 1971, Bd 45, № 10, S. 757—760.

Экспресс-информация, сер. Автоматизированный электропривод, электротехнология и электроснабжение промышленных предприятий, 1972, вып. 2, реф. 6.

10-9. **Flöter W., Ripperger H.** Die Transvektor-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Asinchronmaschine. — Siemens-Z., 1971, Bd 45, № 10, S. 761—764.

Система регулирования Transvektor для управления асинхронным двигателем. Экспресс-информация, сер. Автоматизированный электропривод, электротехнология и электроснабжение промышленных предприятий, 1972, вып. 2, реф. 7.

10-10. **Хэнкок Н.** Матричный анализ электрических машин: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1967. — 224 с.

10-11. **Установившиеся** режимы насыщенных синхронных двигателей/А. М. Вейнгер, Н. А. Башко, А. С. Гусев и др. — Электротехническая промышленность. Электропривод, 1976, вып. 8 (52).

РАЗДЕЛ ОДИННАДЦАТЫЙ

УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

А. НЕРЕВЕРСИВНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

11-1. СИЛОВЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕНТИЛИ (ТИРИСТОРЫ)*

Вентильные преобразователи относятся к классу статических преобразователей электрической энергии и предназначены для преобразования переменного тока в постоянный и наоборот. В электроприводах постоянного тока вентильные преобразователи применяют для питания якорей двигателей постоянного тока и обмоток возбуждения электрических машин.

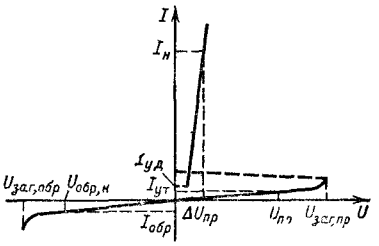


Рис. 11-1. Вольт-амперная характеристика тиристора.

В настоящее время основу статических преобразователей постоянного тока составляют управляемые полупроводниковые вентили (тиристоры), обладающие рядом преимуществ перед ионными: высокий к. п. д., малая масса и габариты, простота обслуживания и т. д. Применение тиристоров в преобразователях имеет ряд особенностей, обусловленных физическими свойствами этих приборов. На рис. 11-1 приведена вольт-амперная характеристика тиристора, по которой определяют следующие статические параметры:

номинальный прямой ток $I_н$ (среднее значение), протекающий через открытый тиристор и обеспечивающий допустимый его нагрев при номинальных условиях охлаждения;

номинальное прямое падение напряжения $\Delta U_{пр}$ — среднее значение падения напряжения при номинальном токе $I_н$; этот параметр используется для подбора параллельно включаемых тиристоров;

номинальное обратное напряжение $U_{обр,н}$ — допустимое рабочее напряжение тиристора; этот параметр используется для подбора последовательно включаемых тиристоров;

напряжение загиба обратной ветви $U_{заг,обр}$; этот параметр соответствует пробивному напряжению, после превышения которого значительно ускоряется рост обратного тока и происходит электрический пробой тиристора; электрический пробой, как правило, приводит к тепловому пробою, при котором тепло, выделяющееся при протекании значительного обратного тока, разогревает структуру тиристора и разрушает ее;

обратный ток утечки $I_{обр}$ — среднее значение обратного тока при номинальном напряжении; этот параметр определяет запирающие свойства тиристоров;

напряжение загиба прямой ветви $U_{заг,пр}$ — амплитудное значение приложенного к закрытому тиристору прямого напряжения, превышение которого влечет за собой отпирание тиристора, что является недопустимым; значение $U_{заг}$ является функцией температуры: с увеличением температуры это значение уменьшается;

прямой ток утечки $I_{ут}$; он характеризует вентильные свойства тиристора в прямом направлении и определяет потери;

* Сведения по проверке силовых неуправляемых полупроводниковых вентилей приведены в разд. 3.

ток удержания $I_{уд}$ — минимальный прямой ток, при котором тиристор находится во включенном состоянии; этот параметр необходим для расчета минимально допустимой нагрузки преобразователя;

ток спрямления $i_{v,спр}$ — ток управления, при котором прямая ветвь становится линейной.

Помимо перечисленных тиристоры характеризуются также динамическими параметрами, основными из которых являются:

время включения $t_{вкл}$, определяющее промежуток времени между началом управляющего импульса и моментом, когда ток в тиристоре превысит значение тока удержания;

время выключения $t_{выкл}$, определяющее время восстановления запирающих свойств тиристора после спадания до нуля прямого тока; этот промежуток времени характерен наличием обратного тока, обусловленного рекомбинацией («рассасыванием») основных носителей тока в структуре тиристора;

допустимая скорость нарастания прямого тока di/dt; ограничение этой величины необходимо по следующей причине: в начальный момент при включении тиристора вблизи управляющего электрода образуется участок с высокой проводимостью, остальной же объем структуры приобретает высокую проводимость через некоторое время; если скорость нарастания тока велика, то в окрестности управляющего электрода концентрируется значительная плотность тока и возникает большое падение напряжения, в результате чего за счет значительной мощности потерь может произойти нагрев структуры на этом участке вплоть до температуры плавления кремния и выход тиристора из строя;

допустимая (критическая) скорость нарастания прямого напряжения du/dt; необходимость ограничения этой величины обусловлена возможностью самопроизвольного включения тиристора даже при значениях напряжения, меньших $U_{заг}$.

Кроме перечисленных параметров важной характеристикой тиристоров является нагрузочная способность. При включении тиристоров в электрическую цепь в них возникают потери, которые преобразуются в тепло, способное нагревать кристаллическую структуру до значительной температуры. Потери пропорциональны току, протекающему через тиристор, поэтому нагрузочная способность тиристоров ограничивается током, при котором выделяющееся тепло не нагревает кристаллическую структуру тиристора выше максимально допустимой температуры. Нагрузочная способность зависит от интенсивности охлаждения и температуры окружающей среды. При повышении температуры окружающей среды для сохранения температуры кристаллической структуры тиристора на допустимом уровне необходимо снизить допустимый ток через тиристор.

Перечисленные свойства тиристоров предъявляют определенные требования к системе управления и средствам защиты преобразователей.

11-2. СИЛОВЫЕ СХЕМЫ

Силовая схема состоит из преобразовательного трансформатора или токоограничивающего реактора, выпрямительного устройства и коммутационной аппаратуры; часто в состав преобразователя входит также сглаживающий дроссель. Преобразовательный трансформатор предназначен для изменения (обычно понижения) переменного напряжения с целью согласования напряжений питающей сети и нагрузки. Кроме того, преобразовательный трансформатор ограничивает скорость нарастания прямого тока тиристоров, а также токи короткого замыкания. Режим работы преобразовательного трансформатора значительно отличается от режима работы обычного повышающего или понижающего трансформатора тем, что ток в обмотках преобразовательного трансформатора имеет несинусоидальную форму, а продолжительность протекания его меньше, чем в обычном трансформаторе. В некоторых схемах возникает постоянное подмагничивание магнитопровода трансформатора, вызывающее необходимость завышения мощности трансформатора по сравнению с мощностью нагрузки. В трехфазных мостовых схемах выпрямления подмагничивание преобразовательного трансформатора отсутствует, в связи с чем наиболее полно используется мощность трансформатора.

Токоограничивающие реакторы устанавливают, когда напряжение питающей сети соответствует требуемому выпрямленному напряжению потребителя; они предназначены для уменьшения di/dt тиристоров, ограничения токов к. з. и уменьшения искажений формы питающего напряжения сети, вызванных коммутацией тиристоров.

Силовые схемы нереверсивных преобразователей делятся на следующие основные классы: нулевые (однотактные) и мостовые (двухтактные), однофазные и многофазные, симметричные и несимметричные. На рис. 11-2, *а*—*е* показаны некоторые применяемые схемы выпрямления, а в табл. 11-1 приведены основные соотношения для этих схем.

Электромагнитные процессы в указанных схемах выпрямления в принципе аналогичны и отличаются лишь количественными соотношениями, поэтому основные режимы работы схем выпрямления рассмотрены на примере широко применяемой трехфазной мостовой схемы.

Трехфазная мостовая схема (рис. 11-2, *е*) эквивалентна последовательному соединению двух нулевых схем, одна из которых является катодной группой, а другая — анодной. Нагрузка включается между общими точками катодной и анодной групп, а вентильные обмотки — в диагонали мостов, образованных вентилями. В мостовой схеме вентильные обмотки трансформатора не имеют непосредственного подключения к нагрузке, поэтому они могут соединяться по любой из известных схем.

Токи в вентильных обмотках протекают 2 раза за период питающего напряжения в противоположных направлениях; среднее значение этого тока близко к нулю. Подмагничивание отсутствует, и магнитная система используется по мощности полностью.

В тиристорных преобразователях на токи, превышающие номинальное значение тока тиристора, применяют параллельное включение нескольких тиристоров. Вследствие неидентичности прямых ветвей вольт-амперных характеристик параллельно включенных тиристоров

Таблица 11-1

Расчетные соотношения основных схем выпрямления и значения коэффициентов

Коэффициент	Расчетная формула	Тип схемы				
		Однофазная мостовая		Трехфазная		
		симметричная (рис. 11-2, *а*)	несимметричная (рис 11-2, *б*, *в*)	нулевая (рис. 11-2, *г*)	мостовая симметричная (рис. 11-2, *е*)	мостовая несимметричная (рис 11-2, *д*)
k_1	Среднее значение выпрямленной э. д. с. $E_d = E_{d0}\cos\alpha$, $E_{d0} = k_1 U_2$, где U_2 — действующее значение фазного напряжения вентильной обмотки трансформатора	0,9		1,17	2,34	
A	Среднее значение выпрямленного напряжения в режиме непрерывного тока $U_d = E_d - R_{\text{фик}} I_d$, где $R_{\text{фик}} = A\frac{u_{\text{к}}\,\%\, E_{d,0}}{100 I_{d,\text{н}}}$	0,35		0,87	0,5	
k_2	Действующее значение линейного тока вентильной обмотки трансформатора $I_2 = k_2 I_d$	1,0	$\sqrt{\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ}}$	0,58	0,82	0,82 при $\alpha < 60^\circ$
k_3	Действующее значение линейного тока сетевой обмотки трансформатора $I_1 = k_3\frac{U_2}{U_1} I_d$			0,82		
k_4	Типовая мощность трансформатора $S_{\text{т}} = k_4 E_{d0} I_d$	1,11		1,46	1,045	

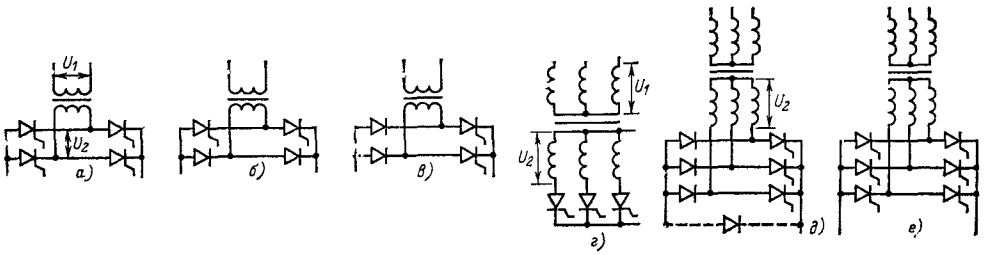


Рис. 11-2. Основные схемы выпрямления.

а — однофазная мостовая симметричная; *б*, *в* — однофазные мостовые несимметричные; *г* — трехфазная нулевая; *д* — трехфазная мостовая несимметричная; *е* — трехфазная мостовая симметричная.

ток нагрузки распределяется между ними неравномерно, что приводит к перегрузке отдельных тиристоров и выходу их из строя Для равномерного распределения тока между параллельно соединенными тиристорами необходимо либо подбирать тиристоры с одинаковыми вольт-амперными характеристиками, либо применять специальные делители тока.

В тиристорных преобразователях, напряжение вентильных обмоток которых больше допустимого напряжения одного тиристора, применяется последовательное соединение тиристоров. В этом случае через последовательно включенные тиристоры протекает один и тот же ток утечки, поэтому напряжения на них распределяются неравномерно; на тири-

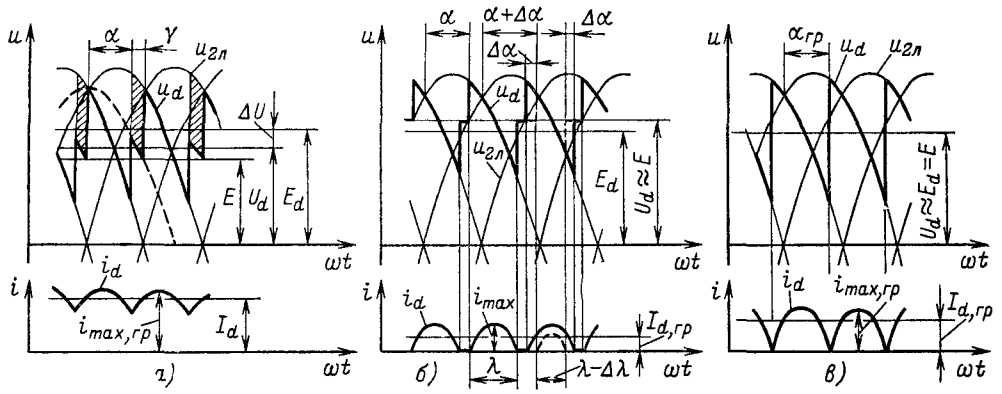


Рис. 11-3. Диаграммы напряжения и тока в выпрямительном режиме.
а — непрерывный ток; *б* — прерывистый ток; *в* — гранично-непрерывный ток.

сторах с большим током утечки напряжение меньше. Наиболее распространенным методом улучшения распределения напряжения между последовательно включенными тиристорами является использование резисторов, включаемых параллельно каждому вентилю. Эти резисторы выбираются равными и выполняют роль делителя напряжения, при этом к тиристорам прикладываются равные напряжения.

Отпирание тиристоров осуществляется подачей импульсов на их управляющие электроды. При протекании через тиристор тока, большего тока удержания, последний остается открытым даже при отсутствии управляющего импульса. Закрытие тиристора происходит в момент спадания тока до нуля (точнее, тиристор закрывается при некотором весьма незначительном обратном токе). Тиристор является полууправляемым прибором, т. е. управляющим сигналом возможно только включение тиристора.

При подаче управляющих импульсов на тиристоры в точках естественной коммутации (моменты естественного открытия вентилей в неуправляемой схеме) выпрямленная э. д. с. имеет наибольшее значение и носит название максимальной выпрямленной э. д. с. преобразователя E_{d0}. Регулирование выпрямленной э. д. с. осуществляется задержкой включения тиристоров (задержкой подачи управляющих импульсов на тиристоры) относительно точек естественной коммутации, в результате чего среднее значение э. д. с. оказывается меньше, чем E_{d0}. Задержка, выраженная в градусах, называется углом регулирования и обозначается α.

Выпрямительный режим обеспечивает преобразование переменного тока в постоянный и заключается в циклическом переключении нагрузки с помощью тиристоров с одной фазы источника переменного напряжения на другую, при этом энергия источника передается в нагрузку. Выпрямительному режиму соответствует диапазон углов регулирования $0 \leqslant \alpha \leqslant 90°$. Среднее значение выпрямленной э. д. с. E_d связано с углом регулирования α выражением

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha. \qquad (11\text{-}1)$$

По характеру выпрямленный ток может быть непрерывным, прерывистым и гранично-непрерывным.

1. При активно-индуктивной нагрузке с противо-э. д. с. характер выпрямленного тока зависит от угла регулирования α и противо-э. д. с. Частным случаем данного вида нагрузки является якорь электродвигателя постоянного тока, противо-э. д. с. которого зависит от частоты вращения и потока возбуждения.

В режиме непрерывного тока (рис. 11-3, *а*) включение очередного тиристора происходит в момент, когда предыдущий тиристор еще проводит ток нагрузки. Этот ток, протекая также по обмоткам трансформатора или токоограничивающего реактора, не может мгновенно снизиться до нуля. Вызвано это тем, что обмотки трансформатора или реактора обладают индуктивным сопротивлением, обусловленным магнитным потоком рассеяния, и при изменении тока возникает э. д. с. самоиндукции, препятствующая этому изменению. Ток снижается до нуля в выходящем из работы тиристоре в течение некоторого времени, называемого углом коммутации γ.

Угол коммутации связан с выпрямленным током и углом регулирования

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) = \frac{\sqrt{2}\,\omega L_{рас}}{U_{2л}} I_d = \frac{u_к \,\%\, I_d}{100 I_{d,н}}, \qquad (11\text{-}2)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота напряжения питающей сети, $с^{-1}$; $L_{рас}$ — индуктивность рассеяния обмоток преобразовательного трансформатора, Гн; $U_{2л}$ — действующее значение линейного напряжения вентильных обмоток преобразовательного трансформатора, В; I_d — среднее значение выпрямленного тока, А; $u_к$ % — напряжение к. з. преобразовательного трансформатора; $I_{d,н}$ — номинальное значение выпрямленного тока преобразовательного трансформатора, А.

Во время коммутации выпрямленная э. д. с. снижается. Мгновенное значение падения выпрямленного напряжения в период коммутации равно э. д. с. самоиндукции. создаваемой потоками рассеяния обмоток преобразователь-

ного трансформатора. Среднее значение этого падения

$$\Delta U = I_d R_{\text{фик}}, \qquad (11\text{-}3)$$

где

$$R_{\text{фик}} = \frac{3}{\pi}\omega L_{\text{рас}} = 0{,}5\,\frac{u_{\text{к}}\,\%\,E_{d0}}{100 I_{d.\text{н}}}$$

— фиктивное сопротивление, учитывающее коммутационное падение напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения (на выходных зажимах схемы выпрямления)

$$U_d = E_{d0}\cos\alpha - \Delta U. \qquad (11\text{-}4)$$

Среднее значение тока нагрузки определяется разностью $E_d - E$ ($E_d > E$) и суммарным активным сопротивлением всей цепи тиристорного преобразователя

$$I_d = \frac{E_d - E}{R_{\text{нагр}} + R_{\text{фик}}}, \qquad (11\text{-}5)$$

где $R_{\text{нагр}}$ — активное сопротивление цепи нагрузки тиристорного преобразователя; E — противо-э. д. с. двигателя.

Амплитуда пульсаций выпрямленного тока определяется индуктивностью цепи нагрузки. Пульсация тока оказывает вредное влияние на работу двигателя постоянного тока, ухудшая коммутацию тока и вызывая искрение на коллекторе. При увеличении индуктивности пульсация тока уменьшается, поэтому в большинстве случаев для ограничения пульсаций тока последовательно с якорем двигателя включают сглаживающий дроссель, индуктивность которого увеличивает суммарную индуктивность цепи нагрузки преобразователя.

В режиме прерывистого тока (рис. 11-3, *б*) к моменту включения очередного тиристора ток в предыдущем тиристоре успевает снизиться до нуля, ток нагрузки прерывается; процесс коммутации, свойственный режиму непрерывного тока, отсутствует. Выпрямленная э. д. с. преобразователя меньше противо-э. д. с. ($E_d < E$). Среднее значение выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя U_d зависит от угла регулирования α и длительности протекания тока за один такт работы преобразователя, называемой углом проводимости λ. При неизменном значении э. д. с. двигателя изменения угла регулирования α и угла проводимости связаны приближенной зависимостью $\Delta\lambda \approx 2\Delta\alpha$. Среднее значение выпрямленного тока незначительно зависит от активного сопротивления цепи нагрузки, а в основном определяется ее индуктивностью. При пренебрежении падением напряжения на активном сопротивлении цепи нагрузки $U_d = E$. Такое пренебрежение допустимо при малых значениях тока в прерывистом режиме и активного сопротивления нагрузки (например, в электроприводах большой мощности).

Количественные соотношения для выпрямленных напряжения и тока в прерывистом режиме очень сложны. Для диапазона углов регулирования $\alpha \geqslant 30°$

$$U_d \approx E_{d0}\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda}{2}\right); \qquad (11\text{-}6)$$

$$I_d \approx \frac{E_{d0}}{\omega L_{\text{нагр}}}\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda}{2}\right)\frac{\lambda^3}{12}, \qquad (11\text{-}7)$$

где $L_{\text{нагр}}$ — индуктивность цепи нагрузки, Гн.

Граничено-непрерывный режим (рис. 11-3, *в*) является частным случаем прерывистого режима ($\lambda = \pi/3$). Момент включения очередного тиристора совпадает с моментом прекращения тока в предыдущем тиристоре; бестоковых пауз нет. Процесс коммутации, свойственный режиму непрерывного тока, так же как и в прерывистом режиме, отсутствует. Средние значения противо-э. д. с. и выпрямленной э. д. с. преобразователя равны между собой и связаны с углом регулирования α выражением (11-1).

Угол регулирования α, которому при данной противо-э. д. с. соответствует режим гранично-непрерывного тока, принято называть граничным углом $\alpha_{\text{гр}}$.

При переходе из непрерывного режима в прерывистый зависимость среднего значения тока от угла регулирования при постоянстве противо-э. д. с. существенно изменяется и в прерывистом режиме имеет нелинейный характер, так как выпрямленный ток в значительной степени зависит от индуктивности нагрузки и угла проводимости и почти не зависит от активного сопротивления. Эта нелинейность ухудшает динамические свойства тиристорных электроприводов в режиме прерывистых токов (см. § 8-11).

2. При работе тиристорного преобразователя на активно-индуктивную нагрузку при $E = 0$ (например, обмотка возбуждения двигателя) ток имеет непрерывный характер в диапазоне углов $0 \leqslant \alpha < 90°$; при $\alpha = 90°$ он имеет гранично-непрерывный характер и в диапазоне $90° \leqslant \alpha < 120°$ — прерывистый характер. При $\alpha = 120°$ ток равен нулю.

В режиме непрерывного тока зависимости для угла коммутации, а также средних значений выпрямленного напряжения и тока аналогичны рассмотренным выше для $E \neq 0$.

В режиме прерывистого тока $U_d \approx 0$; угол регулирования α однозначно определяет угол проводимости $\lambda = 2(2\pi/3 - \alpha)$. Среднее значение тока в прерывистом режиме

$$I_d = I_{d,\text{гр}}\left(\frac{3\lambda}{\pi}\right)^2, \qquad (11\text{-}8)$$

где

$$I_{d,\text{гр}} = 0{,}09\,\frac{E_{d0}}{\omega L_{\text{нагр}}}\sin\alpha$$

— среднее значение выпрямленного тока в гранично-непрерывном режиме.

3. При работе тиристорного преобразователя на активную нагрузку $L_{\text{нагр}} = 0$; $E = 0$; в диапазоне углов регулирования $0 \leqslant \alpha < 60°$ выпрямленный ток имеет непрерывный характер, при $\alpha = 60°$ ток гранично-непрерывный, а в диапазоне углов $60° < \alpha < 120°$ — ток прерывистый. При $\alpha \geqslant 120°$ ток равен нулю.

Инверторный режим является обратным по отношению к выпрямительному и представляет собой процесс преобразования постоянного тока в переменный, т. е. передачи электрической энергии из цепи постоянного тока в цепь переменного тока. В вентильном электроприводе инверторный режим работы

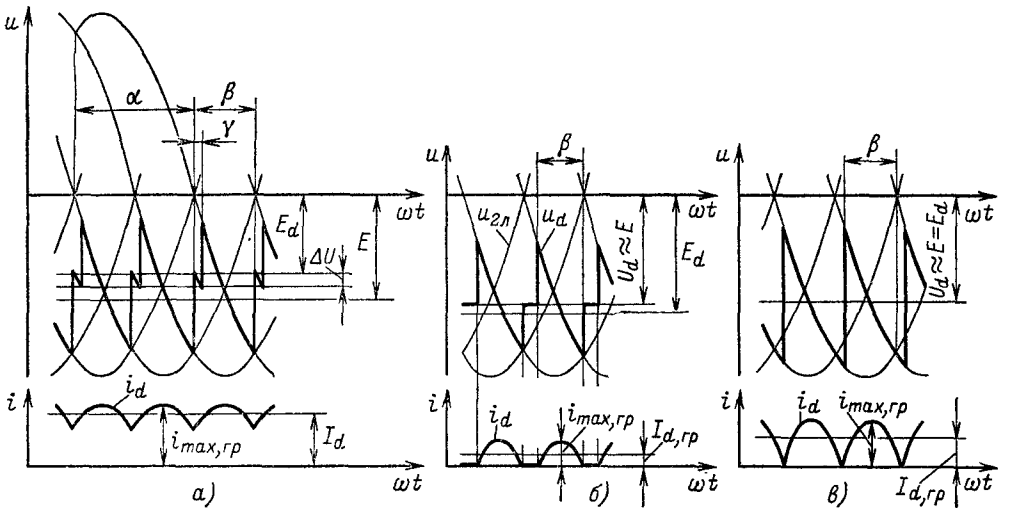


Рис. 11-4. Диаграммы напряжения и тока в инверторном режиме.
а — непрерывный ток; *б* — прерывистый ток; *в* — гранично-непрерывный ток.

преобразователя необходим для рекуперативного торможения привода, При торможении двигатель, работая в генераторном режиме, преобразует кинетическую энергию маховых масс в электрическую и с помощью инвертора передает в сеть переменного тока.

В инверторном режиме ток протекает под действием э. д. с. нагрузки E, а выпрямленная э. д. с. E_d направлена встречно току. Значение тока зависит от разности $E - E_d$. В отличие от выпрямительного режима E_d меняет знак, т. е. становится отрицательной. Если по каким-либо причинам (например, самопроизвольное открытие тиристора или поступление ложного управляющего импульса с углом регулирования, соответствующим выпрямительному режиму) E_d станет положительной при E, соответствующей инверторному режиму, то в цепи нагрузки возникает суммарная э. д. с. $E+E_d$ и как следствие аварийный ток.

Диапазон углов регулирования, соответствующий инверторному режиму, составляет $90° \leqslant \alpha < 180°$; при $\alpha \geqslant 180°$ происходит опрокидывание инвертора. Более часто инверторный режим характеризуется так называемым углом опережения инвертора β, где $\beta = 180° - \alpha$.

Среднее значение выпрямленной э. д. с. связано с углом β следующей зависимостью:

$$E_d = -E_{d0} \cos \beta. \qquad (11\text{-}9)$$

Инверторному режиму, так же как и выпрямительному, свойственны непрерывный, прерывистый и гранично-непрерывный характеры тока (рис. 11-4). Электромагнитные процессы в инверторном режиме аналогичны выпрямительному с той лишь разницей, что ток нагрузки протекает при отрицательных значениях выпрямленного напряжения. В режиме непрерывного тока

$$U_d = -E_{d0} \cos \beta + I_d R_{фик}; \qquad (11\text{-}10)$$

в режиме гранично-непрерывного тока

$$U_d \approx -E_{d0} \cos \beta; \qquad (11\text{-}11)$$

при прерывистом токе аналогично выпрямительному режиму

$$U_d \approx -E. \qquad (11\text{-}12)$$

В (11-11) и (11-12) знак приближения показывает пренебрежение падением напряжения на активном сопротивлении цепи нагрузки.

В инверторном режиме, так же как и в выпрямительном, при непрерывном характере тока происходит коммутация тиристоров (рис. 11-4, *а*). Длительность процесса коммутации характеризуется углом коммутации γ и зависит как от тока, так и от угла β. При одном и том же значении тока угол коммутации γ максимален при угле β, близком к нулю, и минимален при $\beta = 90°$. При увеличении тока значение угла γ возрастает, при этом моменты закрытия тиристоров приближаются к «опасной» точке ($\beta = 0$), где происходит опрокидывание инвертора. В инверторном режиме минимальный угол опережения инвертора β_{min} должен быть больше угла коммутации γ. Кроме того, после прекращения тока необходимо некоторое время, измеряемое углом δ, для восстановления запирающих свойств тиристора. Для обеспечения безопасности инвертирования должно выполняться следующее условие:

$$\beta_{min} \geqslant \gamma + \delta + \Delta, \qquad (11\text{-}13)$$

где β_{min} — минимальный угол опережения инвертора; δ — угол восстановления запирающих свойств (время выключения) тиристора; Δ — угол запаса, обусловленный асимметрией управляющих импульсов.

Выражение (11-13) показывает, что в инверторном режиме невозможно использовать весь диапазон регулирования э. д. с. преобразователя, т. е. получить максимальную э. д. с. инвертора E_{d0}.

Если в (11-13) угол γ выразить через I_d, то

$$\beta_{min} \geqslant \arccos\left[\cos(\delta+\Delta) - \frac{u_к\,\%\,I_d}{100 I_{d,н}}\right]. \quad (11\text{-}14)$$

Ограничение угла β можно осуществлять двумя способами:

а) постоянным ограничением, рассчитанным по (11-14) при $I_d = I_{d,max}$;

б) зависимым ограничением в функции тока нагрузки I_d; в этом случае в (11-14) принимается знак равенства.

На рис. 11-5 приведена зависимость $\beta_{min} = f(I_d)$, построенная согласно (11-14) при $\delta = 5°$; $\Delta = 5°$ для различных значений $u_к$ %.

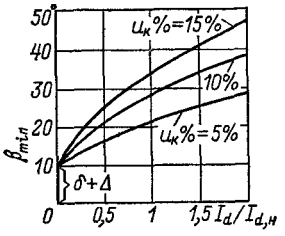


Рис 11-5. Зависимость β_{min} в функции тока нагрузки для различных значений $u_к$, %.

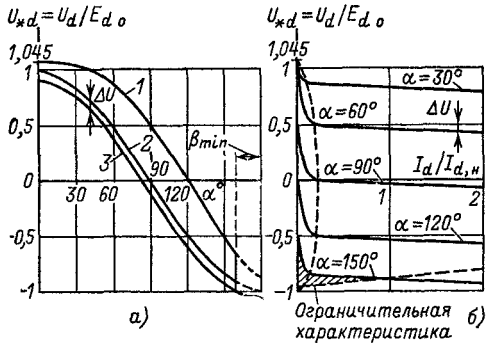


Рис. 11-6. Характеристики нереверсивного преобразователя.

а — регулировочные $U_d = f(\alpha)$ при $I_d = \text{const}$; *б* — внешние $U_d = f(I_d)$ при $\alpha = \text{const}$.

Характеристики тиристорного преобразователя. Регулировочные характеристики представляют собой семейство зависимостей $U_d = f(\alpha)$ при различных значениях I_d. На рис. 11-6, *а* приведены основные характеристики этого семейства (выпрямленное напряжение выражено в относительных единицах): кривая *1* — при $I_d = 0$; кривая *2* — при гранично-непрерывном токе; кривая *3* — при максимальном токе.

Указанные характеристики образуют четыре области: ниже кривой *3* — область аварийных токов, между кривыми *2* и *3* — область непрерывных токов, между кривыми *1* и *2* — область прерывистых токов, выше кривой *1* — область отсутствия тока.

Регулировочные характеристики показывают, что при постоянном значении угла α выпрямленное напряжение увеличивается по мере уменьшения тока, вызванного изменением противо-э д. с. При постоянном значении выпрямленного напряжения режиму непрерывного тока соответствует значительно меньший диапазон углов регулирования, чем в режиме прерывистого тока.

Внешние характеристики представляют собой семейство зависимостей $U_d = f(I_d)$ при различных значениях α. На рис. 11-6, *б* приведены некоторые кривые этого семейства. Пунктирная линия представляет собой часть эллипса и разделяет график на две зоны. Левее этой линии — зона прерывистых токов, правее — зона непрерывных токов. В режиме непрерывного тока выпрямленное напряжение преобразователя снижается с ростом тока вследствие коммутационного падения напряжения. Поэтому внешние характеристики в зоне непрерывного тока имеют вид прямой линии с постоянным наклоном. В режиме прерывистых токов коммутационное падение напряжения отсутствует, а падение напряжения на активном сопротивлении нагрузки пренебрежимо мало, поэтому среднее значение прерывистого тока в основном определяется индуктивностью цепи нагрузки и углом проводимости λ. Это приводит к значительному увеличению U_d в режиме прерывистого тока— характеристики «задираются» вверх.

В инверторном режиме внешние характеристики в зоне прерывистых токов также «задираются» вверх, однако при этом абсолютное значение выпрямленного напряжения значительно уменьшается.

Максимальное напряжение инвертора

$$|U_и| \leqslant E_{d0}\left[\cos(\delta+\Delta) - 0{,}5\frac{u_к\,\%\,I_d}{100 I_{d,н}}\right]. \quad (11\text{-}15)$$

Знаку равенства соответствует так называемая ограничительная характеристика инвертора, определяющая его максимальное напряжение, при котором исключается «опрокидывание» инвертора. Эта характеристика показана пунктиром на рис. 11-6, *б*. При ограничении угла β в функции тока максимальное напряжение инвертора будет определяться ограничительной характеристикой. При постоянном ограничении угла β часть напряжения инвертора при малых токах не используется. На рис. 11-6, *б* при $\beta_{min} = 30°$ эта часть графика заштрихована.

11-3. СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Системы импульсно-фазового управления (СИФУ) обеспечивают формирование управляющих импульсов силовых тиристоров в определенные моменты времени и в соответствии с требуемым значением напряжения (тока) на нагрузке. Угол сдвига этих импульсов относительно точек естественной коммутации, равный углу регулирования α, зависит от значения и знака входного сигнала u_y. Функционально СИФУ можно представить в виде пяти основных узлов (рис. 11-7).

Входное устройство (ВУ) *UV* осуществляет согласование входа СИФУ с выходом источника управляющего сигнала, обеспечивает заданный диапазон (ограничение) углов

$\alpha_{min} \leqslant \alpha \leqslant \alpha_{max}$, а также задает некоторый угол α_0 при $u_y = 0$. Сигнал с выхода *UV* поступает на фазосмещающее устройство (ФСУ) *UVF*, в котором осуществляется формирование системы импульсов, имеющих сдвиг фаз относительно точек естественной коммутации вентилей, пропорциональный этому сигналу. Узел ФСУ, как правило, строится по принципу «вертикального» управления, который заключается в сравнении двух напряжений: управляющего u_y и переменного опорного $u_{оп}$ (рис. 11-8). Импульс $u_{имп}$ вырабатывается нуль-органом, на входе которого сравниваются u_y и

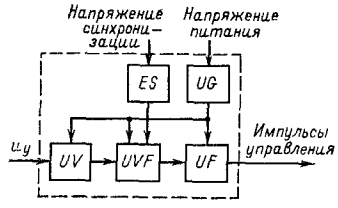


Рис. 11-7. Функциональная схема СИФУ.

UV — входное устройство; *UVF* — фазосмещающее устройство; *UF* — формирующее устройство; *ES* — узел синхронизации; *UG* — источник питания.

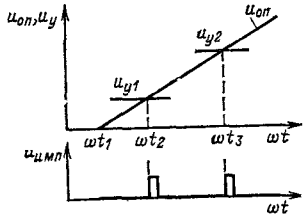


Рис. 11-8. Формирование импульсов по принципу вертикального управления.

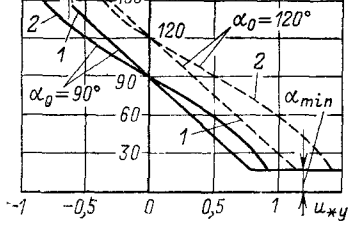


Рис. 11-9. Фазовые характеристики СИФУ при различных значениях начального угла α_0.

1 — при пилообразном опорном напряжении; *2* — при синусоидальном опорном напряжении.

$u_{оп}$, в момент равенства этих напряжений. При изменении u_y обеспечивается задержка формирования импульса относительно момента времени ωt_1, соответствующего началу формирования опорного напряжения $u_{оп}$. При совмещении момента времени ωt_1 с точкой естественной коммутации вентиля изменением напряжения u_y регулируются фаза открытия вентиля и соответственно выпрямленное напряжение. Отрезки времени $\omega t_1 - \omega t_2$ и $\omega t_1 - \omega t_3$ будут соответствовать углу регулирования α. Длительность рабочего участка опорного напряжения должна быть равна диапазону регулирования угла α и составлять 180°. Форма опорного напряжения $u_{оп}$ определяет зависимость угла регулирования α от напряжения u_y и называется фазовой характеристикой системы управления. В ФСУ применяют два вида опорных напряжений — пилообразное и синусоидальное.

При *пилообразном опорном напряжении* угол α связан с входным сигналом u_y следующим соотношением:

$$\alpha = \alpha_0 - u_{*y} \cdot 90°, \qquad (11\text{-}16)$$

где α_0 — начальный угол при $u_y = 0$; $u_{*y} = u_y / u_{y90°}$ — напряжение управления, отн. ед.; u_y — текущее значение напряжения управления; $u_{y90°}$ — напряжение, соответствующее изменению угла регулирования на 90°.

Зависимости (11-16) соответствует линейная фазовая характеристика (рис. 11-9, кривая *1*).

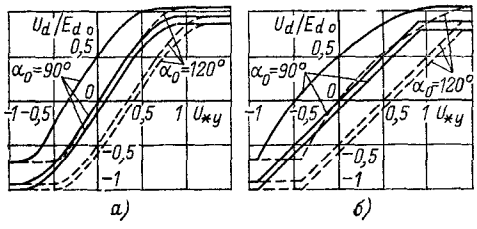


Рис. 11-10. Регулировочные характеристики нереверсивного преобразователя при различных значениях начального угла α_0.

а — с пилообразным опорным напряжением; *б* — с синусоидальным напряжением.

При *синусоидальном опорном напряжении*

$$\cos \alpha = u_{*y} + \cos \alpha_0 \qquad (11\text{-}17)$$

фазовая характеристика имеет арккосинусоидальный характер (рис. 11-9, кривая *2*).

Регулировочные характеристики преобразователя $U_d = f(u_y)$ при пилообразном и синусоидальном опорных напряжениях приведены на рис. 11-10; из них видно, что коэффициент усиления преобразователя по напряжению k является величиной переменной. При пилообразном опорном напряжении

$$k = 1{,}57 \frac{E_{d\,0}}{u_{y90°}} \sin \alpha \qquad (11\text{-}18)$$

зависит от угла регулирования и не зависит от выпрямленного тока. При синусоидальном опорном напряжении

$$k = \frac{E_{d\,0}}{u_{y90°}} \qquad (11\text{-}19)$$

является переменной величиной только в режиме прерывистых токов.

На рис. 11-9 и 11-10 сплошными линиями показаны характеристики при $\alpha_0 = 90°$, пунктирными — при $\alpha_0 = 120°$.

Для трехфазной мостовой схемы, имеющей шесть силовых вентилей, ФСУ имеет шесть каналов формирования опорных напряжений, причем эти напряжения имеют сдвиг фаз по каналам, равный интервалу работы силовых вентилей (60°). В каждом канале опорное напряжение формируется с частотой, равной частоте напряжения сети (50 Гц), причем начало формирования совпадает во времени с точкой естественной коммутации вентиля данного канала, т. е. работа формирователя опорного напряжения синхронизирована с силовым напряжением. Эта синхронизация осуществляется с помощью узла синхронизации (УС) *ES* (рис. 11-7). Как правило, УС состоит из синхронизирующего трехфазного трансформатора, подключаемого к сети, синхронизированной с силовой сетью, и фильтра.

В задачу фильтра входит устранение искажений формы синхронизирующего напряжения. Применяются два вида фильтров: пассивные *RC*-фильтры, имеющие фазовый сдвиг, и резонансные *RLC*-фильтры, не имеющие фазового сдвига.

Мощность импульсов, формирующихся в фазосмещающем устройстве, недостаточна для управления силовыми вентилями. Управляющие импульсы необходимой мощности, заданных формы и длительности вырабатываются формирующим устройством (ФУ) *UF* (рис. 11-7), которое также обеспечивает потенциальное разделение силовой части и системы управления. Основными параметрами управляющих импульсов, вырабатываемых ФУ, являются следующие:

1) напряжение и ток управляющих импульсов. Для обеспечения четкого включения тиристоров управляющие импульсы должны обладать определенной мощностью. Требуемые значения амплитуд напряжения и тока импульсов приводятся в паспортных данных тиристоров. Значения напряжений и токов, необходимые для открытия вентилей одного и того же типа, имеют значительный разброс, поэтому при недостаточной мощности импульсов могут наблюдаться пропуски включения тиристоров; в то же время чрезмерная мощность импульсов приводит к неоправданному росту потерь в управляющем $p-n$-переходе, а также к увеличению габаритов системы управления. Для большинства наиболее распространенных типов тиристоров требуемая амплитуда напряжения импульсов составляет 5—15 В, амплитуда тока 0,5—2 А;

2) длительность импульсов. Она не должна быть меньше времени нарастания тока тиристоров до значения, превосходящего ток удержания. Время нарастания тока определяется не только собственным временем включения тиристора, но и типом преобразователя и характером нагрузки. Возрастание длительности импульсов нежелательно из-за увеличения потерь в управляющем переходе тиристора. Обычно минимальная длительность управляющих импульсов составляет 150—200 мкс (для надежного управления тиристорами длительность должна быть в пределах 200—400 мкс). В некоторых схемах к длительности импульсов предъявляют дополнительные требования, обусловленные необходимостью обеспечения запуска преобразователя и его работы в режиме прерывистых токов. Так, в трехфазной мостовой схеме длительность импульсов должна составлять не менее 60°. Однако в подобных случаях прибегают к сдваиванию узких импульсов;

3) крутизна импульсов. Четкое включение тиристоров в заданные моменты времени может быть достигнуто только при высокой крутизне переднего фронта управляющих импульсов. Существующие системы управления (особенно полупроводниковые) обеспечивают достаточную крутизну импульсов (10^5 А/с и более);

4) мощность управления. Значительным преимуществом тиристоров является малая мощность управления, т. е. мощность сигнала, подаваемого на вход СИФУ. При малой мощности легче получить большее быстродействие, создать простые и надежные замкнутые системы;

5) симметрия импульсов. Из-за наличия в схеме преобразователя различного рода несимметрии происходит нарушение заданной периодичности управляющих импульсов, что влечет за собой разброс, т. е. неравенство углов регулирования α по каналам системы управления. Асимметрия приводит к тому, что вентили открываются в неодинаковые моменты времени относительно точек естественной коммутации (т. е. с углами, отличающимися от заданного значения). Это в свою очередь приводит к неравномерной загрузке вентилей и фаз трансформатора, «всплескам» уравнительного тока в реверсивных преобразователях с совместным управлением и снижению надежности работы преобразователя в инверторном режиме. Последнее проявляется в том, что при работе преобразователя в инверторном режиме с углами опережения, близкими к β_{min}, на вентили вследствие влияния асимметрии может поступить импульс с углом $\beta<\beta_{min}$. Это повлечет за собой увеличение угла коммутации γ и в конечном итоге может привести к «опрокидыванию» инвертора. Практически невозможно добиться идеального равенства углов регулирования всех вентилей даже при тщательной настройке схемы управления преобразователем, поэтому асимметрию допускают в некоторых пределах. Допустимой асимметрией считается разброс значений углов по каналам $\pm 3°$. В связи с этим при наладке преобразователя необходимо учитывать асимметрию. Причинами асимметрии являются: несовпадение момента начала формирования опорного напряжения с точкой естественной коммутации вентилей, неидентичность формы опорных напряжений (разный наклон «пил») и т. д.

Оптимальным управляющим импульсом с точки зрения уменьшения времени включения тиристора и ограничения потерь в тиристоре от тока управления является импульс, изображенный на рис. 11-11. Короткий крутой пик значительной амплитуды в начале импульса предназначен для четкого включения тиристора с минимальным временем. Следующая за пиком часть импульса (постоянное напряжение) предназначена для поддержания тиристора в открытом состоянии до появления тока удержания $I_{уд}$, при котором тиристор остается включенным. Для увеличения устойчивости тиристора к скорости нарастания напряжения (при высоких скоростях нарастания напряжения тиристор может самопроизвольно открыть-

ся без управляющего импульса) желательно при запертом состоянии тиристора иметь отрицательное смещение на управляющем электроде 0,5—1,5 В. Амплитуда пика импульса должна быть примерно 30—40 В, постоянной части 10—20 В. Длительность импульса 250—400 мкс или 5—8°. Крутизна переднего фронта импульса должна быть в пределах 20—40 мкс.

Выходной формирователь ФУ должен удовлетворять перечисленным требованиям при формировании управляющего импульса. Кроме того, в его задачу входит сдваивание импульсов, что необходимо при запуске и работе трехфазной мостовой схемы в режиме прерывистого тока.

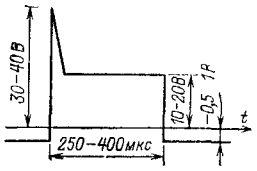


Рис. 11-11. Оптимальная форма импульса управления.

11-4. СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ

Защита от перенапряжений. Силовые схемы преобразователей содержат различного рода индуктивности (индуктивности рассеяния обмоток трансформаторов, анодных реакторов, нагрузки и т. д.). При коммутации тока в этих индуктивностях возникает э. д. с. самоиндукции, которая вызывает перенапряжение на тиристорах. Перенапряжения на закрытом тиристоре могут привести к его самопроизвольному открытию, при этом тиристор выходит из строя. Если же перенапряжения прикладываются в обратном направлении и напряжение при этом превысит значение $U_{заг}$, то произойдет электрический, а затем и тепловой пробой тиристора. Для ограничения перенапряжений применяют специальные средства защиты.

В тиристорных преобразователях различают следующие основные виды перенапряжений:

периодические коммутационные перенапряжения;

перенапряжения, связанные с включением и отключением преобразовательного трансформатора, работающего на холостом ходу (разомкнута цепь нагрузки);

перенапряжения, причиной которых является отключение на стороне переменного тока преобразователя, работающего на индуктивную нагрузку.

Первый вид перенапряжений обусловлен коммутацией вентилей, когда две фазы трансформатора через два открытых вентиля оказываются замкнутыми накоротко, при этом в выходящем из работы вентиле ток I_d спадает, в другом — нарастает. При спадании тока до нуля в первом вентиле под действием обратного напряжения начинает протекать обратный ток, обусловленный рассасыванием основных носителей тока. По окончании процесса рассасывания этих носителей ток резко падает. Скорость спадания обратного тока определяет э. д. с. самоиндукции, которая добавляется к обратному напряжению первого тиристора и может вызвать его пробой. Для уменьшения этого перенапряжения применяют защитные *RC*-цепочки, шунтирующие тиристор. Наличие этой цепочки создает контур разряда э. д. с. самоиндукции, что снижает ее значение.

Второй вид перенапряжений обусловлен коммутацией намагничивающего тока трансформатора при отключенной нагрузке преобразователя. В этом случае возникающая э. д. с. самоиндукции в сетевых обмотках трансформатора индуцируется в вентильных обмотках и прикладывается к некоторым вентилям. Для уменьшения этих перенапряжений также применяются *RC*-цепочки, включаемые на стороне переменного тока.

Третий вид перенапряжения характерен для преобразователей, работающих на обмотку возбуждения электрических машин и подключаемых к сети через токоограничивающие реакторы. Перенапряжения возникают при отключении автомата на стороне переменного тока. При резком уменьшении тока нагрузки создается э. д. с. самоиндукции в обмотке возбуждения, которая прикладывается к тиристорам в прямом направлении. Ликвидация этих перенапряжений заключается в создании контура, с помощью которого создается цепь разряда этой э. д. с. (шунтируется обмотка возбуждения). Наиболее простым вариантом создания такого контура в нереверсивном возбудителе является цепь, устанавливаемая на выходе последнего и состоящая из резистора гашения с диодом.

Защита от аварийных токов. При работе вентильных преобразователей могут возникать аварийные режимы, сопровождающиеся недопустимыми по длительности и значению токами через вентили.

Внутренние короткие замыкания в преобразователе возникают вследствие пробоя тиристора или потери тиристором запирающих свойств. Причинами пробоя тиристора могут явиться: высокая скорость нарастания тока через тиристор, нарушение механической целостности структуры тиристора при недопустимом токе, усталостное разрушение ее при цикличной токовой нагрузке преобразователя. Потеря тиристором запирающих свойств, как правило, является следствием перенапряжений и высоких скоростей нарастания анодного напряжения.

Защита от внутренних коротких замыканий осуществляется быстродействующими плавкими предохранителями типа ПНБ-5 или ПНБ-5М, устанавливаемыми последовательно с тиристорами. При пробое тиристора цепь разрывается плавкой вставкой предохранителя.

При параллельном соединении тиристоров применение предохранителей наиболее эффективно, так как при пробое одного из тиристоров преобразователь еще работоспособен и его отключения не требуется. Достаточно отключить только поврежденный тиристор и подать сигнал в схему индикации. В преобразователях с одним тиристором в плече силового моста применение предохранителей необязательно, так как в этом случае пробой одного из тиристоров лишает работоспособности весь преобразователь, который должен быть отключен от сети. Отключение осуществляется быстродействующим автоматическим выключателем на стороне переменного тока. В качестве

чувствительного элемента используют трансформаторы тока или герконные реле.

Внешние короткие замыкания на входе в выпрямитель происходят при пробое изоляторов на шинах или в кабеле от трансформатора или токоограничивающего реактора до выпрямителя. Защита осуществляется автоматическими воздушными или масляными выключателями на стороне переменного тока. Масляные выключатели устанавливаются в ячейках распределительных устройств цеховой подстанции и обеспечивают защиту преобразовательных трансформаторов и питающих фидеров при напряжении 6 или 10 кВ; собственное время отключения масляного выключателя $t_{ср}=0{,}08\div0{,}14$ с. Уставка срабатывания защиты $I_{с.з}=(5\div10)\,I_{ф.н}$.

«Опрокидывание» инвертора возникает вследствие пропуска очередного управляющего импульса или снижения напряжения сети переменного тока, что приводит к увеличению тока инвертора и угла коммутации, который может стать больше угла β_{min}. Причиной опрокидывания инвертора может быть также открытие тиристора под действием помех при положительных значениях напряжения сети.

При внешних к. з. на выходе и «опрокидывании» инвертора преобразователь отключается от нагрузки и управляющие импульсы блокируются или задвигаются в инверторный режим до значения β_{min}. Данная защита называется сеточной или защитой по управляющему электроду. Она является дополнительным средством и предназначена для предотвращения развития аварии, т. е. для исключения перехода аварийного тока на последующие по порядку работы тиристоры. В качестве чувствительного элемента используются реле «дифференциальный шунт» (РДШ), герконные реле в цепи нагрузки, датчики (трансформаторы тока) на стороне переменного тока. Отключение осуществляется быстродействующим автоматическим выключателем (например, типов ВАБ, ВАТ, А3700) непосредственно от сигналов первичных датчиков или так называемых блоков токовой защиты (БТЗ), куда поступают сигналы первичных датчиков.

Защитные аппараты характеризуются быстродействием, селективностью и чувствительностью.

Быстродействие защиты определяется полным временем $t_п$ отключения защитного аппарата, которое имеет две составляющие: собственное время срабатывания датчика $t_{соб}$ (интервал времени между моментом срабатывания датчика максимального тока и началом разведения силовых контактов автомата) и время горения дуги $t_{дуг}$. Уменьшение времени $t_{дуг}$ имеет предел, так как при его значительном уменьшении увеличивается скорость спадания тока, что обусловливает значительные перенапряжения на силовых тиристорах; поэтому для повышения быстродействия защиты уменьшают собственное время срабатывания $t_{соб}$. Малая теплоемкость кремниевого элемента и обусловленная ею высокая чувствительность тиристоров к значению и продолжительности протекания аварийных токов определяют высокие требования к быстродействию защиты тиристорных преобразователей.

Селективность — обеспечение выборочного срабатывания той или иной защиты в зависимости от значения и характера аварийного тока. Например, при внутреннем к. з. отключается только поврежденный вентиль (при параллельном включении вентилей в плече) без нарушения работы исправных вентилей и преобразователя в целом; при внешних к. з. на выходе выпрямителя не должно происходить отключения масляного выключателя на стороне переменного тока.

Чувствительность определяется отклонением тока срабатывания защиты от заданной уставки.

11-5. НАЛАДКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Наладка заключается в проведении комплекса работ по испытанию, проверке и настройке тиристорного преобразователя с целью обеспечения его надежной работы в технологических режимах работы электропривода. В настоящее время заводы-изготовители постоянно совершенствуют схемы и конструкции тиристорных преобразователей и систем управления и, как правило, поставляют их заказчикам предварительно проверенными и налаженными. Это позволяет значительно сократить объем работ по наладке преобразователя на месте монтажа за счет исключения ряда промежуточных операций, рекомендуемых заводскими инструкциями, без ущерба для качества работы преобразователя и его надежности. В полном объеме наладочные работы, рекомендованные заводской инструкцией, следует выполнять только в том случае, если в процессе проверки системы управления на функционирование выявятся большие отклонения выходных параметров и характеристик системы управления. Такая точка зрения подтверждается опытом наладки преобразователей на ряде промышленных объектов, введенных в эксплуатацию в 9-й и 10-й пятилетках.

Для обеспечения качественного выполнения наладочных работ используются электроизмерительные приборы, приспособления, осциллографы, класс точности которых должен быть 0,5—1. Желательно применять электронные осциллографы с калиброванной длительностью развертки или калибрационными метками, допускающие синхронизацию от сети и внешнего источника, имеющие вход внешнего модулятора яркости луча (например, типов С1-49, С1-68 и др.); удобны в работе также двухлучевые осциллографы (например, С1-64 и др.).

Кроме того, для наладки тиристорных преобразователей могут применяться фазорегуляторы типов ВАФ-85, ФУ-2 или другие приспособления для фазировки и проверки асимметрии управляющих импульсов, разработанные и изготовленные отдельными организациями.

Наладка нереверсивного преобразователя включает проверку силовой части схемы, настройку системы управления и защиты, а также проверку преобразователя по рабочей схеме от ручного управления.

Наладка элементов силовой схемы преобразователя (преобразовательного трансформатора и автоматического выключателя) произ-

водится методами, приведенными в соответствующих разделах справочника. Дополнительно проверяется правильность чередования фаз питающей сети по линейным напряжениям вентильных обмоток трансформатора с помощью фазоуказателя ФУ-2, прибора ВАФ-85 или электронного осциллографа. В последнем случае развертка осциллографа должна синхронизироваться с измеряемым напряжением. Наладка токоограничивающих и сглаживающих реакторов заключается в измерении активных сопротивлений и проверке соответствия паспортных данных принципиальной схеме.

Наладка схемы выпрямления выполняется в следующей последовательности:

а) производится тщательный визуальный осмотр силовых шкафов и силовых блоков преобразователя с точки зрения правильности ошиновки, комплектности электрооборудования и его соответствия принципиальным схемам, а также отсутствия механических повреждений и посторонних предметов;

б) проверяется наличие заземления шкафов преобразователей;

в) проверяется правильность включения индуктивных делителей тока согласно принципиальной схеме;

г) проверяется целостность защитных *RC*-цепей;

д) проверяется правильность коммутации контрольных гнезд;

е) проверяется исправность сигнальных микропереключателей, установленных на быстродействующих предохранителях;

ж) измеряется сопротивление изоляции токоведущих цепей по отношению к корпусу и между цепями, электрически не связанными друг с другом. Сопротивление изоляции в холодном состоянии должно составлять не менее 5 МОм для агрегатов с воздушным охлаждением и с водяным охлаждением при незаполненной системе охлаждения. При измерении управляющие электроды тиристоров должны быть надежно соединены с анодным и катодным выводами с помощью временных перемычек; диоды и конденсатор должны быть закорочены. Места установки временных перемычек фиксируются в рабочей тетради;

з) производится испытание электрической прочности изоляции повышенным напряжением переменного тока частотой 50 Гц в течение 1 мин. В табл. 11-2 приведены значения испытательного напряжения в зависимости от номинальных значений напряжения испытуемой цепи;

и) снимаются временные перемычки, установленные при испытаниях;

к) производится визуальная проверка подсоединения преобразователя к напряжению питающей сети по маркировке шин;

л) проверяется «прозвонкой» правильность подсоединения питающих шин или кабеля трансформатора до вентильных секций.

Наладка СИФУ выполняется в следующей последовательности:

а) производится тщательный осмотр блоков системы управления на отсутствие механических повреждений, исправность потенциометров, наличие сигнальных ламп, а также на комплектность и правильность установки ячеек в блоках и отсутствие в ячейках видимых замыканий и разрывов печатного монтажа;

Таблица 11-2

Значения испытательного напряжения

Номинальное напряжение цепи по изоляции, В	Испытательное напряжение (действующее значение), В
До 24 включительно	500
25—50	1000
51—200	1500
201—500	2000
Выше 500	2,5 $E_{d,0}$+1000, но не менее 3000

Примечания: 1. За номинальное напряжение цепи по изоляции принимается наибольшее из номинальных напряжений (действующее значение), воздействующих на изоляцию проверяемой цепи.

2 При испытаниях агрегатов с аппаратурой, испытанной на заводе — изготовителе этой аппаратуры, испытательное напряжение снижается на 10 %.

б) проверяются напряжения источников питания на соответствие средних значений и амплитуды пульсаций техническим данным, приведенным в инструкции завода-изготовителя. Превышение допустимого уровня пульсаций может привести к существенному ухудшению работы СИФУ. Амплитуда пульсаций измеряется с помощью электронного осциллографа в режиме измерения переменной составляющей. Наличие повышенных пульсаций напряжения свидетельствует о неисправности или плохом качестве элементов фильтра источников питания;

в) проверяется правильность чередования фаз сети собственных нужд и правильность ее подключения к преобразователю; проверка правильности чередования фаз производится непосредственно на входных зажимах узла синхронизации с помощью фазоуказателя ФУ-2, прибора ВАФ-85 или электронного осциллографа;

г) производится проверка узла синхронизации и фильтров. Проверяется с помощью электронного осциллографа соответствие фазировки выходных напряжений синхронизирующего и преобразовательного трансформаторов; в случае сдвига фаз, вызванного различными группами соединений преобразовательного трансформатора и трансформатора собственных нужд, последний устраняется переключением перемычек в синхронизирующем трансформаторе. Проверяется асимметрия фаз выходных напряжений узла синхронизации, вызванная влиянием фильтров, входящих в его состав. При необходимости должна производиться подстройка фильтров с целью уменьшения фазовой асимметрии выходных напряжений синхронизирующего трансформатора.

Настройка пассивного фильтра (рис. 11-12) осуществляется регулировкой резисторов *R1*, *R2*, причем резистор *R1* в большей степени влияет на фазовый сдвиг φ, а резистор *R2* — на амплитуду выходного напряжения. При настройке обеспечиваются требуемые фазовый сдвиг и амплитуда выходного напряжения, указанные в заводской инструкции. Особенностью схемы такого фильтра является взаимное влияние органов настройки амплитуды и фазы

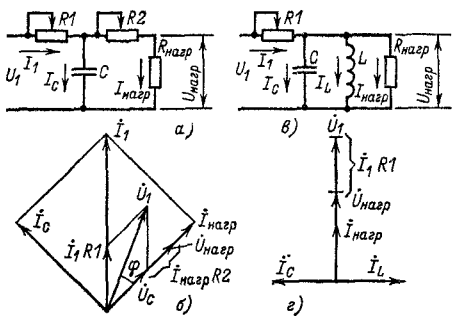


Рис. 11-12. Схемы фильтров, применяемые в СИФУ, и их векторные диаграммы.

а, б — пассивный фильтр; *в, г* — резонансный фильтр.

выходного напряжения; поэтому при настройке сначала устанавливается требуемый фазовый сдвиг, а затем амплитуда; после этого регулируемые параметры вновь поочередно подстраиваются до получения требуемых значений.

При настройке резонансного фильтра должно быть обеспечено равенство амплитуд токов I_C и I_L (рис. 11-12, *г*). При этом фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями равен нулю. Равенство токов обеспечивается регулировкой емкости конденсатора C или индуктивности дросселя L. Как правило, регулируется индуктивность путем изменения зазора дросселя. Регулировка амплитуды выходного напряжения осуществляется резистором $R1$;

д) проверяются форма и правильность чередования опорных напряжений $u_{оп}$; проверка осуществляется электронным осциллографом при его синхронизации от сети; при пилообразной форме опорных напряжений особое внимание следует обратить на линейность «пилы» в рабочем диапазоне;

е) проверяются наличие и параметры управляющих импульсов на управляющих электродах тиристоров; проверка производится электронным осциллографом на контрольных гнездах силовых блоков, параметры импульсов должны соответствовать приведенным в инструкции завода-изготовителя. При значительных отклонениях амплитуды импульсов производится проверка параметров импульсов на первичных обмотках импульсных трансформаторов; идентичность амплитуды импульсов всех каналов управления характеризует нормальную работу формирователей импульсов; отклонения амплитуды импульсов на управляющих электродах могут быть вызваны различием сопротивлений переходов катод — управляющий электрод тиристоров, а также неисправностью цепей размагничивания импульсных трансформаторов. Одновременно контролируется положение импульсов относительно линейного или фазного напряжения собственных нужд преобразователя; для трехфазной мостовой схемы управляющие импульсы по соседним каналам должны быть сдвинуты относительно друг друга на 60°;

ж) проверяются правильность чередования и фазировка управляющих импульсов; при совпадении групп преобразовательного трансформатора и трансформатора собственных нужд проверка производится по напряжению собственных нужд, при несовпадении групп — по анодному напряжению или при его отсутствии по выходному напряжению синхронизирующего трансформатора. При анодном напряжении выше 500 В фазировку также рекомендуется производить по напряжению собственных нужд или выходному напряжению синхронизирующего трансформатора. Фазировка выполняется обычно с помощью осциллографа, синхронизированного с сетью, или фазорегулятора. Существенно облегчают и ускоряют выполнение этих операций специальные приборы, разработанные отдельными организациями, такие как: РСЦ (ЛенПЭО ВНИИПЭМ), «Синхроимпульс» (ПНУ треста Севзапэлектромонтаж), «Фарада» (ПНУ треста Уралэлектромонтаж), прибор для измерения разности фаз с использованием фазовращателя и формирователя импульсов (ВНИПИ Тяжпромэлектропроект совместно с ПНУ треста Центроэлектромонтаж) и др. Фазировка управляющих импульсов наиболее часто выполняется по линейному напряжению. Ниже приведена последовательность наладочных операций при фазировке по анодному напряжению:

производится калибровка развертки осциллографа синусоидальным напряжением. Для этого на вход осциллографа подается линейное анодное напряжение, например u_{AC}, подключая фазу *А* на вход *У*, а фазу *С* — на зажим «корпус» осциллографа, выбирается удобный масштаб (число градусов на 1 см развертки), при этом положительная полуволна синусоиды u_{AC} должна занимать почти весь экран. Необходимо помнить, что при искажении формы кривой напряжения фильтровать его нельзя, так как при этом появится сдвиг по фазе, определяемый фильтром, и фазировка будет неправильной. Подача анодного напряжения на осциллограф должна производиться в соответствии с правилами техники безопасности через специальный измерительный трансформатор с известным фазовым сдвигом между напряжениями первичной и вторичной обмоток, который должен учитываться при измерении; корпус осциллографа заземляется;

проверяется значение начального угла регулирования α_0 (при $u_у=0$) по отношению к синусоиде анодного напряжения u_{AC} для вентиля *1* (рис. 11-13). На экране осциллографа отмечается точка перехода напряжения u_{AC} через нуль в положительную область; на вход осциллографа подаются управляющие импульсы вентиля *1* непосредственно с управляющего электрода; импульсы должны располагаться под положительной полуволной синусоиды u_{AC}; производится замер α_0; угол между замеченной на экране точкой и передним фронтом первого из сдвоенных импульсов управления будет начальным углом для данного тиристора; для нереверсивного преобразователя он должен составлять 120°;

поочередно подаются на вход осциллографа управляющие импульсы остальных вентилей в строгой последовательности их работы (*1, 2, 3, 4, 5, 6*); импульсы должны следовать друг за другом со сдвигом 60° (рис. 11-13);

з) проверяется асимметрия управляющих импульсов, которая может быть обусловлена неправильной настройкой и дрейфом характе-

ристик элементов СИФУ; асимметрия импульсов Δ характеризуется суммой двух составляющих

$$\Delta = \Delta' + \Delta'',$$

где Δ' — составляющая асимметрии управляющих импульсов, обусловленная несимметрией моментов формирования опорных напряжений; Δ'' — составляющая асимметрии управляющих импульсов, вызванная различной амплитудой опорных напряжений; для пилообразных опорных напряжений эта составляющая характеризуется различным наклоном «пил».

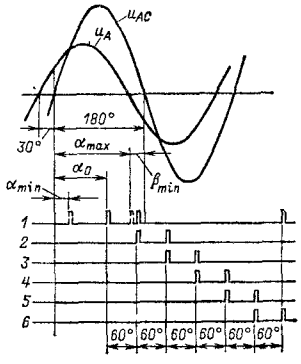


Рис. 11-13. Диаграммы напряжений и импульсов при фазировке.

1—6 — обозначения тиристоров трехфазной мостовой схемы.

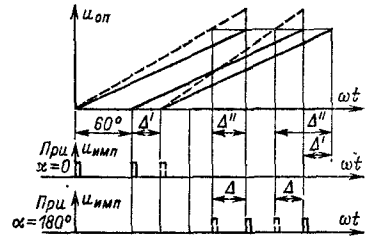


Рис. 11-14. Асимметрия импульсов и ее составляющие.

На рис. 11-14 показаны два опорных пилообразных напряжения соседних каналов СИФУ; при правильной настройке они показаны сплошными линиями, при неправильной — пунктирными. Идеальная настройка предполагает равенство нулю обеих составляющих асимметрии импульсов. На практике, однако, этого достичь не удается из-за погрешностей измерения. Составляющая асимметрии Δ' может быть определена при угле регулирования $\alpha=0$. Устранение асимметрии достигается настройкой опорных напряжений в такой последовательности. Вначале на вход осциллографа подают поочередно опорные напряжения всех каналов СИФУ и регулировкой фильтров устраняют составляющую асимметрии Δ'. Устранять указанную составляющую можно и другим способом, при котором на вход осциллографа подают поочередно импульсы всех каналов с углом регулирования $\alpha=0$. Для этого снимают ограничение минимального угла регулирования и с помощью внешнего источника, подключенного на вход СИФУ, устанавливают угол $\alpha=0$. При $\Delta'=0$ импульсы последующих каналов должны следовать через 60°.

После устранения составляющей асимметрии Δ' настраивают амплитуду опорных напряжений (наклон «пил») с целью устранения составляющей Δ''. Для этого с помощью внешнего источника устанавливают максимальный угол α_{max} (выбор угла α_{max} и методику его установки см. ниже). Подавая на вход осциллографа импульсы и регулируя наклон «пил», обеспечивают чередование импульсов по каналам через 60°;

и) устанавливают предельные углы регулирования α_{min} и α_{max}. Угол α_{min} ограничивает напряжение преобразователя в выпрямительном режиме. В нереверсивном преобразователе необходимость его ограничения вызвана различными причинами:

при пилообразной форме опорного напряжения и работе преобразователя в составе замкнутой САР коэффициент усиления преобразователя при малых значениях α существенно уменьшается, что приводит к ухудшению динамических свойств замкнутой САР;

при синусоидальной форме опорного напряжения наблюдается нечеткая работа узлов сравнения СИФУ при малых значениях α.

В первом случае α_{min} устанавливают 15—20 °, во втором 8—10 °.

Угол α_{max} (β_{min}) ограничивает напряжение преобразователя в инверторном режиме и обеспечивает режим безаварийного инвертирования. При нереверсивном преобразователе инверторный режим возможен в электроприводе с реверсом потока возбуждения или при работе преобразователя на нагрузку с большой индуктивностью (например, обмотка возбуждения электрической машины). В первом случае значение β_{min} устанавливают в соответствии с аналогичными рекомендациями для реверсивных преобразователей (см. § 11-7); во втором случае «опрокидывание» инвертора не приводит к возникновению аварийных токов, а влияет только на процесс спадания тока нагрузки; значение β_{min} принимается в пределах 10—15 °. При работе на якорь двигателя без реверса потока возбуждения инверторный режим в нереверсивном преобразователе практически отсутствует, значение β_{min} не имеет существенного значения и может приниматься 30—60 °.

Измерение и установка предельных углов регулирования производится в следующем порядке:

на вход осциллографа подается линейное напряжение u_{AC}, и производится калибровка осциллографа аналогично тому, как показано в п. «ж»;

на вход осциллографа подается импульс первого канала; при $u_y=0$ измеряется начальный угол путем отсчета фазы переднего фронта управляющего импульса от отмеченной на осциллографе точки прохождения синусоиды через нуль;

на вход СИФУ подается максимальное напряжение u_y с полярностью, соответствующей выпрямительному режиму; изменением

ограничения устанавливается фаза управляющего импульса в соответствии с принятым значением α_{min}; при изменении полярности входного сигнала u_y изменением ограничения устанавливается фаза управляющего импульса в соответствии с принятым значением β_{min};

к) устанавливается начальный угол $\alpha_0 = 120°$;

л) снимается фазовая характеристика СИФУ $\alpha = f(u_y)$, где u_y — сигнал на входе входного устройства.

Измерение углов регулирования производится непосредственно на управляющих электродах тиристоров, измерительные приборы или осциллограф подключают к контрольным гнездам на силовых блоках. Характеристика снимается в одном из каналов СИФУ, например в первом, при условии, что в остальных каналах импульсы СИФУ симметричны. Снятые характеристики при опорном пилообразном и синусоидальном напряжениях должны иметь вид, указанный на рис. 11-9.

Проверка и настройка защиты преобразователя производятся сразу после настройки системы управления и проверки на функционирование систем охлаждения и сигнализации.

Защита от перенапряжений. Проверяют правильность подключения защитных RC-цепей и целостность элементов схемы.

Защита при внутренних коротких замыканиях. Проверяют соответствие уставки быстродействующих предохранителей принципиальной схеме, функционирование схемы сигнализации сгорания предохранителей и цепи отключения преобразователя при количестве сгоревших предохранителей, указанном в инструкции завода-изготовителя.

Защита при внешних к. з. на входе в выпрямитель. Проверка производится в два этапа.

На первом этапе проверяют функционирование вторичных цепей отключения автоматических воздушных и масляных выключателей имитацией сигнала датчика аварийного тока; при известных характеристиках датчиков тока производят предварительную настройку уставки срабатывания защиты (настройка вторичным током); уставка срабатывания защиты обычно приводится в проектной документации либо в инструкции завода-изготовителя.

На втором этапе производится проверка предварительно выставленных уставок защиты методом прогрузки первичным током в режиме однофазного или двухфазного к. з.; прогрузка осуществляется от постороннего нагрузочного устройства. В режиме однофазного к. з. осуществляется прогрузка каждой фазы в отдельности; испытание в режиме двухфазного к. з. выполняют попарно для двух фаз; в этом случае легко выявляются ошибки в соединении обмоток трансформаторов тока, которые могут остаться незамеченными при испытаниях в режиме однофазного к. з.

Защита при внешних к. з. на выходе преобразователя и «опрокидываниях» инвертора. Проверка производится в два этапа.

Первый этап аналогичен рассмотренному выше для защиты при внешних к. з. на входе в выпрямитель. Дополнительно проводят проверку срабатывания защиты по управляющему электроду; с этой целью контролируется с помощью осциллографа «срыв» или смещение управляющих импульсов до значения β_{min}.

На втором этапе проводят проверку предварительно выставленных уставок защиты методом прогрузки первичным током в рабочей схеме. Для этого на выходе преобразователя после автоматического выключателя и сглаживающего реактора устанавливают закоротку соответствующего сечения. Требуемое значение тока срабатывания защиты достигается плавным увеличением сигнала на входе СИФУ от постороннего источника. Прогрузку желательно производить при пониженном анодном напряжении; уставка срабатывания защиты $I_{ф.ср} = (2{,}1 \div 2{,}2) I_{d,н}$.

Контроль тока при прогрузке защиты производится прибором класса 0,5, подключаемым к шунту в цепи нагрузки; при этом щитовой прибор должен быть отключен.

Проверка преобразователя при работе на нагрузку. Предварительно при разомкнутой цепи нагрузки производится 3-кратное кратковременное включение и отключение преобразователя с целью проверки узлов защиты от перенапряжения и исправности силовых тиристоров.

При замкнутой цепи нагрузки и изменении сигнала на входе СИФУ снимается сквозная регулировочная характеристика $U_d = f(u_y)$ с целью проверки плавности изменения напряжения. Одновременно по форме выпрямленных тока или напряжения окончательно оценивается асимметрия.

По окончании наладки преобразователя составляется протокол.

Б. РЕВЕРСИВНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

11-6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Изменение направления (реверс) выпрямленного тока в цепи нагрузки тиристорного преобразователя может осуществляться одной вентильной группой силовых тиристоров с контактным переключением полярности цепи нагрузки (рис. 11-15, *а*) или двумя вентильными группами (рис. 11-15, *б*).

Последний вид реверсивного преобразователя получил название двухкомплектного и нашел наиболее широкое применение в промышленности. Каждый комплект представляет собой нереверсивный преобразователь (условно показанный одним вентилем), который обеспечивает одно из направлений тока нагрузки и носит название вентильной группы. Вентильные группы условно называются «вперед» и «назад».

Наибольшее распространение получили два вида силовых схем реверсивных преобразователей: перекрестная и встречно-параллельная (рис. 11-16). Обе схемы состоят из двух мостовых схем выпрямления, подключаемых к общей нагрузке. В перекрестной схеме питание силовых мостов осуществляется от двух тран-

сформаторов или от двух отдельных вентильных обмоток трехобмоточного трансформатора. На рис. 11-16, *а* показано питание вентильных групп от трехобмоточного трансформатора. Питание мостов во встречно-параллельной схеме осуществляется от одного комплекта вентильных обмоток трансформатора.

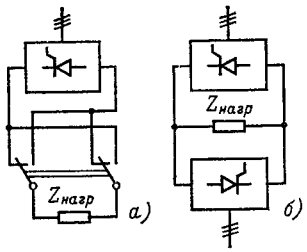


Рис. 11-15. Реверсивные преобразователи.

а — однокомплектный с переключателем полярности в цепи нагрузки; *б* — двухкомплектчый преобразователь.

Существуют два способа управления вентильными группами реверсивного преобразователя: совместное и раздельное.

нительного контура очень незначительно, поэтому без принятия специальных мер уравнительный ток может достичь недопустимых значений. Ограничивают уравнительный ток включением в уравнительный контур индуктивностей — уравнительных дросселей (реакторов). Уравнительные реакторы ограничивают ток только в прерывистом или граничнонепрерывном режиме.

Характер уравнительного тока зависит как от значений, так и от соотношения э. д. с. выпрямителя $E_{d,в}$ в инвертора $E_{d,и}$, т. е. от значений и соотношения углов регулирования вентильных групп; последнее определяет согласование характеристик вентильных групп. При постоянстве соотношения углов регулирования угол проводимости уравнительного тока имеет максимальное значение; в перекрестной схеме, когда один из углов регулирования вентильных групп равен 90°, во встречно-параллельной схеме, когда один из углов регулирования равен 60°.

По мере отклонения углов регулирования от указанных значений угол проводимости уравнительного тока уменьшается, т. е. ток становится более прерывистым. Для указанных максимальных значений уравнительный ток может иметь прерывистый, граничный и

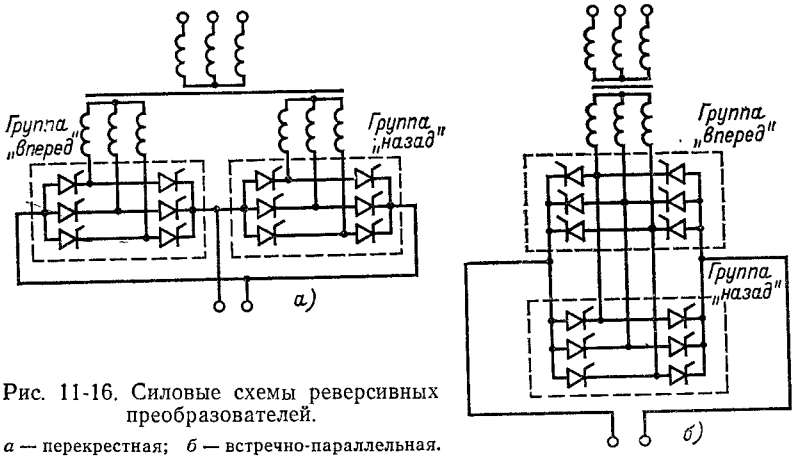


Рис. 11-16. Силовые схемы реверсивных преобразователей.

а — перекрестная; *б* — встречно-параллельная.

11-7. НАЛАДКА РЕВЕРСИВНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С СОВМЕСТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

При совместном управлении импульсы подаются на обе вентильные группы одновременно; при этом одна из них работает в выпрямительном, а другая — в инверторном режиме. Вследствие разности мгновенных значений выпрямленных э. д. с. возникает уравнительный ток в направлении проводимости тиристоров. Этот ток протекает только через вентильные группы, минуя нагрузку (рис. 11-15, б). Вентильная группа, работающая в инверторном режиме, является как бы источником противо-э. д. с., ограничивающей уравнительный ток. В перекрестной схеме имеется один контур уравнительного тока, что выгодно отличает эту схему от встречно-параллельной, имеющей два таких контура. Сопротивление урав-

непрерывный характер в зависимости от согласования характеристик вентильных групп.

Непрерывному уравнительному току соответствует $E_{d,в} > E_{d,и}$ или $\alpha_в + \alpha_и = 2\alpha_0 < 180° (\alpha_0 < 90°)$, где $\alpha_в$, $\alpha_н$ — углы регулирования групп «вперед» и «назад» соответственно. Непрерывный ток практически не ограничивается индуктивностью уравнительного контура, поэтому любой дрейф характеристик СИФУ приводит к резкому нарастанию уравнительного тока вплоть до аварийного. Работа в режиме непрерывного уравнительного тока может быть обеспечена только с помощью регуляторов уравнительного тока.

Прерывистому уравнительному току соответствует $E_{d,в} < E_{d,и}$ или $\alpha_в + \alpha_н = 2\alpha_0 > 180° (\alpha_0 > 90°)$. Значение уравнительного тока зависит от индуктивности уравнительного контура, а также от степени превышения углом α_0 значения 90°. При $\alpha_0 = 120°$ уравнительный ток имеет минимальное значение.

Граничному уравнительному току соответствует $E_{d,в}=E_{d,н}$ или $\alpha_в+\alpha_н=2\alpha_0=180°(\alpha_0=90°)$. Значение этого тока в перекрестной схеме (при $\alpha=90°$)

$$I_{ур,max}\approx 5{,}9\cdot10^{-4}\frac{E_{d0}}{L_{ур}}; \qquad (11\text{-}20)$$

во встречно-параллельной (при $\alpha=60°$)

$$I_{ур,max}\approx 9{,}1\cdot10^{-4}\frac{E_{d0}}{L_{ур}}, \qquad (11\text{-}21)$$

где $L_{ур}$ — суммарная индуктивность уравнительного контура, Гн (практически $L_{ур}$ определяется только индуктивностью уравнительных реакторов).

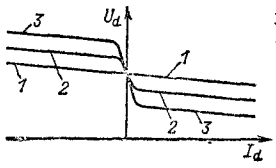


Рис. 11-17. Внешние характеристики реверсивного преобразователя с совместным управлением при различных значениях начального угла α_0.
1 — $\alpha_0=90°$; *2* — $90<\alpha_0<120°$; *3* — $\alpha_0=120°$.

Соотношение углов регулирования вентильных групп, обеспечивающее тот или иной характер уравнительного тока, должно сохраняться во всем диапазоне изменения углов регулирования. Для этого необходимо учитывать вынужденное ограничение напряжения в инверторном режиме и ограничивать напряжение в выпрямительном режиме в зависимости от угла β_{min}

$$\alpha_{min}\geqslant\beta_{min}. \qquad (11\text{-}22)$$

Уравнительный ток имеет максимальное значение при токе нагрузки, равном нулю; по мере увеличения тока нагрузки уравнительный ток уменьшается.

Согласование характеристик вентильных групп определяет также вид внешних характеристик реверсивного преобразователя с совместным управлением. На рис. 11-17 показана характеристика семейства внешних характеристик при различных согласованиях характеристик вентильных групп. При $\alpha_0=90°$ характеристика линейна (кривая *1*); по мере увеличения α_0 характеристика становится нелинейной (кривая 2). Нелинейность проявляется в наибольшей степени при $\alpha_0=120°$ (кривая *3*).

Линейность внешних характеристик реверсивного преобразователя и уравнительный ток связаны общим условием — согласованием характеристик вентильных групп. При $\alpha_0=90°$ согласование называется линейным, а уравнительный ток имеет максимальное значение, которое еще может быть ограничено уравнительным реактором. Однако практически указанный режим реализовать не удается, так как даже незначительные отклонения углов регулирования, вызванные асимметрией управляющих импульсов или дрейфом характеристик СИФУ и нарушающие заданное соотношение углов, могут вызвать появление непрерывного уравнительного тока.

При $\alpha_0>90°$ внешние характеристики становятся нелинейными, а уравнительный ток уменьшается. Такой способ получил название нелинейного согласования.

Перечисленные выше способы согласования характеристик вентильных групп не исключают возможности появления значительного (а иногда даже аварийного) уравнительного тока в динамических режимах, когда одна из групп, работающая в выпрямительном режиме, «скачком» переводится в инверторный режим, а группа, работающая в инверторном режиме, — в выпрямительный. Так как переход в выпрямительный режим происходит значительно быстрее, чем в инверторный, напряжение в уравнительном контуре резко возрастает, вызывая увеличение тока. Этот фактор ограничивает предельные возможности по быстродействию системы регулирования.

В реверсивных преобразователях с совместным управлением дополнительно применяется защита от аварийных токов в уравнительном контуре. При соотношении углов вентильных групп $\alpha_в+\alpha_н<180°(\alpha_0<90°)$ уравнительный ток становится непрерывным и уравнительные дроссели уже не могут его ограничивать; это приводит к быстрому нарастанию уравнительного тока до аварийного. При возникновении аварийного тока в уравнительном контуре осуществляется отключение быстродействующего автоматического выключателя (например, типа ВАБ, ВАТ или А3700) от сигнала чувствительного элемента — реле РДШ или герконного реле. Так как через автоматический выключатель протекает также ток нагрузки каждой вентильной группы, то настройка защиты уравнительного контура осуществляется одновременно с настройкой защиты от максимального тока в цепи нагрузки. При прогрузке защиты одной из вентильных групп вторая вентильная группа должна быть отключена.

При наладке реверсивного преобразователя с совместным управлением выполняются следующие операции:

а) производится наладка каждой вентильной группы по методике, изложенной в § 11-5. Особое внимание обращается на идентичность фазовых характеристик вентильных групп, которая предполагает равенство начальных и предельных углов регулирования, а также коэффициентов усиления по напряжению каждой из вентильных групп; кроме того, производятся проверка и тщательная настройка симметрии управляющих импульсов;

б) производятся выбор и установка начального угла α_0 вентильных групп. При выборе α_0 в первую очередь учитывают требования, предъявляемые к динамике электропривода. В настоящее время реверсивные преобразователи с совместным управлением применяют, как правило, только в электроприводах с высокими требованиями к динамике. Для обеспечения этих требований следует добиться линейности внешних характеристик, чему соответствует угол $\alpha_0=90°$. Однако, как показано выше, реализовать это практически невозможно, поэтому при выборе α_0 принимается компромиссное решение, обеспечивающее нелинейность характеристик в такой минимальной степени, какую допускают процессы в уравнительном контуре. При наладке выбор оптимального значения α_0 производится в следующем порядке. Предварительно в обеих

СИФУ устанавливается угол $\alpha_0 = 120°$ и отключается нагрузка преобразователя, замкнутым остается только контур уравнительного тока. Подается анодное напряжение и с помощью осциллографа контролируются значение и форма напряжения на одном из уравнительных реакторов (осциллограф подключается через разделительный трансформатор). Дальнейший ход операций зависит от силовой схемы преобразователя.

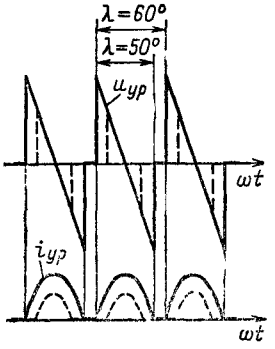


Рис. 11-18. Форма напряжения и тока на уравнительном реакторе.

В перекрестной схеме входы СИФУ отключаются от внешнего источника сигнала. Напряжение на уравнительном реакторе должно быть равно нулю. Постепенно уменьшается начальный угол в обеих группах. Контроль начального угла производится по показаниям предварительно отградуированных стрелочных приборов, установленных в СИФУ. Напряжение на уравнительном реакторе должно иметь вид, показанный на рис. 11-18. Этому напряжению соответствует прерывистый уравнительный ток. Особое внимание обращается на неравенство «пиков» напряжения и углов проводимости λ уравнительного тока, которые свидетельствуют о наличии асимметрии управляющих импульсов. Если различие углов λ превышает 3°, следует проверить асимметрию и подстроить опорные напряжения в СИФУ каждой вентильной группы. После этого уменьшением начального угла (при соблюдении их равенства) устанавливается угол проводимости уравнительного тока $\lambda \approx 50°$; напряжение на уравнительном реакторе для этого случая показано на рис. 11-18 сплошными линиями. При подаче сигнала управления на вход преобразователя и плавном регулировании этого сигнала контролируется уравнительное напряжение, которое должно уменьшаться по мере увеличения входного сигнала. Не допускается появление граничного уравнительного тока, о чем свидетельствует отсутствие интервалов нулевого значения напряжения. Правильность выбора угла α_0 проверяется при работе реверсивного преобразователя в составе автоматической системы регулирования при работе электропривода на холостом ходу в пускотормозных режимах. Проверка заключается в контроле уравнительного тока во всем диапазоне изменения напряжения. Если при плавном изменении сигнала задания или в установившемся режиме уравнительный ток существенно не возрастает, то установку угла α_0 следует считать допустимой с точки зрения процессов в уравнительном контуре. В противном случае причиной увеличения уравнительного тока является дрейф характеристик СИФУ или асимметрия управляющих импульсов, что свидетельствует о необходимости увеличения угла α_0. Всплески динамического уравнительного тока не могут быть уменьшены увеличением угла α_0, так как определяются значением $d\alpha/dt$, которое зависит от быстродействия системы регулирования. Окончательная настройка угла α_0 производится после оценки динамических показателей электропривода в технологическом режиме работы.

Во встречно-параллельной схеме настройка начального угла в целом аналогична рассмотренной выше с той лишь разницей, что контроль уравнительного напряжения производится при угле одной из групп, соответствующем максимальному уравнительному току и равном 60°. Для этого на вход СИФУ подается сигнал внешнего источника. Точная настройка на максимум уравнительного напряжения производится визуально;

в) производятся выбор и установка предельных углов регулирования α_{min} и β_{min}.

Угол β_{min} обеспечивает надежную работу преобразователя, исключающую возможность «опрокидывания» инвертора, а также максимальное напряжение преобразователя в инверторном режиме. Оптимальное значение β_{min} зависит от тока нагрузки и может быть определено из (11-14). Реализация такого ограничения возможна лишь в СИФУ, имеющей вход внешней регулировки β_{min}. В противном случае ограничение устанавливается постоянным и значение β_{min} может быть определено из (11-13) и (11-14). Однако использование этих выражений, несмотря на их видимую простоту, невозможно, из-за трудности экспериментального определения угла коммутации γ; кроме того, выражения (11-13) и (11-14) не учитывают индуктивное сопротивление и просадку напряжений питающей сети. Рекомендуется значение β_{min} определять как

$$\beta_{min} \geqslant \left[\cos(\delta + \Delta) - \left(\frac{100}{100 - \Delta U}\right) \times \right.$$
$$\left. \times \left(\frac{u_к\,\%}{100} + \frac{S_{1н}}{S_к}\right)\right] \frac{I_d}{I_{d,н}}, \qquad (11\text{-}23)$$

где ΔU — относительное снижение напряжения сети, %; $S_{1н}$ — номинальное значение полной мощности преобразовательного трансформатора на первичной стороне, кВ·А; $S_к$ — мощность к. з. сети в месте подключения преобразователей, кВ·А.

Значение δ для тиристоров общего применения принимается 1,5—2,5°; значение Δ зависит от качества настройки и дрейфа характеристик элементов СИФУ и практически принимается равным 3—4°. Относительное снижение напряжения сети ΔU допускается в пределах 15 %, однако при расчете β_{min} эту величину следует принимать равной 20—25 % с целью учета коммутационных искажений напряжения сети. Значение тока принимается равным максимальному рабочему току нагрузки.

Угол α_{min} выбирается по выражению (11-22), которое не допускает превышения уравнительным током принятого значения в крайних точках диапазона регулирования выпрямленного напряжения.

11-8. НАЛАДКА РЕВЕРСИВНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАЗДЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

При раздельном управлении вентильные группы работают поочередно, раздельно. Раздельная работа осуществляется подачей управляющих импульсов только на вентильную группу, обеспечивающую заданное направление тока; с другой вентильной группы импульсы в это время сняты (заблокированы). Процесс реверса тока при раздельном управлении происходит следующим образом: изменением напряжения работающей вентильной группы ток нагрузки уменьшается до нуля, управляющие импульсы снимаются с работающей группы и после искусственной паузы подаются на другую группу. Так как при раздельном управлении в любой момент времени работает только одна из вентильных групп, возможность протекания уравнительного тока исключается.

Подача управляющих импульсов на вентильные группы может производиться двумя способами.

При первом способе (11-19, *а*), так же как и при совместном управлении, используются две СИФУ *UVG1*, *UVG2* индивидуально для каждой вентильной группы. При необходимости реверса тока нагрузки блокируются импульсы СИФУ работающей группы, после чего деблокируются управляющие импульсы СИФУ другой группы.

При втором способе (рис. 11-19, *б*) применяется одна СИФУ *UVG*, выход которой при задании различного направления тока нагрузки подключается к одной или к другой группе. При переключении вентильных групп изменяется полярность входного сигнала СИФУ.

Переключение управляющих импульсов с одной вентильной группы на другую осуществляется с помощью специального логического переключающего устройства (ЛПУ) *DS*, которое выполняет следующие функции:

а) выбор вентильной группы, на которую должны быть поданы управляющие импульсы для обеспечения требуемого направления тока нагрузки;

б) запрет появления управляющих импульсов одновременно в обеих группах;

в) создание временной задержки между моментом снятия импульсов в ранее работающей группе и моментом подачи импульсов на вентили вступающей в работу группы.

Выполнение указанных функций обеспечивает отсутствие уравнительного тока во всех режимах. В преобразователях с раздельным управлением вентильные группы соединены между собой без токоограничивающих реакторов, поэтому при любом случайном появлении уравнительного тока последний достигает аварийного значения, что приводит к отключению преобразователя.

Необходимое направление тока нагрузки, а следовательно, и работа той или иной вентильной группы определяются специальным сигналом u_s, поступающим на вход ЛПУ. Во избежание появления уравнительного тока переключение управляющих импульсов производится только при гарантированном отсутствии тока во включаемой вентильной группе. Контроль тока осуществляется с помощью так называемого датчика нулевого тока (ДНТ) *UA* (рис. 11-19), формирующего логический сигнал i_0 наличия (отсутствия) тока. Этот сигнал поступает на ЛПУ и блокирует переключение групп при наличии тока.

В настоящее время практическое применение нашли два типа датчиков нулевого тока: датчики, построенные на трансформаторах постоянного или переменного тока, и датчики, контролирующие проводящее состояние вентилей.

Первый тип датчиков характеризуется наличием зоны нечувствительности, в результате чего выдается сигнал отсутствия тока, когда тиристоры еще не восстановили запирающие свойства. При переключении вентильных групп в этот момент может появиться уравнительный ток, поэтому при использовании таких датчиков необходима аппаратная пауза перед включением очередной группы. Пауза устанавливается исходя из возможности появления сигнала датчика в момент формирования очередного управляющего импульса, например в режиме прерывистого тока, близкого к граничному-непрерывному. В этом случае пауза должна быть больше длительности такта работы мостовой схемы выпрямления, равной 3,3 мс. Обычно аппаратная пауза устанавливается равной 4—6 мс.

Второй тип датчиков формирует сигнал отсутствия тока, когда на всех тиристорах силовой схемы напряжение превышает па-

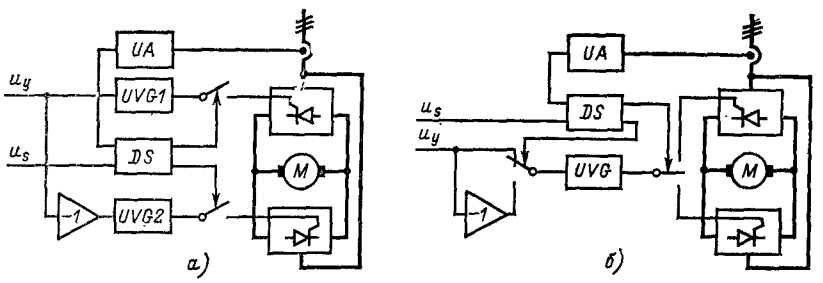


Рис. 11-19. Функциональные схемы реверсивных преобразователей с раздельным управлением.
а — с двумя СИФУ; *б* — с одной СИФУ.

дение напряжения на открытом тиристоре Датчики нулевого тока формируют сигнал, разрешающий переключение, в паузах прерывистого тока с углом проводимости $\lambda = 40-50°$ При использовании таких датчиков длительность аппаратной паузы составляет 0,5—1 мс.

Методы переключения вентильных групп в реверсивном преобразователе определяют-

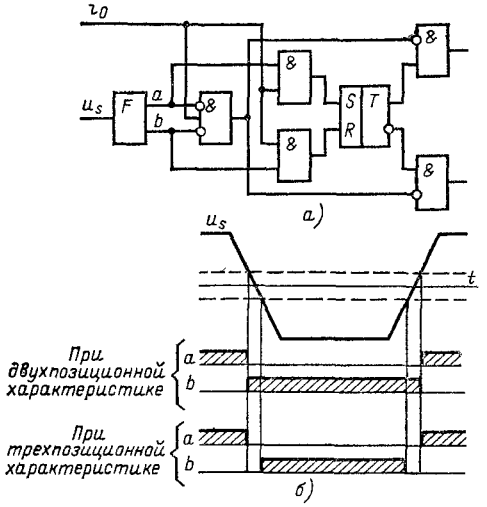


Рис 11-20 Логическое переключающее устройство

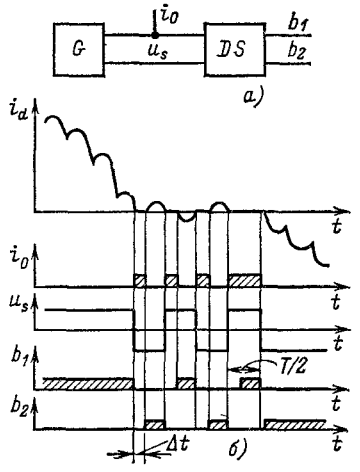


Рис 11-21 Переключение групп сканированием

а — упрощенная схема, *б* — диаграммы сигналов

ся возможностями получения сигнала переключения u_s.

1. В системах подчиненного регулирования в качестве сигнала u_s используется сигнал задания тока, определяющий как значение, так и направление тока нагрузки Аналоговый сигнал переключения u_s преобразуется в логический i_s с помощью специального формирователя F, представляющего собой релейный элемент с двухпозиционной или трехпозиционной характеристикой (рис. 11-20), от вида которой зависит характеристика переключения ЛПУ При $u_s=0$ и двухпозиционной характеристике включена одна вентильная группа, при $u_s=0$ и трехпозиционной характеристике обе группы заперты

2 При данном способе сигнал u_s формируется системой раздельного управления Переключение происходит путем автоматического поиска (сканирования) вентильной группы, обеспечивающей заданное направление тока нагрузки Поиск заключается в циклическом переключении вентильных групп до тех пор, пока под действием сигнала на входе СИФУ ток нагрузки не превысит порога срабатывания ДНТ При сигнале задания тока, равном нулю, преобразователь работает в режиме циклических переключений Управление преобразователем осуществляется только одним внешним сигналом u_y на входе СИФУ

Широкое применение нашли два варианта схем сканирования

В преобразователях объединения ХЭМЗ сигнал переключения формируется мультивибратором *G*, работающим в ждущем режиме (рис 11-21) Управление мультивибратором осуществляется сигналом i_0 с выхода ДНТ, выполненного на трансформаторах тока При уменьшении тока под действием сигнала u_y на входе СИФУ и срабатывании ДНТ мультивибратор деблокируется и осуществляет циклическое переключение вентильных групп до тех пор, пока ток нагрузки не превысит порога срабатывания ДНТ Частота колебаний мультивибратора 75 Гц выбрана из условия, чтобы длительность полупериода превышала длительность аппаратной паузы и одного такта работы схемы выпрямления

В преобразователях ЗПО «Преобразователь» применяется схема сканирования, где сигнал u_s в явном виде отсутствует. Сигналом задания работы одной из вентильных групп являются управляющие импульсы другой группы, т. е. при работе одной группы вторая подготовлена к включению Вторая группа остается во включенном состоянии до поступления на нее первого импульса В случае появления в этой группе тока ЛПУ *DS* блокируется и она остается в работе Другая группа при этом готова к включению, которое происходит при срабатывании ДНТ В результате в режиме прерывистого тока нагрузки группы постоянно переключаются, т е ЛПУ сканирует, пытаясь найти группу, в которой может протекать непрерывный ток

3 В системах подчиненного регулирования используется также комбинированный метод переключения (комбинированная логика), сочетающий свойства ЛПУ с трехпозиционной характеристикой и сканирования Преобразователь переводится в режим сканирования при $u_s=0$

4. В качестве сигнала переключения используется сигнал управления тиристорным преобразователем, поступающий на вход СИФУ Такой способ переключения нашел применение в тиристорных возбудителях, в которых установившемуся значению тока определенной полярности однозначно соответствует определенная полярность напряжения преобразователя Схема должна разрешать работу группы преобразователя в соответст-

вии со знаком результирующего сигнала управления, определяющего полярность и значение напряжения возбуждения.

Статические и динамические свойства реверсивного преобразователя с раздельным управлением аналогичны свойствам нереверсивного преобразователя при одном и том же направлении тока нагрузки. Отличия проявляются только в процессе изменения направления тока нагрузки, т. е. при переключении вентильных групп. Процесс реверса тока зависит от углов регулирования вентильных групп в момент переключения, т. е. от согласования характеристик вентильных групп.

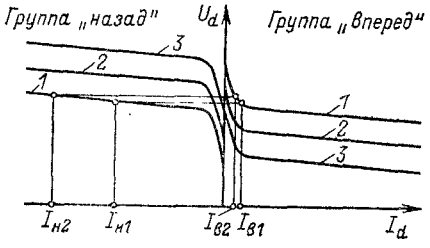


Рис. 11-22. Внешние характеристики реверсивного преобразователя с раздельным управлением при различных значениях начального угла α_0.

1 — $\alpha_0=90°$; *2* — $90°<\alpha_0<120°$; *3* — $\alpha_0=120°$.

В отличие от преобразователей с совместным управлением, в которых непрерывные статические характеристики обеспечиваются при любых возможных согласованиях вентильных групп, в преобразователях с раздельным управлением это удается достигнуть при согласовании характеристик $\alpha_в+\alpha_н=240°$ ($\alpha_0=120°$) только в ограниченном диапазоне изменения выпрямленного напряжения (рис. 11-22). В этом случае, так же как и при совместном управлении, характеристики реверсивного преобразователя существенно нелинейны, что ухудшает динамические характеристики электропривода. При согласовании $180°<\alpha_в+\alpha_н<240°$ в характеристиках появляется разрыв, степень которого возрастает по мере приближения $\alpha_в+\alpha_н$ к 180°. Этот разрыв приводит к неоднозначности процесса реверса тока, которая заключается в различных значениях установившегося тока включаемой группы в зависимости от тока выключаемой группы. С уменьшением тока выключаемой группы ток включаемой группы существенно возрастает (рис. 11-22). Кроме того, разрыв в характеристиках приводит к неустойчивому режиму стоянки электропривода («ползучая» скорость или «дерганье»).

При наладке реверсивного преобразователя с раздельным управлением выполняются следующие операции:

а) производится наладка каждой вентильной группы по методике, изложенной в § 11-5; для преобразователей с двумя СИФУ характерные особенности выполнения данной операции аналогичны рассмотренным в п. «а» для преобразователей с совместным управлением;

б) производится установка начального и предельных углов регулирования.

При выборе α_0 следует учитывать требования к динамике электропривода при реверсе тока и необходимость обеспечения четкой стоянки электропривода. Указанные требования с точки зрения выбора α_0 являются противоречивыми, поэтому при выборе начального угла следует искать компромиссное решение. Влияние начального угла на динамику электропривода сказывается на длительности бестоковой паузы $t_п$ при реверсе тока и времени нарастания тока включаемой группы. Значение $t_п$ в свою очередь обусловлено нелинейностью характеристик преобразователя в режиме прерывистых токов и аппаратной паузой Δt. При значениях α_0, близких к 90°, в большей степени проявляется влияние Δt, при $\alpha_0>90°$ — влияние нелинейности характеристик. Влияние начального угла на устойчивость стоянки электропривода сказывается при двухпозиционной характеристике переключения ЛПУ или сканировании. Если ток преобразователя при $\alpha_0=90°$ и неподвижном якоре электродвигателя окажется больше тока трогания электропривода, то возникает неустойчивый режим, сопровождающийся «дерганьем» привода или стуком в редукторах и соединительных муфтах. В этом случае начальный угол выбирается таким, чтобы ток преобразователя был не больше тока трогания привода. Обычно значение α_0 выбирается в пределах 100—120°.

Минимальный угол α_{min} устанавливается аналогично нереверсивному преобразователю в соответствии с рекомендациями § 11-5. Установка минимального угла β_{min} производится так же, как и в реверсивном преобразователе с совместным управлением;

в) производится проверка ЛПУ на функционирование и настройка аппаратной паузы. Проверка производится при отключенном анодном напряжении и заключается в контроле сигналов выходных логических элементов ЛПУ при подаче на его вход сигнала от генератора прямоугольных или синусоидальных сигналов, выполняющего функцию сигнала переключения. Частота генератора выбирается 30—50 Гц. При отсутствии генератора может быть использовано напряжение источника питания СИФУ. При отключенном силовом напряжении датчик нулевого тока разрешает переключение, поэтому при подаче на вход ЛПУ, например, синусоидального сигнала выходные сигналы ЛПУ b_1 и b_2, разрешающие работу вентильных групп, должны изменяться с частотой входного сигнала. При проверке контролируется отсутствие одновременного появления сигналов b_1, b_2 при любых значениях входного сигнала.

Настройка аппаратной паузы ЛПУ производится в преобразователях, имеющих такую возможность. В преобразователях, не имеющих органов настройки паузы, производится только ее контроль.

Схема проверки ЛПУ *DS* и диаграммы сигналов приведены на рис. 11-23. Длительность аппаратной паузы, измеряемая с помощью осциллографа с калиброванной разверткой (например, С1-55, С1-58), соответствует интервалам нулевого значения сигнала, наблюдаемого на экране осциллографа.

Длительность паузы устанавливается в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя, указанными в технической документации; при отсутствии рекомендаций ее значение устанавливается 3,5—4 мс. Существуют ЛПУ, имеющие общий для обеих вентильных групп узел формирования аппаратной паузы. В таких ЛПУ длительность паузы при включении каждой вентильной группы всегда равна $\Delta t_1 = \Delta t_2$ (рис. 11-23, *б*). В ЛПУ, имеющих два узла формирования аппаратной паузы (для

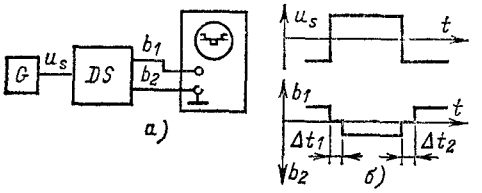


Рис. 11-23. Проверка ЛПУ на функционирование.

а — схема проверки, *б* — диаграммы сигналов.

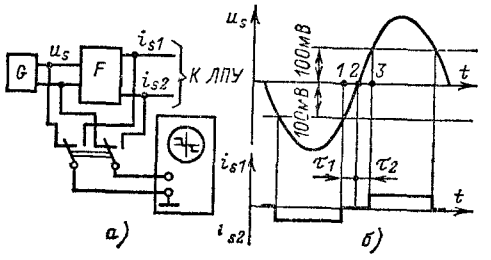


Рис. 11-24. Настройка формирователя.

а — схема; *б* — диаграммы сигналов.

каждой вентильной группы), настройкой последних устанавливается равенство значений аппаратной паузы $\Delta t_1 = \Delta t_2$.

В преобразователях с системой раздельного управления, работающей по принципу сканирования, для проверки ЛПУ на функционирование достаточно подключить электронный осциллограф к выходным элементам ЛПУ и наблюдать на экране осциллографа знакопеременный сигнал, частота которого зависит от построения схемы сканирования и составляет 75—150 Гц;

г) производится настройка формирователя логических сигналов переключения (в некоторых типах преобразователей этот формирователь называют реле направления). Схема настройки приведена на рис. 11-24, *а*.

Требования к настройке зависят от вида характеристики переключения. Настройка формирователя *F* с двухпозиционной характеристикой осуществляется при подаче на вход формирователя синусоидального сигнала с амплитудой 1—2 В и частотой 50—100 Гц. Предварительно с помощью переключателя этот сигнал подается на вход осциллографа Время развертки осциллографа устанавливается таким, чтобы одна полуволна синусоиды занимала большую часть экрана. Замечаются точки нулевых значений сигнала, после чего переключатель переводится в другое положение, при котором на экране наблюдается знакопеременный сигнал. Настройкой формирователя следует добиться совпадения фронтов наблюдаемого сигнала с замеченными точками или по крайней мере — минимальных интервалов несовпадения τ. Настройка формирователя с трехпозиционной характеристикой предполагает два этапа. На первом этапе производится предварительная настройка, на втором — оценивается работа электропривода и производится корректировка настройки. Предварительная настройка необходима для подготовки преобразователя к первому включению на нагрузку. Переключатель (рис. 11-24, *а*) устанавливается в положение, при котором на вход осциллографа подается сигнал генератора. Частота сигнала устанавливается около 50 Гц и амплитуда — около 200 мВ. Замечаются положения точек *1*, *2*, *3* на экране осциллографа, после чего переключатель переводится в другое положение Настройкой порогов срабатывания формирователя необходимо добиться совпадения фронтов логических сигналов i_{s1}, i_{s2} с замеченными точками *1* и *3*, при этом интервалы τ_1 и τ_2 должны быть равны. В результате такой настройки вентильные группы блокируются при значениях аналогового сигнала переключения u_s, меньших 100 мВ. Указанный порог срабатывания удовлетворяет требованиям большинства электроприводов, обеспечивая четкую стоянку привода и не вызывая существенного ухудшения работы САР скорости. На втором этапе настройки, выполняемом при работе электропривода на холостом ходу, оценивается амплитуда пульсаций аналогового сигнала переключения u_s. Пульсации могут быть вызваны различными помехами в системе управления. В случае превышения амплитудой пульсаций первоначально установленного порога срабатывания формирователя (100 мВ) производится подстройка последнего;

д) проверяется на функционирование датчик нулевого тока. Первоначально с помощью внешнего источника имитируется выходной сигнал датчика, соответствующий наличию тока нагрузки. Изменяется полярность сигнала переключения и контролируется неизменность выходных сигналов ЛПУ. Для этого может быть использована схема, показанная на рис. 11-23, *а*. При сигнале, соответствующем отсутствию тока нагрузки, проверяется процесс изменения выходных сигналов ЛПУ при изменении полярности сигнала переключения. В некоторых схемах ЛПУ имеются различного рода блокировки, осуществляющие запрет работы обеих вентильных групп и связанные с характером работы электропривода. При проверке датчика нулевого тока и ЛПУ необходимо эти блокировки отключить. Затем проверяется работоспособность датчика нулевого тока. Эта наладочная операция производится в режиме непрерывного тока в одной из вентильных групп при ручном управлении преобразователем. Проверка заключается в контроле с помощью осциллографа сигнала датчика, запрещающего переключение ЛПУ при наличии тока нагрузки;

е) проверяется работоспособность защиты при возникновении тока в уравнительном контуре, обусловленном сбоями в работе системы раздельного управления. Обычно защита в

этом случае выполняется с использованием датчиков тока в обеих вентильных группах. При возникновении уравнительного тока сигналы выдаются обеими датчиками, что регистрируется схемой совпадения, формирующей сигнал на отключение преобразователя. Проверка защиты производится имитацией сигналов датчиков с контролем выходного сигнала на отключение автоматических выключателей;

ж) для преобразователей с одной СИФУ проверяется работа узла реверса сигнала, поступающего на вход фазосмещающего устройства. Неисправность этого узла может вызвать серьезные аварийные ситуации. Проверка узла производится с помощью осциллографа, на вход которого подается входной сигнал ФСУ; на вход СИФУ от внешнего источника также подается некоторый сигнал. Изменяется полярность сигнала переключения и наблюдается изменение полярности сигнала на входе ФСУ;

з) проверяется работоспособность узлов «срыва» (блокировки) управляющих импульсов. Для этого при одной полярности сигнала переключения с помощью осциллографа проверяется наличие импульсов на тиристорах одной из вентильных групп. При изменении полярности сигнала переключения должно произойти переключение импульсов;

и) проверяется работоспособность преобразователя на нагрузку в режиме ручного управления. Цель проверки — убедиться в правильном функционировании преобразователя по рабочей схеме. Для этого подается анодное напряжение и устанавливается определенный сигнал переключения. Изменением сигнала СИФУ устанавливается ток нагрузки, равный примерно половине номинального значения. Изменяется полярность сигнала переключения, при этом не должно происходить каких-либо изменений в силовой схеме. Уменьшается сигнал на входе СИФУ, обеспечивается снижение тока нагрузки до срабатывания ДНТ и наблюдается процесс реверса тока. При переключении может возникнуть значительный ток во вступающей в работу группе. Этот ток является результатом разрыва внешних характеристик, поэтому дальнейшую проверку преобразователя следует проводить совместно с системой регулирования.

В. ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

11-9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) применяют для регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей (АД) изменением частоты питающего их напряжения.

ТПЧ делят на два основных класса:

1) ТПЧ на основе автономных инверторов (ТПЧИ);

2) ТПЧ с непосредственной связью питающей сети и нагрузки (ТПЧН).

При частотном управлении к ТПЧ как источникам питания предъявляют три основных требования:

1) возможность независимого регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения. Это требование необходимо для реализации определенного закона частотного управления;

2) обеспечение двустороннего обмена энергией между двигателем и питающей сетью, т. е. ТПЧ должен передавать энергию из сети в нагрузку в двигательном режиме, а также возвращать энергию из нагрузки в сеть при рекуперативном торможении. Кроме того, ТПЧ должен обеспечивать двустороннее протекание реактивного тока нагрузки для создания магнитного потока двигателя;

3) формирование выходного напряжения, форма которого должна приближаться к синусоидальной. Это требование вызвано необходимостью ограничения высших гармонических напряжения и тока, наличие которых заставляет завышать мощность двигателя относительно мощности нагрузки из-за дополнительного нагрева.

В электроприводах переменного тока применяют трехфазные ТПЧ.

Наладка заключается в проведении комплекса работ по испытанию, проверке и настройке ТПЧ с целью обеспечения его надежной работы в технологических режимах работы электропривода.

Для качественного выполнения наладочных работ используют электроизмерительные приборы (класс которых должен быть 0,5—1), приспособления, осциллографы. Желательно применять электронные осциллографы с калиброванной длительностью развертки или с калиброванными метками, допускающие синхронизацию с сетью или с внешним источником и имеющие вход внешнего модулятора яркости луча (например, типов С1-49, С1-68 и др.); удобны в работе также двухлучевые осциллографы (например, С1-64 и др.). Кроме того, для наладки ТПЧ могут применяться фазорегуляторы типа ВАФ-85М или другие приспособления для фазировки и проверки асимметрии управляющих импульсов, разработанные и изготовленные отдельными организациями.

11-10. НАЛАДКА ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АВТОНОМНЫМИ ИНВЕРТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

В ТПЧИ, функциональная схема которого приведена на рис. 11-25, происходит двойное преобразование энергии. Напряжение сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц с помощью управляемого выпрямителя (УВ) *UVV* и силового фильтра (Ф) *ZV* преобразуется в напряжение постоянного тока U_d, определяющее амплитуду выходного напряжения ТПЧИ; регулирование этой амплитуды осуществляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ) *UVG1* (см. § 11-3). Выпрямленное напряжение U_d с помощью автономного инвертора напряжения (АИН) *UVF* преобразуется в переменное, частота которого регулируется системой управления инвертором (СУИ)

UVG2. Управление ТПЧИ осуществляется двумя аналоговыми сигналами, из которых один u_y определяет амплитуду, а другой u_f — частоту выходного напряжения.

Силовая часть включает управляемый выпрямитель (см. подразделы А и Б), фильтр и автономный инвертор напряжения. Основу АИН составляют управляемые ключи, с помощью которых нагрузка попеременно с заданной частотой подключается к разным полюсам источника постоянного напряжения — управляемого выпрямителя, благодаря чему на нагрузке формируется переменное напряжение ступенчатой формы; при этом форма тока зависит от характера нагрузки.

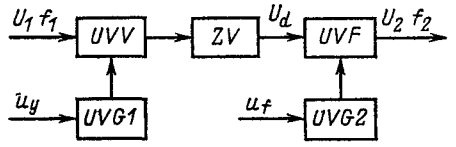


Рис. 11-25. Функциональная схема ТПЧИ.

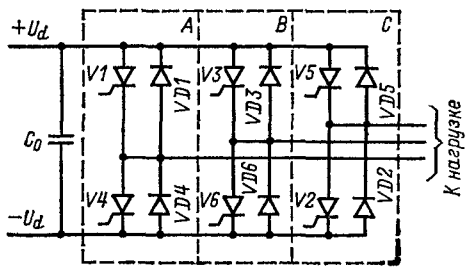


Рис. 11-26. Упрощенная силовая схема АИН.

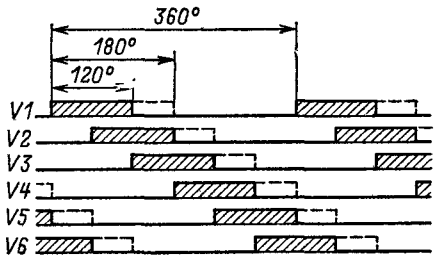


Рис. 11-27. Диаграммы управляющих импульсов.

Для работы АИН принципиально необходимы полностью управляемые вентили. При использовании тиристоров, обладающих свойством неполной управляемости, применяют дополнительные узлы искусственной коммутации, обеспечивающие принудительное запирание тиристоров по сигналу управления.

Трехфазный АИН (рис. 11-26) состоит из трех симметричных плеч *A*, *B*, *C*, в каждое из которых включены по два полностью управляемых (основных) вентиля и встречно-параллельно с ними — так называемые обратные диоды. На входе АИН установлен конденсатор C_0, который совместно с обратными диодами обеспечивает прием реактивной энергии, возвращаемой со стороны нагрузки. Нагрузка может подключаться по схеме звезды или треугольника.

Форма и значение выходного напряжения определяются схемой соединения нагрузки, способом управления инвертором и иногда характером нагрузки (табл. 11-3).

Под способом управления понимается продолжительность открытого состояния тиристоров, измеряемая в долях периода выходного напряжения инвертора и обозначаемая буквой λ. Способ управления определяется построением узла искусственной коммутации. Существуют два основных способа управления: при $\lambda = 120°$ и $\lambda = 180°$. На рис. 11-27 показаны диаграммы управляющих импульсов в схеме рис. 11-26 для двух указанных способов. При $\lambda = 120°$ в межкоммутационные интервалы открыты два основных вентиля, при $\lambda = 180°$ — три.

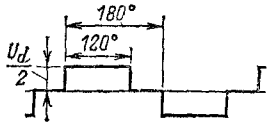
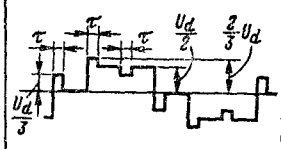
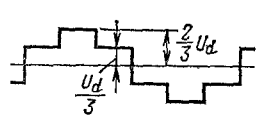
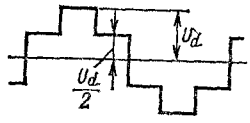
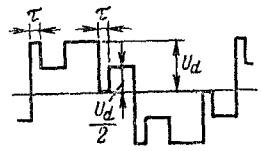
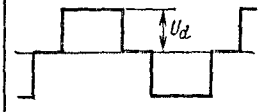
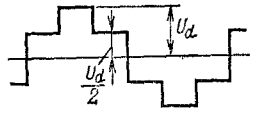
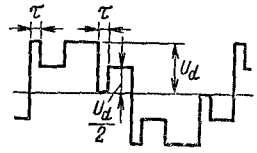
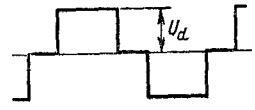
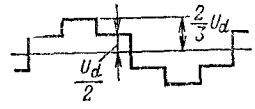
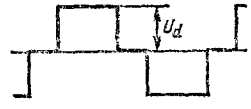
В случае работы на активную нагрузку при отключении, например, вентиля *V1* (рис. 11-26) и включении очередного вентиля (при $\lambda = 120°$ — это вентиль *V3*, при $\lambda = 180°$ — *V4*) происходит скачкообразное изменение полярности напряжения в фазе *A*. Следствием этого является аналогичное скачкообразное изменение тока нагрузки; обратные диоды в работу не вступают.

В случае работы на активно-индуктивную нагрузку при отключении вентиля *V1* разрывается цепь тока нагрузки i_A фазы *A*. Возникающая при этом э. д. с. самоиндукции прикладывается к обратному диоду *VD4* в прямом направлении и открывает его, вследствие чего полярность напряжения фазы *A* изменяется.

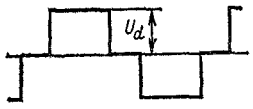
В табл. 11-4 приведены эквивалентные схемы при реверсе тока в фазе *A* (отключении вентиля *V1*), соответствующие трем основным характерным интервалам работы АИН в зависимости от способа управления и схемы соединения нагрузки. На интервале I ($t < t_1$) открыты вентили *V1* и *V2* при $\lambda = 120°$ или *V1*, *V2* и *V3* при $\lambda = 180°$. В начале интервала II ($t = t_1$) отключается вентиль *V1* (вентиль запирается принудительно), подается управляющий импульс на последующий вентиль (при $\lambda = 120°$ — на *V3*, при $\lambda = 180°$ — на *V4*). Интервал II ($t_1 < t < t_2$) характеризуется открытым состоянием обратного диода *VD4*, создающим цепь для уменьшающегося тока i_A фазы *A* после отключения вентиля *V1*. Длительность интервала II зависит от характера нагрузки ($\cos \varphi_{нагр}$) и обозначена в табл. 11-4 буквой τ. Ток, протекающий через обратный диод, является реактивным током нагрузки. При $\tau \leqslant 60°$, что соответствует $0{,}53 < \cos \varphi_{нагр} < 1$, реактивный ток протекает только в нагрузке. При $\tau > 60°$, т. е. при $\cos \varphi_{нагр} < 0{,}53$, к моменту открытия обратного диода *VD4* еще открыт предыдущий обратный диод *VD3*, вследствие чего часть тока i_A протекает встречно источнику постоянного тока, т. е. энергия нагрузки возвращается в источник. В интервале III открыты только вентили *V2*, *V3* при $\lambda = 120°$ или *V2*, *V3*, *V4* при $\lambda = 180°$. Таким образом, интервал II характеризуется работой обратных диодов. При активной нагрузке обратные диоды не включаются и поэтому интервал II работы АИН отсутствует. При активно-индуктивной нагрузке дли-

Таблица 11-3

Форма и значение выходного напряжения АИН при различных длительности управления λ, схемах соединения и характере нагрузки

λ	Схема соединения	Напряжение на нагрузке	Характер нагрузки: активная	активно-индуктивная: cos φ>0,53	активно-индуктивная: cos φ<0,53
120°		Фазное $U_ф$	 $U_ф = \frac{1}{\sqrt{6}} U_d$	 $U_ф = \sqrt{\frac{180+\tau}{1080}} U_d$	 $U_ф = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d$
		Линейное $U_л$	 $U_л = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d$	 $U_л = \sqrt{\frac{180+\tau}{360}} U_d$	 $U_л = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$
		Фазное (линейное)	 $U_л = U_ф = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d$	 $U_л = U_ф = \sqrt{\frac{180+\tau}{360}} U_d$	 $U_л = U_ф = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$
180°		Фазное $U_ф$	 $U_ф = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d$		
		Линейное $U_л$	 $U_л = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$		

Продолжение табл. 11-3

λ	Схема соединения	Напряжение на нагрузке	Характер нагрузки		
			активная	активно-индуктивная	
				$\cos\varphi>0{,}53$	$\cos\varphi<0{,}53$
180°	△	Фазное (линейное)	 $U_л = U_ф = \sqrt{\frac{2}{3}}\,U_d$		

тельность интервала II тем больше, чем больше фазовый угол нагрузки. При работе на асинхронный двигатель, у которого фазовый угол зависит от режима работы (этот угол уменьшается при увеличении нагрузки в двигательном режиме и увеличивается в генераторном), длительность интервала II меняется. При работе АД в двигательном режиме длительность работы обратных диодов (интервал II) с увеличением нагрузки сокращается и большую часть периода работают только основные тиристоры. При работе АД на холостом ходу длительности работы основных тиристоров и обратных диодов практически равны. В генераторном режиме (при торможении привода) большую часть периода работают обратные диоды, благодаря чему энергия из нагрузки передается на вход инвертора.

В случае реверсивного УВ торможение привода будет рекуперативным; при этом одна из вентильных групп УВ переводится в инверторный режим, а АИН работает в режиме выпрямления. Если УВ нереверсивный, то торможение осуществляется включением балластного сопротивления параллельно конденсатору на входе инвертора.

Узлы искусственной коммутации. Применяются различные схемные решения узлов искусственной коммутации (УИК) основных тиристоров. Несмотря на схемные различия, их объединяет общий принцип построения: для запирания тиристора используется предварительно заряженный конденсатор, который с помощью коммутирующего тиристора подключается к выключаемому тиристору так, что напряжение конденсатора оказывается обратным для выключаемого тиристора; в последнем уменьшается ток, и он закрывается.

В преобразователях частоты типа ТПЧ-63/1 (ЗПО «Преобразователь») применяются АИН с так называемой междуфазной коммутацией, при которой роль коммутирующего тиристора выполняет последующий основной тиристор. На рис. 11-28 показана упрощенная схема АИН с междуфазной коммутацией.

Узел междуфазной коммутации состоит из шести коммутирующих конденсаторов *C1—C6*, коммутирующих дросселей *L1—L6*, *L'1*, *L'2*, двух источников подзаряда $U_п$ и тиристоров подзаряда *V7—V12*. Принцип работы узлов коммутации заключается в следующем. При открытых основных тиристорах *V1* и *V2* одновременно с открытием тиристора *V2* включается тиристор подзаряда *V8*. Конденсатор *C1*

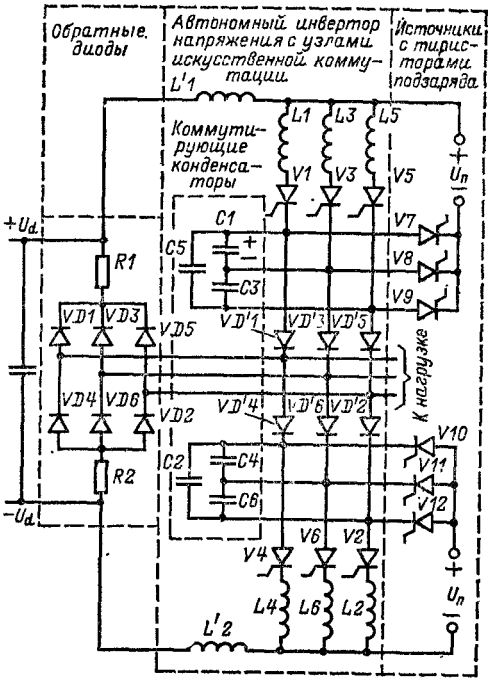
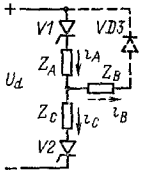
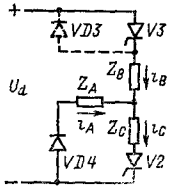
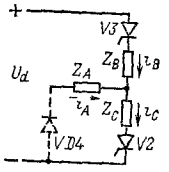
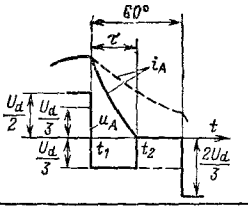
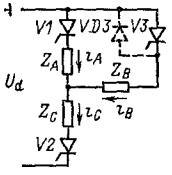
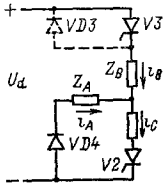
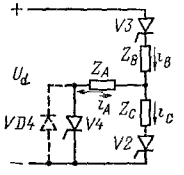
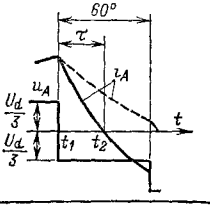
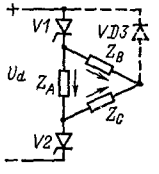
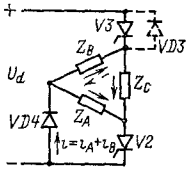
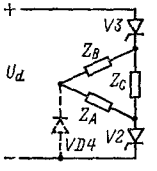
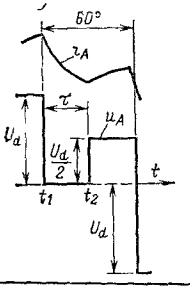
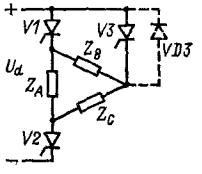
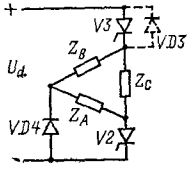
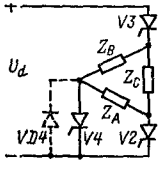
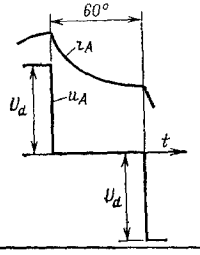


Рис. 11-28. Упрощенная схема АИН с междуфазной коммутацией.

заряжается до значения напряжения $U_п$ источника подзаряда с полярностью, указанной на рис. 11-28. Следующим вступает в работу основной тиристор *V3*, и начинается разряд конденсатора *C1* по цепи: *+C1—V1—L1—L3—V3—C1*. Из-за наличия дросселей *L1*, *L3* ток разряда нарастает плавно, достигая значения тока нагрузки. В момент равенства этих токов

Таблица 11-4

Эквивалентные схемы АИН и диаграммы токов и напряжений при коммутации основных вентилей

Схема соединения нагрузки	Длительность управления вентилями	Эквивалентные схемы на коммутационных интервалах			Диаграммы токов и напряжений на коммутационных интервалах
		I интервал	II интервал	III интервал	
Y	120°				
	180°				
Δ	120°				
	180°				

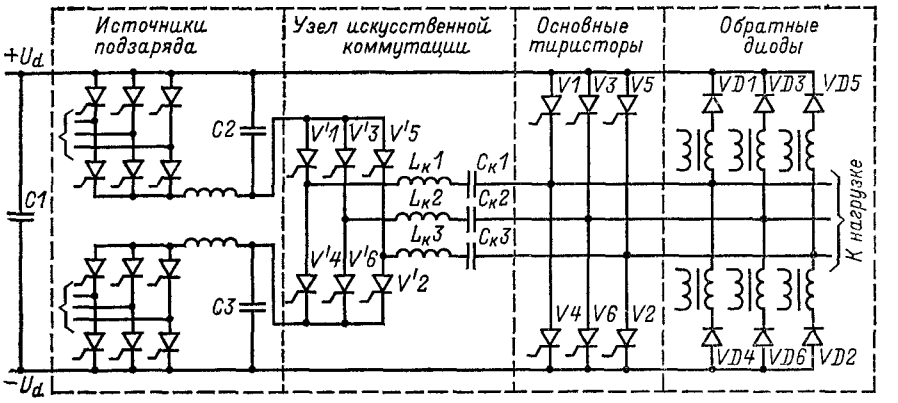


Рис. 11-29. Упрощенная схема АИН с пофазной коммутацией.

тиристор *V1* закрывается и открывается обратный диод *VD1*. Ток разряда начинает протекать по цепи: *+C1—VD'1—VD1—R1—L'1——L3—V3——C1*. Коммутирующий конденсатор *C1* перезаряжается.

Одновременно с открытием основного тиристора *V3* открывается тиристор подзаряда *V10*, подзаряжая конденсатор *C2* до напряжения источника подзаряда. Коммутирующий конденсатор *C2* подготовлен для выключения основного тиристора *V2* при включении очередного тиристора *V4*. Процесс запирания остальных тиристоров происходит аналогично.

В преобразователях частоты серии ПЧИ (объединение ХЭМЗ) применяется АИН с так называемой пофазной двухступенчатой коммутацией. Упрощенная схема АИН приведена на рис. 11-29.

Для выключения основных тиристоров схема инвертора содержит УИК, состоящий из конденсаторов $C_к1$—$C_к3$, дросселей $L_к1$—$L_к3$, коммутирующих тиристоров *V'1—V'6* и двух источников подзаряда. При выключении основных тиристоров используется энергия, накопленная в коммутирующих конденсаторах $C_к1$—$C_к3$ в результате предшествующей работы схемы. В моменты закрытия основных тиристоров включаются соответствующие коммутирующие тиристоры *V'1—V'6*. УИК обеспечивает независимую двухступенчатую коммутацию тиристоров инвертора. На первой ступени ток нагрузки переводится во вспомогательную цепь (контур коммутации); выключаемый тиристор при этом запирается. На второй ступени ток нагрузки переводится из вспомогательной цепи в цепь соответствующего обратного диода. На рис. 11-30 показан процесс реверса тока нагрузки фазы *A*. В исходном состоянии открыты тиристоры *V1*, *V2* и *V3*, и в фазах нагрузки токи протекают, как показано на рис. 11-30, *б*. Чтобы осуществить реверс напряжения и тока в фазе *A*, необходимо закрыть тиристор *V1* и открыть тиристор *V4*. С этой целью в момент t_2 подается узкий импульс на коммутирующий тиристор *V'1*, одновременно снимается широкий управляющий импульс тиристора *V1*. При этом возникает коммутационный ток i_c и начинается колебательный процесс перезаряда предварительно заряженного конденсатора $C_к1$. Ток i_c увеличивается и в момент t_3 достигает значения тока нагрузки i_A. Тиристор *V1* закрывается. Таким образом, ток нагрузки i_A переводится в контур коммутации. Процесс разряда конденсатора $C_к1$ продолжается, в результате чего открывается обратный диод *VD1*, создавая цепь для протекания части коммутационного тока i_c—i_A (на рис. 11-30,*а* эта часть тока заштрихована). Ток i_c достигает максимального значения, когда напряжение на конденсаторе $C_к1$ становится равным нулю. После этого за счет энергии, запасенной в коммутирующем дросселе $L_к$, начинается процесс перезаряда конденсатора $C_к1$, ток i_c при этом уменьшается. В момент t_4 ток i_c вновь становится равным току нагрузки i_A. Диод *VD1* закрывается. Уменьшение тока коммутации i_c приводит к уменьшению тока нагрузки i_A. Начиная с момента t_4, напряжение на нагрузке меняет знак, в результате чего открывается обратный диод *VD4*. Начинается процесс перевода тока нагрузки i_A из контура коммутации в цепь обратного диода *VD4*. К моменту t_5 ток коммутации i_c спадает до нуля и тиристор *V'1* закрывается. Ток нагрузки i_A продолжает протекать за счет энергии, накопленной в индуктивности фазы *A*, и постепенно уменьшается. После закрытия тиристора *V'1* (момент t_4) подается широкий импульс на тиристор *V4*, однако последний будет закрыт до тех пор, пока открыт диод *VD4*. Наконец, в момент t_6 ток нагрузки уменьшается до нуля, диод *VD4* закрывается и открывается тиристор *V4*, обеспечивая протекание тока нагрузки i_A в противоположном направлении. Процесс реверса закончен. На рис. 11-30, *а* показаны временные диаграммы и состояния схемы в различные моменты при реверсе тока. Ток, протекающий через диод *VD4*, протекает также через одну из фаз только в двигательном режиме работы АД. В генераторном режиме (при торможении) этот ток протекает через одну из фаз и конденсатор *C1* силового фильтра. На рис. 11-30, *б* (интервал $t_5<t<t_6$) пунктиром показаны токи при работе в генераторном режиме.

При протекании тока коммутации i_c возникают потери в контуре коммутации, в результате которых напряжение на конденсаторе $C_к1$ при перезаряде будет меньше начального значения U_0 (см. пунктир на рис. 11-30, *а*); при

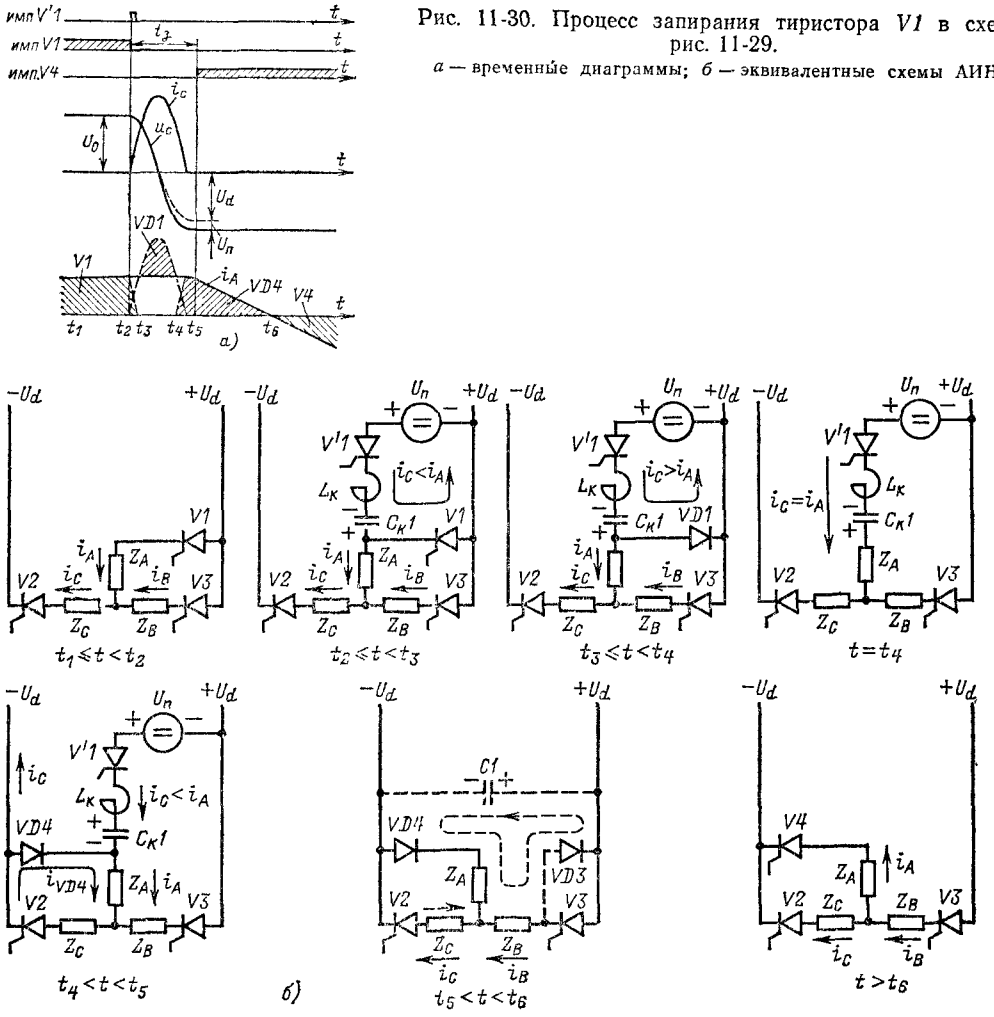


Рис. 11-30. Процесс запирания тиристора *V1* в схеме рис. 11-29.

а — временные диаграммы; *б* — эквивалентные схемы АИН.

этом ток коммутации i_C при запирании тиристора также будет меньше. Потери приводят к ухудшению коммутационной устойчивости инвертора. С целью компенсации потерь в контур коммутации введен источник подзаряда $U_п$, обеспечивающий стабилизацию напряжения на конденсаторе. На рис. 11-30, *а* приведены диаграммы напряжений и токов на элементах инвертора, принадлежащих фазе *А*.

Из рис. 11-30, *а* видно, что подача импульса на основной тиристор *V4* осуществляется с некоторой задержкой $t_з$ относительно момента подачи импульса на коммутирующий тиристор *V'1*. Эта задержка необходима для полного восстановления запирающих свойств тиристора *V1* после спадания тока до нуля В рассматриваемых преобразователях время этой задержки равно 1 мс. Для более надежного восстановления предусмотрены специальные узлы формирования обратного напряжения на выключаемых тиристорах. Схема одного такого узла приведена на рис. 11-31. При протекании избыточного коммутационного тока через обратный диод *VD1* (интервал t_3—t_4, рис. 11-30, *а* и рис. 11-31, *б*) во вторичной обмотке w_2 трансформатора *T1* наводится э. д. с., большая напряжения источника «сброса». В результате открывается диод *VD2* и напряжение на обмотке w_2 устанавливается равным напряжению источника сброса (80—100 В). В свою очередь на первичной обмотке w_1 устанавливается напряжение в соответствии с коэффициентом трансформации, которое составляет

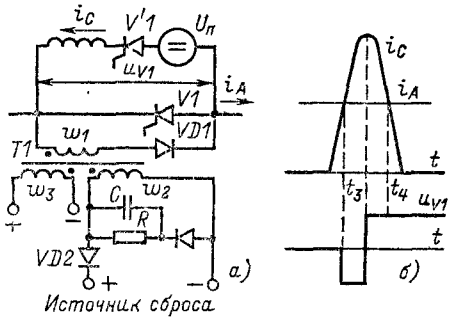


Рис. 11-31. Узел формирования обратного напряжения.

а — схема; *б* — диаграммы напряжения и тока.

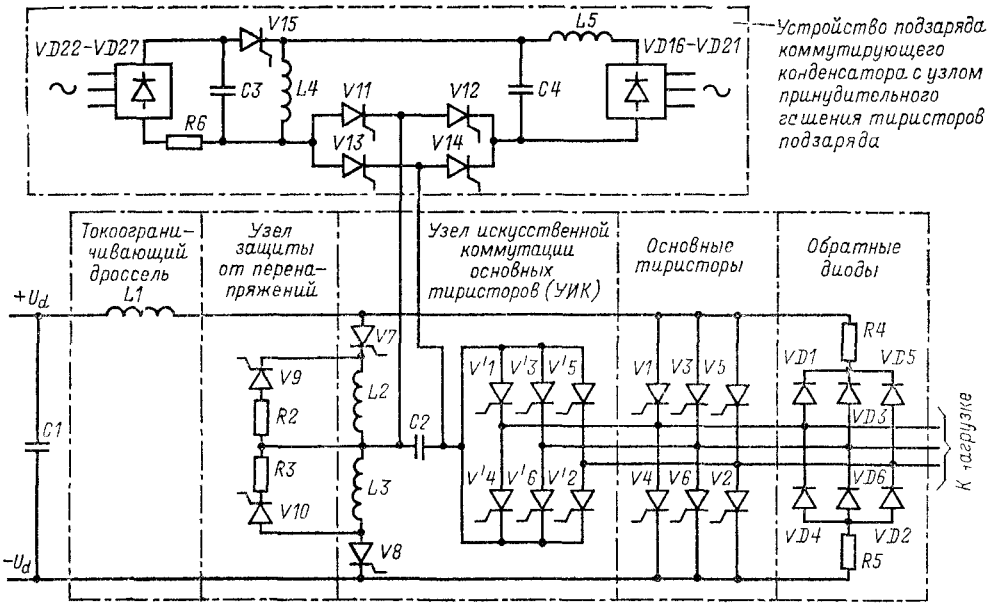


Рис. 11-32. Упрощенная схема АИН с двухступенчатой коммутацией.

20—25 В. Так как диод *VD1* открыт, это напряжение прикладывается к тиристору *V1* в обратном направлении, ускоряя процесс восстановления запирающих свойств.

При включении инвертора на нагрузку необходимо, чтобы коммутирующие конденсаторы были заряжены до напряжения U_0, поэтому перед включением на нагрузку вначале требуется подготовка узла искусственной коммутации (так называемая «раскачка» коммутирующих конденсаторов). С этой целью вначале при включенных источниках подзаряда подаются импульсы только на коммутирующие тиристоры. Под действием источников подзаряда происходит заряд коммутирующих конденсаторов.

В преобразователях частоты типа ТПЧ-100 (ЗПО «Преобразователь») применяется УИК с двухступенчатой коммутацией, принцип работы которого аналогичен рассмотренному выше, однако схемное решение отличается. Различие заключается в использовании только одного коммутирующего конденсатора, общего для всех основных тиристоров. Упрощенная схема АИН приведена на рис. 11-32. УИК состоит из комплекта коммутирующих тиристоров *V'1—V'6*, *V7*, *V8*, конденсатора *C2* и дросселей *L2*, *L3*. Выпрямительный мост *VD16—VD21*, дроссель *L4*, *L5* и конденсатор *C4* образуют источник подзаряда коммутирующего конденсатора *C2*. Дроссель *L5* и конденсатор *C4* предназначены для фильтрации выпрямленного напряжения. Дроссель *L4* обеспечивает плавное нарастание тока подзаряда. Подключение источника подзаряда к конденсатору *C2* осуществляется с помощью тиристоров *V11—V14*. Выпрямитель на диодах *VD22—VD27* и фильтр *R6*, *C3* предназначены для принудительного гашения тиристоров подзаряда. Гашение происходит при подаче импульса на тиристор гашения *V15*. Применение одного коммутирующего конденсатора стало возможным благодаря включению дополнительных коммутирующих тиристоров *V7*, *V8*. Так, например, для запирания тиристора *V1* одновременно подаются управляющие импульсы на коммутирующие тиристоры *V7*, *V'1*, для запирания тиристора *V6* — на *V8* и *V'6*. В остальном процесс коммутации аналогичен рассмотренному выше (рис. 11-30). По окончании процесса коммутации (в момент включения очередного основного тиристора) включаются тиристоры подзаряда *V11*, *V14* или *V12*, *V13* (в зависимости от необходимой полярности напряжения на конденсаторе); происходит дозаряд конденсатора до напряжения источника подзаряда. При очередном запирании основного тиристора одновременно с подачей импульсов на коммутирующие тиристоры также подается импульс на тиристор гашения подзаряда *V15*. При открытии *V15* к тиристорам подзаряда прикладывается обратное напряжение и они закрываются. За один период выходного напряжения инвертора каждый основной тиристор включается 1 раз, коммутирующие тиристоры *V'1—V'6* также включаются 1 раз, коммутирующие тиристоры *V7* и *V8* включаются каждый 3 раза за период, тиристоры подзаряда — 3 раза за период поочередно, тиристор гашения *V15* — 6 раз за период. Таким образом, процесс переключения основных тиристоров производится первоначально подачей импульсов управления на коммутирующие тиристоры, а затем с выдержкой времени около 500 мкс — на последующий основной тиристор. Выдержка времени необходима для завершения процессов в контуре коммутации. Продолжительность этой выдержки зависит от параметров *L* и *C* коммутирующего контура, которые в свою очередь выбираются в зависимости от времени восстановления запирающих свойств (времени выключения) основных тиристоров.

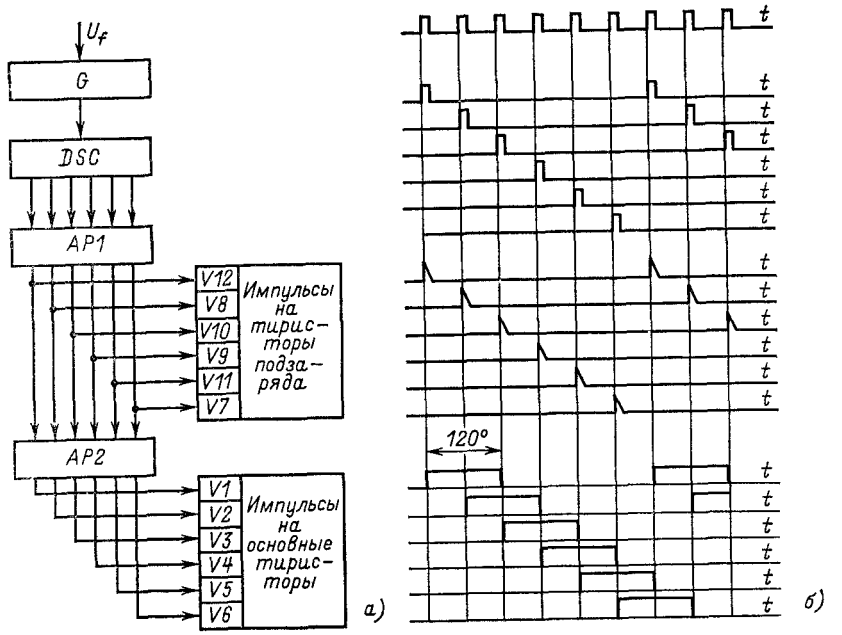


Рис. 11-33. Система управления АИН с междуфазной коммутацией (рис. 11-28).
а — структурная схема; *б* — диаграммы импульсов.

Для защиты коммутирующих тиристоров от перенапряжений, возникающих при накоплении энергии в коммутирующем контуре, служат цепочки *V9, R2* и *V10, R3*. При возникновении перенапряжений на конденсаторе *C2* на тиристор *V9* или *V10* подают управляющие импульсы, и избыточная энергия рассеивается на балластных резисторах *R2* или *R3*.

Система управления автономным инвертором (СУИ) предназначена для формирования импульсов управления тиристорами, подачи их на тиристоры в определенной последовательности и регулирования частоты этих импульсов в функции сигнала управления, поступающего на вход системы.

Структура СУИ определяется в основном двумя факторами: длительностью управления λ и построением узла искусственной коммутации.

Ниже показаны функциональные схемы СУИ, обеспечивающие работу АИН с рассмотренными выше узлами искусственной коммутации.

Система управления АИН с междуфазной коммутацией, функциональная схема которой показана на рис. 11-33, *а*, обеспечивает работу силовой схемы, изображенной на рис. 11-28. СУИ состоит из задающего генератора *G*, распределителя импульсов *DSC*, шести формирователей узких импульсов *AP1* и шести формирователей широких импульсов *AP2* (на рис. 11-33, *а* шесть формирователей показаны одним узлом). Генератор *G* формирует маломощные импульсы, частота которых пропорциональна входному сигналу u_f и равна 6-кратной частоте выходного напряжения инвертора. Импульсы *G* поступают на *DSC*, который обеспечивает работу формирователей *AP1* в определенной последовательности, показанной на рис. 11-33, *б*. Узкие импульсы подаются на тиристоры подзаряда и одновременно на формирователи *AP2*, предназначенные для основных тиристоров инвертора. Широкие импульсы представляют собой «пачку» высокочастотных импульсов. Каждый формирователь *AP2* имеет два входа: один для включения, а другой для отключения (на рис. 11-33, *а* не показан). Длительность широких импульсов 120°. Такая система управления применена в тиристорных преобразователях частоты ТПЧ-63/I.

Технические данные системы управления ТПЧ-63/I	
Диапазон изменения частоты, Гц	1÷75
Точность поддержания частоты, %	±0,5
Длительность узких импульсов управления, мкс, не менее	100
Длительность широких импульсов управления, град	120
Амплитуда напряжения импульсов управления, В, не менее	15
Амплитуда тока импульсов управления, А, не более	1,1
Крутизна нарастания тока импульсов, А/мкс, не менее	0,2
Частота высокочастотного генератора, кГц	2,5

Система управления, функциональная схема которой показана на рис. 11-34, *а*, обеспечивает работу силовой схемы, изображенной на рис. 11-29. Для основных тиристоров вырабатываются широкие импульсы длительностью 180° — $t_{зад}$, где $t_{зад}$ — задержка между импульсами коммутирующего и основного тиристоров.

Система управления состоит из пяти основных узлов: задающего генератора *G*, пересчетного кольца *DSC*, предварительного формирователя импульсов *AP1*, модулятора *M* и выходных формирователей импульсов *AP2*.

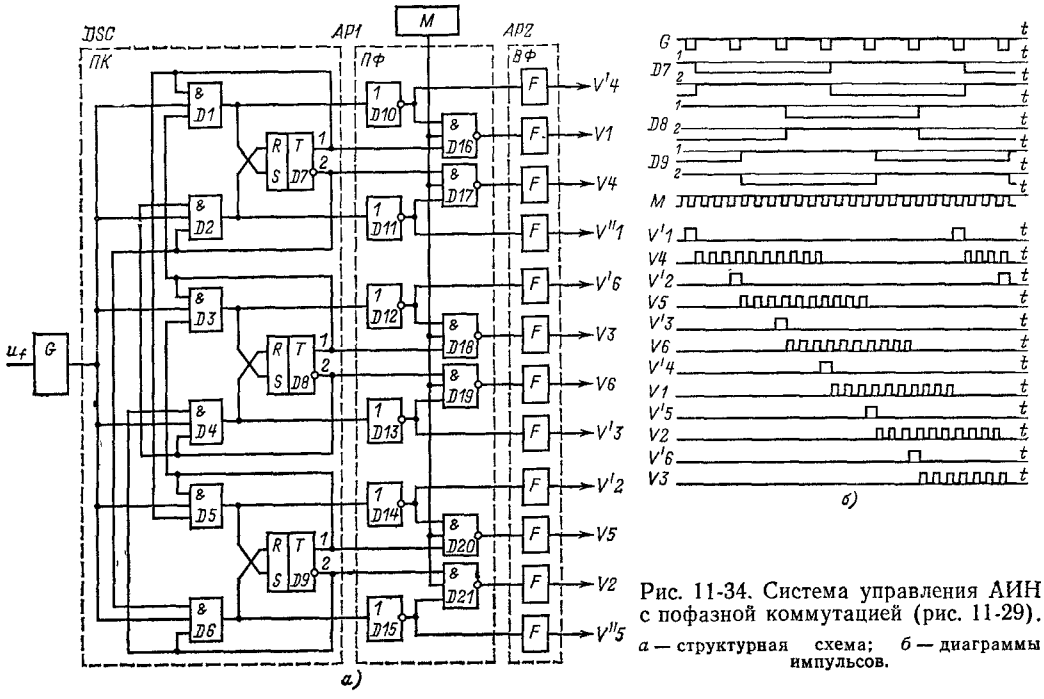


Рис. 11-34. Система управления АИН с пофазной коммутацией (рис. 11-29).
а — структурная схема; *б* — диаграммы импульсов.

Пересчетное кольцо *DSC* и предварительный формирователь *AP1* построены на логических элементах. Генератор *G* вырабатывает узкие отрицательные импульсы, длительность которых определяет задержку $t_{зад}$ (см. рис. 11-30, *а*), а частота пропорциональна входному сигналу u_y. Импульсы *G* поступают на *DSC*, которое выполнено на шести логических схемах И (*D1* — *D6*) и трех статических триггерах *D7* — *D9*. Состояние этих триггеров соответствует определенному состоянию основных тиристоров силовой схемы инвертора. Изменение состояния триггеров осуществляется выходными сигналами элементов *D1* — *D6*, на один из входов которых подаются импульсы генератора *G*. Каждая из шести схем И пропускает только один из шести импульсов генератора *G* таким образом, что переключение триггеров происходит по кольцу. Частота выходных сигналов триггеров при этом в 6 раз ниже частоты генератора *G*. В момент изменения состояния триггеров изменяется состояние тиристоров силовой схемы: один из основных тиристоров запирается, а очередной тиристор после окончания коммутации отпирается. Для этого в моменты изменения состояния триггеров система управления вырабатывает узкие импульсы управления коммутирующими тиристорами. Для управления коммутирующими тиристорами используются импульсы, которые изменяют состояние триггеров. Одновременно эти же импульсы запрещают появление управляющего импульса на выключающихся основных тиристорах в период коммутации. Последнее осуществляется с помощью схем И—НЕ (*D16—D21*), на входы которых подаются выходные сигналы соответствующих триггеров и их инверсные входные сигналы.

Для получения широких импульсов для основных тиристоров в схеме предусмотрен модулятор *M*, представляющий собой несимметричный высокочастотный мультивибратор. Импульсы модулятора поступают на входы схем И — НЕ. Схема управления, аналогичная рассмотренной, применена в тиристорных преобразователях частоты серии ПЧИ.

Другой вариант системы управления с двухступенчатой коммутацией, функциональная схема которой приведена на рис. 11-35, *а*, обеспечивает работу силовой схемы, изображенной на рис. 11-32.

Система управления вырабатывает:

а) узкие импульсы управления коммутирующими тиристорами;

б) узкие импульсы управления тиристорами подзаряда;

в) узкие импульсы управления тиристором гашения;

г) широкие импульсы управления основными тиристорами.

Кроме того, система управления осуществляет задержку подачи импульсов на основные тиристоры относительно соответствующих коммутирующих тиристоров, необходимую для завершения процессов запирания выходящего из работы основного тиристора. Формирование узких импульсов управления осуществляется тремя способами:

а) подключением источника напряжения к обмотке импульсного трансформатора;

б) разрядом предварительно заряженного конденсатора на обмотку импульсного трансформатора;

в) перемагничиванием сердечника импульсного трансформатора.

Широкие импульсы для основных тиристоров инвертора формируются путем выпрямления напряжения высокой частоты. Для этого в схеме предусмотрен высокочастотный генератор. Задержка подачи импульсов на ос-

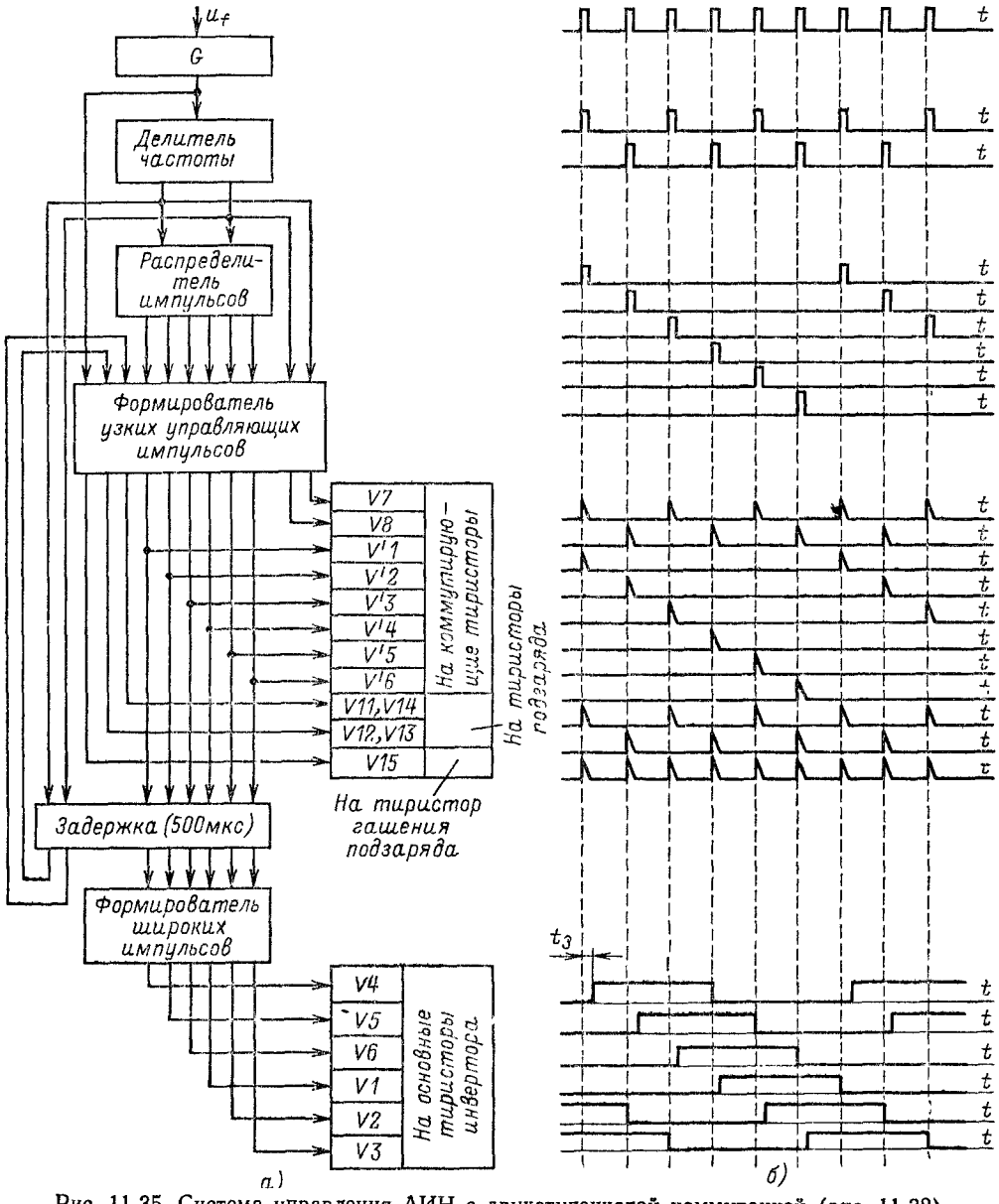


Рис. 11-35. Система управления АИН с двухступенчатой коммутацией (рис. 11-32).

а — структурная схема; *б* — диаграммы импульсов.

новные тиристоры реализуется с помощью формирователя задержки, основу которого составляет блокинг-генератор.

Сигнал управления u_f, определяющий частоту напряжения на выходе инвертора, поступает на вход задающего генератора *G*, который генерирует на выходе импульсы с частотой, пропорциональной входному сигналу u_f и равной 6-кратной частоте выходного напряжения инвертора. Импульсы генератора *G* поступают на делитель частоты и на один из каналов формирователя узких управляющих импульсов, на выходе которого формируются импульсы управления тиристором гашения подзаряда *V5*.

Делитель частоты представляет собой распределитель импульсов, имеющий два выхода. Импульсы на выходах делителя частоты формируются попеременно, т. е. находятся в противофазе и имеют частоту, в 2 раза меньшую частоты импульсов генератора *G* и равную 3-кратной частоте выходного напряжения инвертора. С выхода делителя импульсы поступают на распределитель импульсов, два канала формирователя узких импульсов, схему задержки.

Распределитель импульсов, управляемый делителем частоты, осуществляет распределение импульсов генератора *G* между шестью каналами формирователя узких импульсов та-

ким образом, что в каждом канале за один период выходного напряжения формируется только один импульс. Формируемые этими каналами узкие импульсы предназначены для управления коммутирующими тиристорами *V1 — V6*. Одновременно эти импульсы через схему задержки (500 мкс) поступают на шесть каналов формирователя широких импульсов. Сформированные широкие импульсы подаются на основные тиристоры инвертора. Таким образом, импульсы основных тиристоров инвертора формируются с задержкой относительно соответствующих им коммутирующих тиристоров.

Два канала формирователя узких импульсов, которые управляются выходными импульсами делителя частоты, предназначены для управления коммутирующими тиристорами *V7*, *V8*, работающими на тройной частоте выходного напряжения инвертора. Тиристоры подзаряда *V11 — V14* силовой схемы управляются двумя каналами формирователя узких импульсов, на которые через схему задержки поступают выходные импульсы делителя частоты.

Такая система управления применена в тиристорных преобразователях типа ТПЧ-100.

Технические данные системы управления ТПЧ-100

Диапазон изменения частоты, Гц . .	1÷75
Точность поддержания частоты, % .	±0,5
Длительность узких импульсов управления, мкс, не менее	100
Длительность широких импульсов управления с учетом времени задержки, град	180
Продолжительность задержки, мкс .	500
Амплитуда напряжения управляющих импульсов, В, не менее . . .	15
Амплитуда тока управляющих импульсов, А, не более	1,1
Крутизна нарастания тока управляющего импульса, А/мкс, не менее .	0,2
Частота напряжения высокочастотного генератора, кГц	2,5

Система защиты предназначена для отключения отдельных силовых узлов или АИН в целом при возникновении аварийных режимов, а также для сигнализации причин аварийного отключения.

Основными аварийными режимами являются: перегрузка и к. з. в цепи нагрузки; срыв инвертирования («опрокидывание» АИН), возникающий при одновременном открытии двух противофазных основных тиристоров вследствие нарушения работы УИК или при пробое тиристоров; перенапряжения на силовых тиристорах.

Кроме перечисленных могут возникать различного рода аварийные режимы, связанные с особенностью построения как силовой схемы АИН, так и системы управления. К их числу, например, можно отнести накопление избыточной энергии в контуре коммутации, пробой тиристора подзаряда и др.

Защита от токов перегрузки и к. з. осуществляет отключение преобразователя и снятие управляющих импульсов с тиристоров управляемого выпрямителя при перегрузке преобразователя. В случае возникновения тока к. з. преобразователь отключается мгновенно. В случае перегрузки по току преобразователь отключается с выдержкой времени, в течение которой ток может быть снижен системой регулирования. Как правило, в качестве датчика тока используются трансформаторы тока, установленные на шинах питания силового выпрямителя.

Защита при опрокидываниях инвертора осуществляет отключение преобразователя и снятие управляющих импульсов с тиристоров силового выпрямителя. Сигнал на отключение преобразователя формируется датчиком входного тока инвертора или специальной схемой, фиксирующей одновременное открытие противофазных тиристоров АИН. ,

Защита от перенапряжений обычно осуществляется с помощью *RC*-цепей, включенных параллельно тиристорам.

Наладка ТПЧИ включает проверку силовой части схемы, настройку системы управления преобразователем и защиты. Методика проверки силовой схемы УВ полностью аналогична приведенной в § 11-5.

Наладка силовой схемы АИН производится в следующей последовательности:

производится внешний осмотр блоков на отсутствие механических повреждений;

проверяется комплектность силовых шкафов;

проверяется наличие заземления шкафов;

производится измерение сопротивления изоляции всех основных токоведущих цепей;

проверяется визуально и с помощью прозвонки соответствие монтажа силовой части принципиальной схеме;

определяется визуально и с помощью прозвонки целостность защитных *RC*-цепей, шунтирующих тиристоры;

проверяется целостность элементов узла защиты от перенапряжений, включенного на входе выпрямителя;

проверяется напряжение источников подзаряда коммутирующего конденсатора; значение напряжения указывается в инструкции завода-изготовителя;

проверяется наличие цепей обратных диодов АИН;

производится проверка времени выключения основных тиристоров, установленных в силовых блоках АИН с двухступенчатой коммутацией, время выключения основных тиристоров должно быть не более 50 мкс; при бо́льших значениях этого времени запираемый основной тиристор в конце процесса коммутации может не успеть восстановить свои запирающие свойства, что повлечет за собой опрокидывание АИН и отключение преобразователя; время выключения, как правило, указывается в инструкции завода-изготовителя и проверяется по маркировке основных тиристоров. Тиристоры разделяются на девять групп, предпоследняя цифра в обозначении тиристора определяет указанную группу; в табл. 11-5 показано распределение тиристоров по группам в зависимости от времени выключения.

Наладка системы управления. Систему управления ТПЧИ можно разделить на две составные части: систему управления выпрямителем — СИФУ, наладка которой рас-

Таблица 11-5

Распределение тиристоров по группам в зависимости от времени выключения

Группа	Время выключения, мкс	Группа	Время выключения, мкс
0	Не нормируется	5	До 50
		6	До 30
1	До 250	7	До 20
2	До 150	8	До 15
3	До 100	9	До 12
4	До 70		

смотрена в § 11-5, и систему управления инвертором — СУИ. Наладка системы управления инвертором заключается в основном в проверке ее на функционирование. Для этого на СУИ подается напряжение питания, при этом силовое напряжение снято. На вход СУИ подается сигнал управления от внешнего источника. Изменяя сигнал, проверяют работоспособность задающего генератора, снимают характеристику $f=f(u_y)$. Затем проверяют работоспособность всех каналов формирования управляющих импульсов, для чего осциллограф подключают к управляющим электродам тиристоров инвертора. Оценивают параметры импульсов, особое внимание обращая на их длительность и фронты. Если длительность не соответствует необходимому значению для данной схемы, следует проверить работу пересчетного кольца или формирователей импульсов. Если крутизна переднего фронта не соответствует указанной в инструкции завода-изготовителя, необходимо проверить элементы формирователей. В случае недостаточной крутизны заднего фронта необходимо проверить цепи размагничивания импульсных трансформаторов.

Затем проверяется очередность поступления и взаимное расположение во времени импульсов управления тиристорами инвертора. Эту операцию удобно выполнять с помощью двухлучевого осциллографа (например, типа С1-64 и т. д.). На один канал осциллографа подают импульсы задающего генератора (их же подают на вход внешней синхронизации осциллографа), на другой — импульсы управления тиристорами. Это позволяет проверить взаимную ориентацию импульсов относительно импульсов задающего генератора, период которых составляет 60° выходного напряжения инвертора. Особое внимание уделяется проверке продолжительности задержки между моментами формирования импульсов основных тиристоров и моментами формирования импульсов коммутирующих тиристоров в АИН с двухступенчатой коммутацией.

После наладки системы управления проверяется форма напряжения на нагрузке; при этом учитывается характер нагрузки; при активной нагрузке форма напряжения может не соответствовать указанной в инструкции завода-изготовителя для реальной нагрузки; это относится к ТПЧИ с $\lambda=120°$; при проверке формы напряжения следует пользоваться табл. 11-3.

11-11. НАЛАДКА ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ СВЯЗЬЮ

Принцип непосредственного преобразования напряжения промышленной частоты питающей сети в напряжение требуемой частоты основан на поочередной работе двух управляемых нереверсивных выпрямителей (вен-

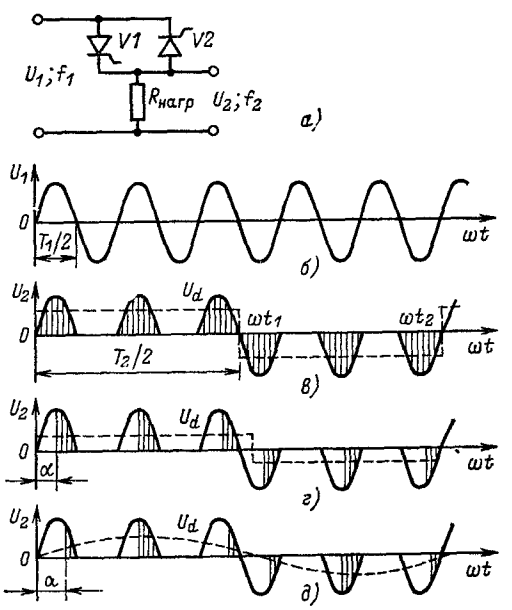


Рис. 11-36. Однофазно-однофазный ТПЧН.

а — схема; *б—д* — диаграммы напряжений при различных углах регулирования α.

тильных групп) при их работе на общую нагрузку. Частота переключения вентильных групп, определяемая системой управления преобразователем, обеспечивает протекание в нагрузке переменного тока требуемой частоты. Элементарный однофазно-однофазный преобразователь (рис. 11-36, *а*) позволяет преобразовать однофазное входное напряжение U_1 с частотой f_1 в однофазное выходное напряжение U_2 с частотой f_2. Схема преобразователя состоит из двух встречно-параллельно включенных вентилей *V1* и *V2* и активного сопротивления нагрузки $R_{нагр}$. При открытом вентиле *V1* с $\alpha=0$ и закрытом вентиле *V2* выпрямленное напряжение на нагрузке будет таким же, как в обычном однофазном управляемом выпрямителе. При открытом вентиле *V2* и закрытом *V1* выпрямленное напряжение на нагрузке имеет противоположную полярность. При поочередном открытии вентилей *V1* и *V2* на выходе ТПЧН формируется знакопеременное напряжение U_2, образованное из участков синусоид питающего напряжения U_1. Частота напряжения U_2 ниже частоты напряжения U_1 источника питания, т. е. ТПЧН является делителем частоты. Изменяя угол регулирования α в каждом очередном полупериоде питающего напряжения, можно одновременно с частотой регулировать амплитуду и

форму напряжения на нагрузке U_d, приближая ее, например, к синусоидальной (рис. 11-36, *д*).

Широкое применение получили ТПЧН, выполненные на основе трехфазных нулевых и мостовых схем выпрямления (рис. 11-37). Такие ТПЧН по принципу работы и построению силовых схем, а также систем управления ана-

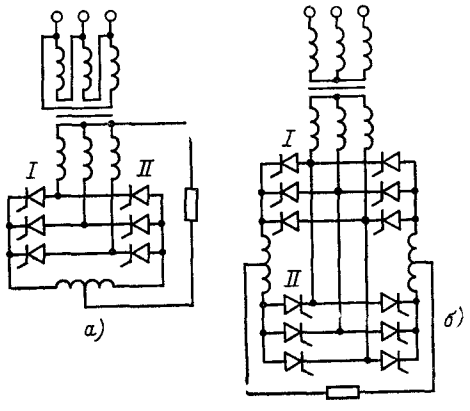


Рис. 11-37. Схемы трехфазно-однофазных ТПЧН.

а — нулевая; *б* — мостовая.

логичны реверсивным тиристорным преобразователям постоянного тока, работающим в режиме отработки знакопеременного сигнала управления. Включение вентильных групп в ТПЧН осуществляется по встречно-параллельной схеме; управление вентильными группами — совместное или раздельное. Форма выходного напряжения зависит от принятого закона управления преобразователем. При периодическом переключении групп и постоянном угле регулирования (α=const) форма выходного напряжения будет близка к прямоугольной.

При чисто активной нагрузке и таком управлении выходное напряжение преобразователя, выполненного по схеме рис. 11-37, имеет вид, изображенный на рис. 11-38, *а* (при использовании широких импульсов управления). В интервале $0-\omega t_1$ ток проводят вентили группы I. Коммутация тока с вентиля на вентиль осуществляется естественным образом в момент подачи управляющего импульса; этот момент определяется углом регулирования α, отсчитываемым от точки естественной коммутации. В момент ωt_1 система управления преобразователем подает команду на переключение вентильных групп. При активной нагрузке ток в момент ωt_1 равен нулю, одновременно происходит включение группы II, формирующей отрицательные полуволны тока и напряжения; форма выходного напряжения симметрична в этом случае только при фиксированных значениях выходной частоты

$$f_2 = \frac{m_1 f_1}{2n + m_1},$$

где m_1 — число эквивалентных фаз выпрямления (для трехфазной нулевой схемы m_1=3, для трехфазной мостовой m_1=6); f_1 — частота питающей сети; n — последовательный ряд целых чисел (1, 2, 3 и т. д.), определяющих значения фиксированных частот. При активно-индуктивной нагрузке (рис. 11-38, *б*) и прямоугольной форме выходного напряжения в момент изменения знака сигнала управления (момент ωt_1 на рис. 11-38) ток, поддерживаемый э. д. с. нагрузки, продолжает протекать в прежнем направлении, при этом группа I работает в инверторном режиме. Процесс переключения вентильных групп зависит от способа управления. При раздельном управлении имеет место бестоковая пауза $\Delta\omega t$. Длительность работы вентильных групп определяет частоту, а угол регулирования — амплитуду выходного напряжения.

Силовые схемы. Трехфазная система напряжений с переменными значениями частоты и амплитуды, необходимая для регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока, получается путем компоновки трех трехфазно-однофазных преобразователей, выходные напряжения которых сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120°. В зависимости от силовой схемы вентильных групп преобразователей, схемы соединения нагрузки и трансформаторов возможны различные

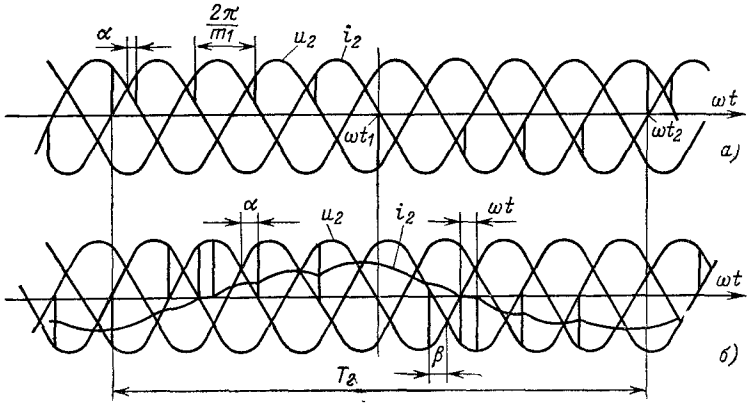


Рис. 11-38. Диаграммы напряжений и токов в трехфазно-однофазном ТПЧН.

а — при работе на активную нагрузку; *б* — при работе на активно-индуктивную нагрузку

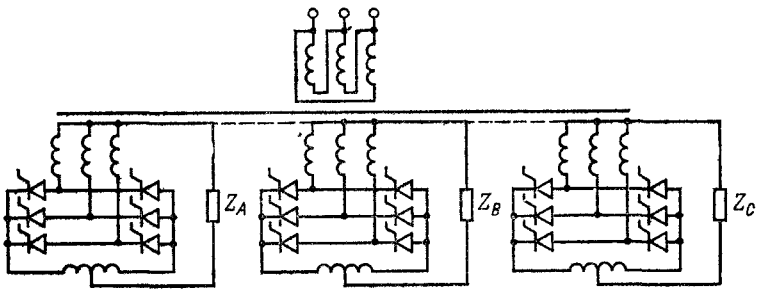


Рис. 11-39. Трехфазно-трехфазный ТПЧН на нулевых схемах.

структуры трехфазных преобразователей частоты.

В случае компоновки преобразователя из трехфазно-однофазных, вентильные группы которых выполнены по нулевой схеме, фазы нагрузки могут быть как потенциально разделены, так и потенциально связаны. При потенциально разделенных фазах нагрузки (рис. 11-39) процессы в каждом преобразователе протекают независимо друг от друга. Вентильные группы преобразователя могут получать питание от одного многообмоточного трансформатора (рис. 11-39) или от индивидуальных двухобмоточных трансформаторов. При потенциально связанных фазах нагрузки, например соединенных по схеме звезды, применяется схема, изображенная на рис. 11-39, в которой нулевые выводы вторичных обмоток трансформаторов объединяются и могут быть соединены с нулевой точкой нагрузки (показано пунктиром на рис. 11-39). С целью упрощения конструкции трансформаторов при потенциально связанных фазах нагрузки питание вентильных групп всех трех трехфазно-однофазных преобразователей осуществляется от одного трансформатора (рис. 11-40) или непосредственно от сети, если напряжение сети соответствует требуемому напряжению на нагрузке. В последнем случае питание преобразователя осуществляется через токоограничивающие реакторы. Возможность использования схемы с потенциально связанными фазами нагрузки, а также простота силовой части являются достоинствами схемы, изображенной на рис. 11-40. Недостатком схемы является усиленное взаимное влияние преобразователей, обусловленное коммутационными процессами.

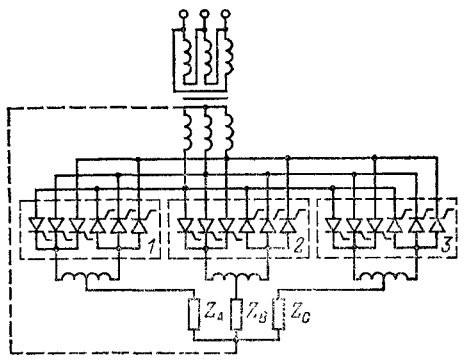


Рис. 11-40. Трехфазно-трехфазный ТПЧН на нулевых схемах с одним трансформатором.

В случае компоновки преобразователя из трехфазно-однофазных, вентильные группы которых выполнены по мостовой схеме, фазы нагрузки могут быть потенциально связаны только при питании вентильных групп от индивидуальных вентильных обмоток трансформатора. В противном случае, т. е. при питании вентильных групп от общей вентильной обмотки трансформатора или от сети, появляются дополнительные контуры уравнительного тока между вентильными группами разных фаз нагрузки. При питании вентильных групп от общего источника в каждом трехфазно-однофазном преобразователе (независимо от схемы соединения многофазной нагрузки) будет существовать два независимых контура уравнительного тока аналогично реверсивному преобразователю постоянного тока с совместным управлением (§ 11-7). Кроме этих контуров при потенциально связанных фазах нагрузки и соединении ее, например, по схеме звезды с нулевым выводом дополнительно образуются шесть контуров уравнительного тока.

Указанные причины не позволяют использовать общее питание вентильных групп, выполненных по мостовым схемам, при потенциально связанных фазах нагрузки; при необходимости устанавливается выходной разделительный трансформатор с потенциально связанными первичными обмотками; нагрузка, подключаемая к вторичным обмоткам этого трансформатора, может иметь любую схему соединения. Так как наибольшая частота выходного напряжения преобразователя с естественной коммутацией вентилей обычно не превышает примерно половины частоты напряжения питания, а рабочий диапазон отдельных приводов ограничивается частотами от нуля до 6—10 Гц, то использование трансформатора на таких частотах представляет значительные трудности из-за существенного увеличения его габаритов.

В случае невозможности потенциального разделения фаз нагрузки для устранения дополнительных контуров уравнительного тока производится потенциальное разделение источников питания вентильных групп отдельных трехфазно-однофазных преобразователей. Питание отдельных вентильных групп в каждом преобразователе может быть осуществлено от общей обмотки трансформатора или от индивидуальных обмоток. В последнем случае в каждом преобразователе имеется один контур уравнительного тока. При раздельном

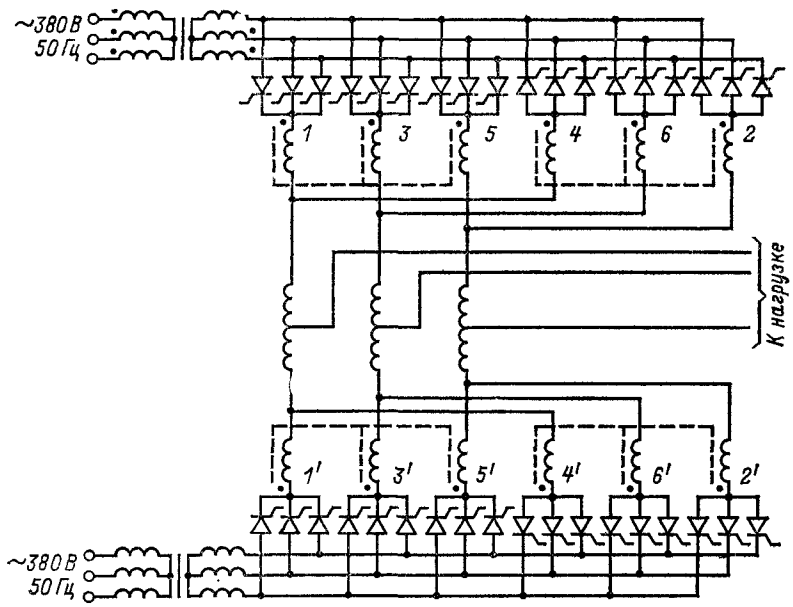


Рис. 11-41. Упрощенная силовая схема преобразователя частоты серии ПЧН.

управлении вентильными группами исчезают только внутренние контуры уравнительного тока. Поэтому и в случае раздельного управления вентильными группами, выполненными по мостовой схеме, и потенциально связанных фазах нагрузки питание преобразователей должно производиться от потенциально разделенных источников. Общая структура силовых схем в случае раздельного управления сохраняется прежней, как и при совместном управлении. Уравнительные реакторы при этом могут быть исключены из схемы.

В серийно выпускаемых комплектных устройствах серии ПЧН объединения ХЭМЗ используется ТПЧН, вентильные группы которого образуют эквивалентную шестифазную схему выпрямления звезда — обратная звезда с уравнительным реактором. Силовая схема ТПЧН приведена на рис. 11-41. Вентильные группы *1, 3, 5, 1', 3', 5'* образуют катодную группу реверсивного ТПЧН, а вентильные группы *4, 6, 2, 4', 6'* и *2'* — анодную. Пары вентильных групп *1—4* и *1'—4'*; *3*—6 и *3'—6'*; *5—2* и *5'—2'* связаны между собой через три однофазных уравнительных реактора, обеспечивающих работу преобразователя в эквивалентном шестифазном режиме. Каждый преобразователь получает питание от индивидуального двухобмоточного согласующего трансформатора. Напряжение вторичных обмоток одноименных фаз этих трансформаторов находятся в противофазе. Обмотки асинхронного двигателя, собранные по схеме звезды или треугольника, подключены к средним точкам уравнительных реакторов.

Система управления ТПЧН обеспечивает регулирование частоты и амплитуды выходного напряжения, а также формирование требуемого закона управления преобразователем.

Влияние закона управления на форму выходного напряжения. Под законом управления подразумевается определенное изменение во времени сигнала u_y на входе системы управления. От выбранного закона управления зависит форма напряжения на нагрузке. При питании АД желательно иметь форму напряжения, близкую к синусоидальной. Условию синусоидальности выходного напряжения соответствует

$$\alpha = \arccos(\nu \sin \omega_2 t), \qquad (11\text{-}24)$$

где α — угол регулирования; $\nu = u_{2max}/E_{d0}$ — относительное значение амплитуды выходного напряжения; u_{2max} — амплитуда выходного напряжения; E_{d0} — среднее значение э. д. с. преобразователя при $\alpha = 0$; ω_2 — круговая частота выходного напряжения.

Управление входным сигналом u_{*y}, реализующее (11-24), зависит от фазной характеристики системы управления. Как показано в § 11-3, фазная характеристика зависит от формы опорного напряжения и бывает линейной или арккосинусоидальной (рис. 11-9).

При линейной фазной характеристике (при пилообразном опорном напряжении) условию синусоидальности выходного напряжения соответствует

$$u_{*y} = \frac{\arccos(\nu \sin \omega_2 t) - \alpha_0}{90°}. \qquad (11\text{-}25)$$

Зависимость (11-25) при $\alpha_0 = 90°$ показана на рис. 11-42, из которой видно, что для получения максимальной амплитуды выходного напряжения управляющее напряжение u_{*y} должно иметь треугольную форму. При меньшей амплитуде форма управляющего напряжения отклоняется от треугольной. Как правило, ввиду ограничения углов регулирования на уровне α_{min} и β_{min} $\nu \leqslant 0{,}8 \div 0{,}9$, что позволяет использовать управляющее напряжение синусоидальной формы. Погрешность

такой замены для $\nu \leqslant 0{,}8 \div 0{,}9$ не превышает 10 %.

При арккосинусоидальной фазной характеристике (при синусоидальном опорном напряжении) условию синусоидального выходного напряжения соответствует синусоидальное изменение входного сигнала

$$u_{*y} = \nu \sin \omega_2 t - \cos \alpha_0. \qquad (11\text{-}26)$$

Сложность создания аналогового управляющего устройства, обеспечивающего регулирование сигнала в широком диапазоне по частоте и амплитуде, а также строгий сдвиг фаз сигналов на 120° для трехфазных ТПЧН обусловили применение на практике так называемого прямоугольного закона управления, при котором в качестве u_{*y} используется переменное напряжение прямоугольной формы. Частота и амплитуда этого сигнала определяют соответственно частоту и амплитуду выходного напряжения ТПЧН. Прямоугольный закон позволяет обеспечить строгий сдвиг фаз 120° фазных напряжений на нагрузке.

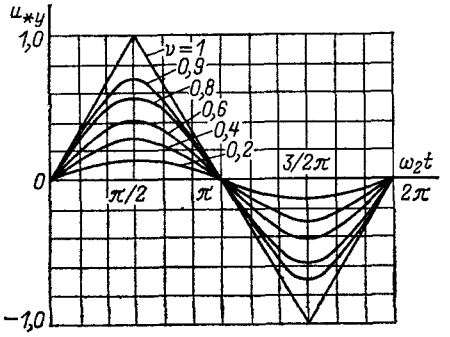


Рис. 11-42. Зависимость $u_{*y}=f(\omega_2 t)$, обеспечивающая синусоидальную форму выходного напряжения ТПЧН при линейной фазной характеристике.

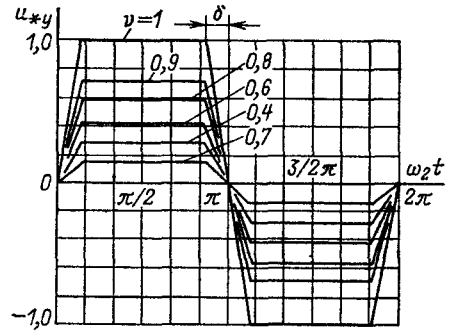


Рис. 11-43. Зависимость $u_{*y}=f(\omega_2 t)$, обеспечивающая трапецеидальную форму выходного напряжения ТПЧН при арккосинусоидальной фазной характеристике.

Реализовать прямоугольный закон можно только при раздельном управлении вентильными группами; при совместном управлении вследствие скачкообразного изменения углов регулирования возникают большие «броски» уравнительного тока. В этом случае приходится использовать закон управления, обеспечивающий трапецеидальную форму кривой выходного напряжения. Минимальная «степень трапецеидальности» характеризуется углом δ (рис. 11-43), который зависит от отношения входной и выходной частот ω_1/ω_2. По мере уменьшения этого отношения угол δ во избежание значительных динамических уравнительных токов приходится увеличивать; в пределе он может достигать 90°. При увеличении угла δ может уменьшаться амплитуда выходного напряжения преобразователя.

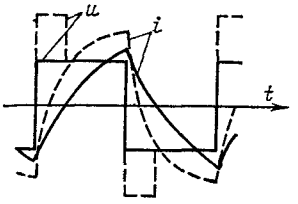


Рис. 11-44. Форма тока при прямоугольной форме напряжения.

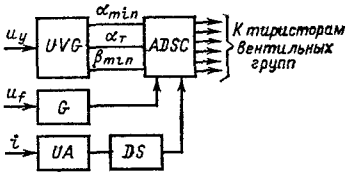


Рис. 11-45. Упрощенная функциональная схема системы управления ТПЧН.

При синусоидальном выходном напряжении ток нагрузки также будет иметь синусоидальную форму. Однако из-за трудности обеспечения синусоидальной формы выходного напряжения, а также учитывая наибольшие неприятности от высших гармонических тока нагрузки, стремятся в первую очередь получить форму тока, близкую к синусоидальной. При активной нагрузке синусоидальный ток обеспечивается только при синусоидальной форме напряжения; при активно-индуктивной нагрузке форма тока, близкая к синусоидальной, может быть получена при выходном напряжении, форма которого существенно отличается от синусоиды. Поэтому в ТПЧН, нагрузкой которых является электродвигатель переменного тока, практически стремятся выбрать такой закон управления, который обеспечивает, с одной стороны, простоту системы управления, а с другой — наибольшее приближение формы тока к синусоидальной. Прямоугольная форма сигнала управления, обеспечивающая аналогичную форму выходного напряжения, позволяет получить форму тока, представляющую собой отрезки экспоненциальных кривых (рис. 11-44), что приводит к появлению четных гармоник в кривой тока. При соответствующей корректировке закона управления (показано пунктиром на рис. 11-44), заключающейся в форсировке выходного напряжения при команде на нарастание и спадание тока, форма тока

становится близкой к трапецеидальной, что в большей степени приближает ее к синусоидальной. Такой закон управления осуществляется системой управления, упрощенная функциональная схема которой приведена на рис. 11-45. Особенностью схемы является управление преобразователем двумя сигналами: u_y и u_f. Первый подается на вход СИФУ *UVG* и определяет амплитуду тока нагрузки, второй — на вход задающего генератора (ЗГ) *G* и обеспечивает требуемую частоту тока нагруз-

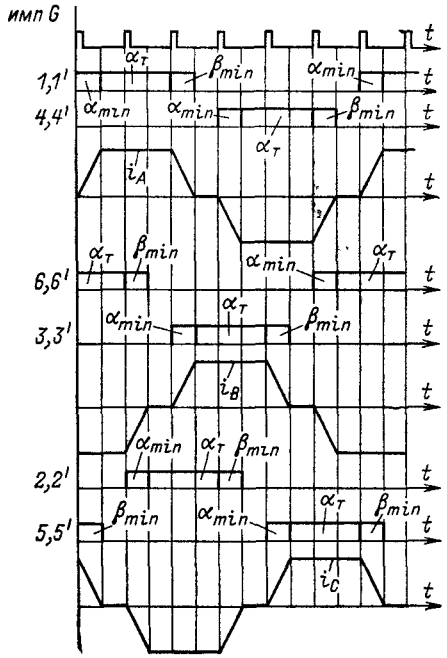


Рис. 11-46. Диаграммы, поясняющие принцип формирования тока нагрузки трапецеидальной формы.

ки. Задающий генератор формирует команды на переключение вентильных групп трехфазно-однофазных преобразователей, входящих в состав ТПЧН. СИФУ вырабатывает три системы управляющих импульсов с углами регулирования α_{min}, $\alpha_т$ и β_{min}. Импульсы с углами α_{min} и β_{min} обеспечивают форсировку выходного напряжения соответственно при нарастании и спадании тока; импульсы с углом $\alpha_т$, который зависит от u_y, определяет амплитудное значение тока. Распределение перечисленных систем импульсов по трехфазно-однофазным преобразователям ТПЧН осуществляется блоком переключения импульсов (БПИ) *ADSC*, управление которым осуществляется командами ЗГ и системой раздельного управления, состоящей из ЛПУ *DS* и ДНТ *UA* (см. § 11-8).

Процесс формирования тока нагрузки в силовой схеме (рис. 11-41) показан на рис. 11-46. На интервале $t_1 — t_2$ управляющие импульсы подаются на тиристоры четырех вентильных групп *1*, *1'*, *6* и *6'*, тиристоры других вентильных групп при этом заперты. Ток протекает по двум фазам нагрузки *A* и *B* и по последовательно включенным обмоткам дросселей *L1*, *L2*, *L3*, *L4*. Фаза управляющих импульсов ($\alpha_т$=const) определяет требуемую амплитуду тока. В момент времени t_2 управляющие импульсы начинают подаваться на тиристоры входящих в работу вентильных групп *2*, *2'* в предельном выпрямительном режиме, а управляющие импульсы выходящих из работы вентильных групп *6*, *6'* сдвигаются в предельный инверторный режим. Таким образом, на коммутационном участке (интервал $t_2 — t_3$) в работе участвуют шесть вентильных групп *1*, *1'*, *6*, *6'*, *2*, *2'*, причем входящие в работу группы работают с углами регулирования α_{min} (предельный выпрямительный режим), выходящие из работы — с углами регулирования β_{min} (предельный инверторный режим), остающиеся в работе группы — с углом регулирования $\alpha_т$=const. В процессе коммутации в выходящей из работы группе ток нагрузки спадает до нуля, а во входящей в работу группе возрастает до заданного значения. Длительность спадания тока при заданном значении β_{min} зависит только от характера и параметров нагрузки. В момент спадания тока до нуля (момент t_3 на рис. 11-46) дается команда на смену углов регулирования в группах *2* и *2'*, вместо импульсов с углом α_{min} подаются импульсы с углом $\alpha_т$. Такие процессы циклически повторяются через 60° выходного напряжения ТПЧН.

Основные узлы системы управления. Рассмотренный выше принцип формирования закона управления и тока нагрузки реализован в преобразователях типа ПНЧ объединения ХЭМЗ; упрощенная функциональная схема системы управления преобразователем приведена на рис. 11-47 и включает функциональные блоки: фазосмещающего устройства (БФСУ) *AUVG*, задающего генератора (БЗГ) *AG1*, синхронизированного задающего генератора (БСЗГ) *AG2*, датчика нулевого тока (БДНТ) *AUA1*, логики (БЛ) *ADS*, переключения импульсов (БПИ) *ADSC1* (2), защиты и сигнализации (БЗС) *AF*.

БФСУ *AUVG* аналогично СИФУ *UVG* (рис. 11-45) вырабатывает три системы управляющих узких импульсов, каждая из которых включает шесть импульсов с углами регулирования соответственно $\alpha_т$, α_{min}, β_{min}; фаза шести импульсов $\alpha_т$ регулируется в функции сигнала u_y (рис. 11-48) и определяет амплитудное значение тока в межкоммутационный период; фаза других двенадцати управляющих импульсов (α_{min} и β_{min}) остается постоянной.

Формирование заданной частоты выходного напряжения осуществляется одним из двух блоков БЗГ или БСЗГ в функции сигнала u_f. Блок БЗГ формирует сигналы плавного задания частоты, а блок БСЗГ — сигналы фиксированных частот, кратных частоте питающей сети.

Помимо сигнала u_f на вход БЗГ подается сигнал *Вп — Нз*, определяющий направление вращения двигателя. На выходе БЗГ формируется трехфазная симметричная система сигналов, частота которых определяется сигналом u_f, а порядок чередования — сигналом *Вп — Нз*.

БЛ совместно с БНДТ предназначен для обеспечения раздельной работы вентильных

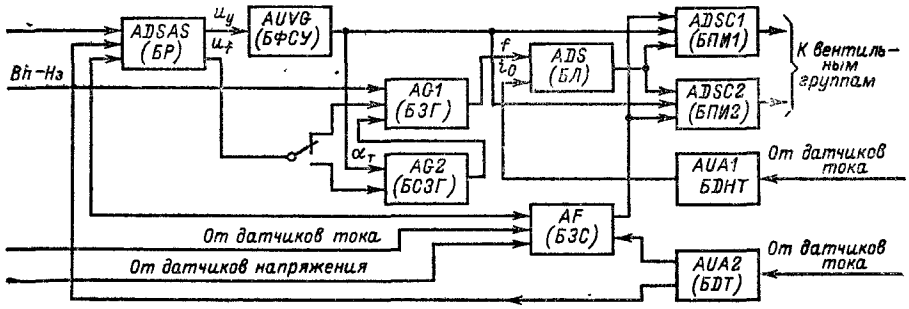


Рис. 11-47. Функциональная схема системы управления преобразователем частоты серии ПЧН.

групп ТПЧН, а также для разделения выходных сигналов БДНТ на сигналы наличия и отсутствия тока в каждой вентильной группе ТПЧН. БПИ1 и БПИ2 реализуют требуемую

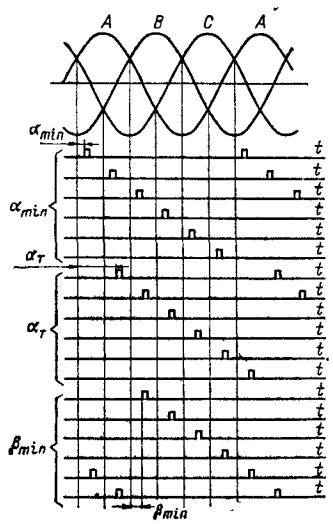


Рис. 11-48. Диаграммы, поясняющие фазировку импульсов управления α_{min}, α_τ, β_{min}.

программу управления каждым тиристором вентильных групп в функции выходных сигналов БЗГ и БЛ.

БЗС предназначен для выработки команд на включение защиты в аварийных режимах (короткое замыкание, перегрузка) и индикации характера аварийного режима.

БЗГ формирует трехфазную систему прямоугольных сигналов задания (прямого и обратного чередования) частоты выходного напряжения (тока) преобразователя длительностью 120 и 180° выходного напряжения и систему сигналов, задержанных относительно сигналов задания на время τ. Функциональная схема БЗГ приведена на рис. 11-49 и включает в себя задающий генератор *G*, узел реверса *DSAS*, пересчетное кольцо *DSC*, формирователь сигналов задания длительностью 120° выходной частоты *AP*, узел задержки *DT*.

На выходе ЗГ формируются импульсы длительностью 300 мкс, частота следования которых пропорциональна входному сигналу u_f и равна 6-кратной частоте выходного напряжения. *DSC* представляет собой замкнутую кольцевую схему и предназначен для преобразования импульсов ЗГ (либо БСЗГ) в трехфазную симметричную систему сигналов длительностью 180°, сдвинутых относительно друг друга на 120° выходного напряжения, сигналы $\pm A$ (180°), $\pm B$ (180°), $\pm C$ (180°). В формирователе *AP* формируются сигналы

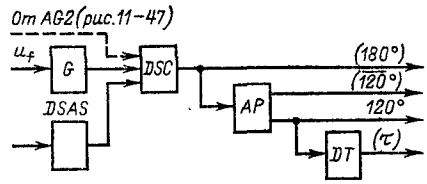


Рис. 11-49. Функциональная схема БЗГ.

задания длительностью 120°, сигналы $\pm A$ (120°), $\pm B$ (120°), $\pm C$ (120°), которые затем инвертируются элементом НЕ. На выходе инвертора сигналы $\pm A$ (120°), $\pm B$ (120°), $\pm C$ (120°). Импульсы *AP* задерживаются в узле задержки τ (сигналы $\pm A_\tau$, $\pm B_\tau$, $\pm C_\tau$).

DSAS предназначен для изменения направления вращения электродвигателя. Реверс обеспечивается изменением чередования фаз выходного напряжения преобразователя, которое осуществляется изменением последовательности счета *DSC*. На выходе *DSC* формируются сигналы, определяющие прямой пересчет (направление вращения «Вперед») или обратный (направление вращения «Назад»). Управление узлом реверса производится сигналом от универсального переключателя, определяющего направление вращения двигателя.

Выходные сигналы БЗГ 120° подаются на вход БЛ, а сигналы τ — на входы БПИ1 и БПИ2. На рис. 11-50 приведены диаграммы выходных сигналов БЗГ при вращении электродвигателя в направлении «Вперед».

ЗГ служит для формирования импульсов, частота следования которых пропорциональна входному сигналу.

Блок переключения импульсов БПИ предназначен для переключения управляющих им-

пульсов тиристоров силовой схемы по требуемому закону в функции сигналов задания частоты выходного напряжения преобразователя и сигналов наличия (отсутствия) тока в фазах нагрузки.

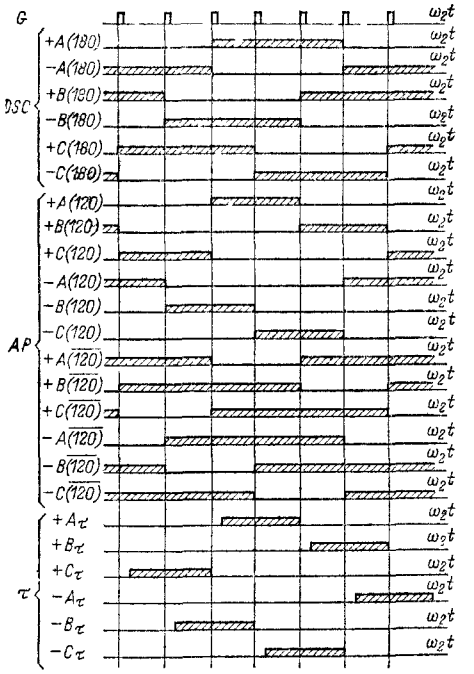


Рис. 11-50. Диаграммы сигналов БЗГ.

Схемы БПИ1 и БПИ2 обеспечивают:

а) подачу управляющих импульсов к тиристорам вентильной группы с углом регулирования α_{min} при наличии сигнала разрешения работы данной группы и наличии тока в выходящей из работы вентильной группе;

б) подачу управляющих импульсов к тиристорам вентильной группы с углом регулирования α_τ при наличии сигнала разрешения работы данной группы и отсутствия тока в выходящей из работы вентильной группе;

в) подачу управляющих импульсов к тиристорам работающей вентильной группы с углом регулирования β_{min} при исчезновении сигнала разрешения на работу данной группы в течение времени спадания тока в данной группе до нуля.

Кроме того, в БПИ1 и БПИ2 узкие импульсы α_τ, α_{min}, β_{min} преобразуются в широкие длительностью 120° напряжения сети, которые заполняются высокочастотными сигналами от несимметричного мультивибратора, расположенного в блоке БЗС. Логическая схема переключения функционально представляет собой 18 каналов селекции импульсов управления (по числу вентилей одной половины силовой схемы ТПЧН), объединенных в шесть групп $+A_2$, $-A_2$ $+B_2$, $-B_2$ $+C_2$, $-C_2$, каждая из которых производит распределение управляющих импульсов для тиристоров одной вентильной группы. Одна группа имеет три канала, каждый из которых предназначен для управления одним тиристором вентильной группы.

Функциональная схема канала переключения для одного тиристора силовой схемы приведена на рис 11-51 (для примера взят тиристор группы $+A_2$).

Для прохождения импульса α_{min} тиристоров группы $+A_2$ необходимы следующие условия:

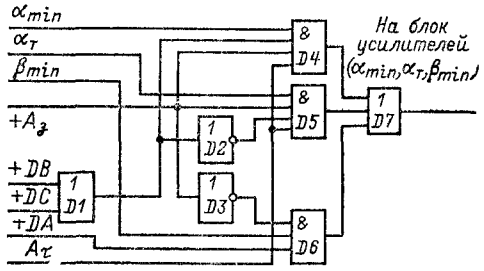


Рис. 11-51. Функциональная схема одного канала переключения.

а) разрешение на включение данной группы вентилей (сигнал $+A$ блока БЛ);

б) наличие тока в выходящей из работы фазе нагрузки (это может быть сигнал $+DC$ или $+DB$ в зависимости от чередования фаз нагрузки);

в) наличие сигнала запаздывания (A_τ).

При выполнении этих условий на выход схемы ИЛИ (элемент *D7* на рис. 11-51) проходит только импульс α_{min}. По окончании коммутации тока между фазами нагрузки ТПЧН импульсы α_{min} снимаются и на тиристоры вступившей в работу группы подаются импульсы α_τ. Разрешение на прохождение импульса α_τ для тиристоров группы $+A_2$ дается при наличии трех сигналов:

а) разрешения на работу данной группы вентилей (сигнал $+A$ блока БЛ);

б) отсутствия тока в двух других однозначных группах ($+DC$, $+DB$);

в) запаздывания ($+A_\tau$).

При выполнении этих условий на выход элемента *D7* проходит только импульс α_τ.

Разрешение на прохождение импульса β_{min} дается при наличии двух условий:

а) запрета на включение данной вентильной группы ($+A$);

б) наличия тока в данной группе ($+DA$).

На выходе элемента *D7* в этом случае может формироваться лишь импульс β_{min}.

Наладка ТПЧН включает проверку силовой части схемы, настройку системы управления преобразователем и защиты. Наладка ТПЧН рассматривается на примере серийно выпускаемого производственным объединением ХЭМЗ комплектного устройства ПЧН.

Силовая схема ПЧН представляет собой три реверсивных тиристорных преобразователя постоянного тока. Методика проверки силовой схемы ПЧН полностью аналогична приведенной в § 11-5.

Систему управления ПЧН можно разделить на две составные части: первую,

предназначенную для выработки управляющих импульсов, обеспечения заданной амплитуды выходного напряжения и реверса тока в вентильных группах; вторую, обеспечивающую заданную частоту выходного напряжения. К первой части относятся блоки БФСУ, БЛ, БДНТ; методика наладки этой части системы приведена в § 11-3, 11-8. Ниже рассмотрены только особенности наладки преобразователя ПЧН. Ко второй части относятся блоки БЗГ, БСЗГ, БПИ; методика наладки этих блоков рассмотрена подробно.

В блоке питания БП проверяются значения напряжений на контрольных гнездах; полученные значения должны соответствовать значениям, указанным на табличках. На холостом ходу (при вынутых остальных блоках управления) источники выпрямленного напряжения БП могут иметь завышенные значения (до 30 %). Исключение составляет источник +100 В, для которого собрана балластная нагрузка в самом БЛ. Окончательная проверка напряжения блока питания осуществляется при вставленных блоках управления и работающей схеме. При отсутствии каких-либо напряжений на контрольных гнездах БП проверяются напряжения, подводимые к разъему блока БП согласно инструкции завода-изготовителя. Проверяются напряжения питания на зажимах разъемов всех блоков в щите КУ, которые должны иметь значения согласно инструкции завода-изготовителя.

Наладка блока фазосмещающего устройства БФСУ заключается в фазировке управляющих импульсов и снятии его фазовой характеристики (§ 11-5). Соответствие фаз анодного напряжения (на вентильных обмотках преобразовательного трансформатора) и напряжения синхронизации (напряжение питания БФСУ) обеспечивается включением первичных обмоток трансформатора блока БФСУ в звезду или треугольник в зависимости от сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением питания БФСУ. Постоянство вторичного напряжения при переключении первичных обмоток на ту или иную схему обеспечивается подключением определенных отпаек на первичных обмотках трансформатора БФСУ.

Большое значение для правильности фазировки имеет настройка фильтров блока БФСУ. Настройка этого узла определяет такой важный показатель работы преобразователя, как асимметрия управляющих импульсов. Ячейка фильтров блока БФСУ формирует опорные напряжения синусоидальной формы. Эти напряжения сдвинуты относительно друг друга на 60° и образуют шестифазную систему синусоидальных напряжений. Целью настройки фильтров является достижение необходимой амплитуды и фазы опорных синусоид. Настройка производится с помощью резисторов, воздействующих на амплитуду и фазу синусоиды.

Для формирования управляющих импульсов тиристоров какой-либо фазы преобразователя используется опорная синусоида, сдвинутая на 120° в сторону отставания от синусоиды силового напряжения. На рис. 11-52 приведена векторная диаграмма, показывающая связь между силовым напряжением (A, B, C), напряжениями на входах фильтра ($A_c \ldots -C_c$) и опорных синусоид ($+A_o \ldots -C_o$), при условии синфазности силового напряжения и напряжения собственных нужд.

Из диаграммы видно, что для формирования управляющих импульсов тиристоров фазы A используется опорная синусоида B_o (отстает на 120°), для фазы B — C_o, для фазы A — B_o и т. д. Таким образом, целью настройки фильтров является обеспечение строгого соответствия между фазами опорных напряжений и силового напряжения по диаграмме рис. 11-52, а также обеспечение требуемой амплитуды всех опорных синусоид. Во время

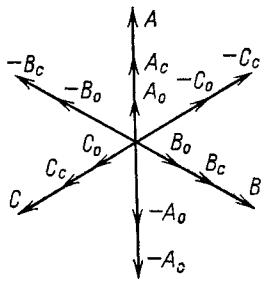


Рис. 11-52. Векторная диаграмма силового и опорных напряжений.

настройки фильтров следует учесть, что фильтры, принадлежащие одной фазе трансформатора $T1$ блока БФСУ, оказывают взаимное влияние друг на друга, т. е. при настройке последующего фильтра фаза предыдущего может сбиваться. Поэтому эту операцию надо проделывать несколько раз с обязательным контролем. Контроль правильности настройки фильтров удобно производить с помощью диодной схемы, которая представляет собой шесть диодов с объединенными катодами. При подключении анодов диодов к контрольным гнездам БФСУ $+A_o \ldots -C_o$ на экране осциллографа, подключенного к катодам диодов и общей точке, можно наблюдать все опорные синусоиды одновременно.

Проверка соответствия управляющих импульсов БФСУ силовым трансформаторам осуществляется по табл. 11-6.

В табл. 11-7 приведены диаграммы сигналов на контрольных гнездах блока БФСУ.

Таблица 11-6

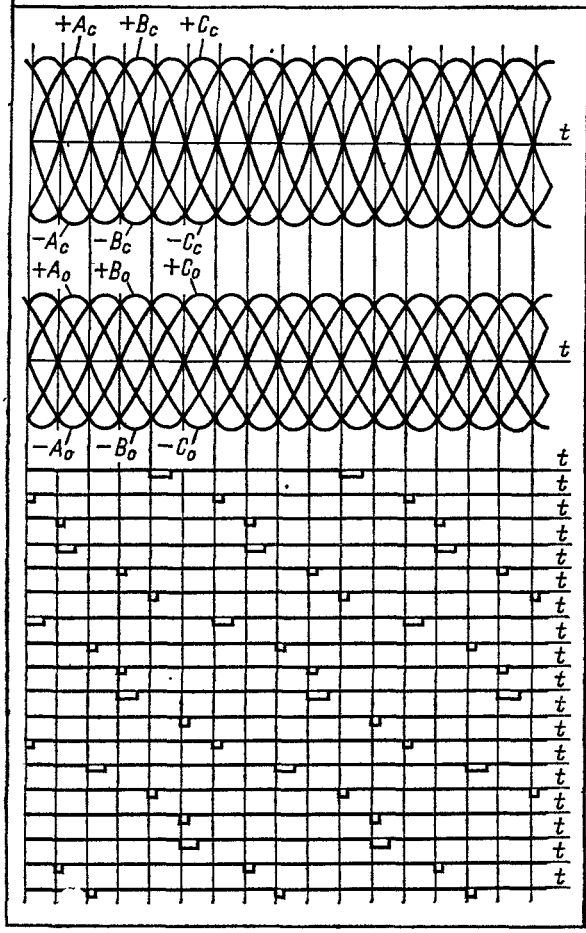
Соответствие управляющих импульсов БФСУ силовым тиристорам

№ тиристора	Анодное напряжение	Опорное напряжение	Управляющие импульсы
1	u_{AC}	$+B_o$	$(\pm B_o)$
2	u_{BC}	$-A_c$	$(\pm A_o)$
3	u_{BA}	$+C_o$	$(\pm C_o)$
4	u_{CA}	$-B_o$	$(\pm B_o)$
5	u_{CB}	$+A_o$	$(\pm A_o)$
6	u_{AB}	$-C_o$	$(\pm C_o)$

Блок датчиков тока БДТ проверяется на функционирование, при этом выполняется проверка правильности подключения транс-

Таблица 11-7

Сигналы на контрольных гнездах БФСУ

Временные диаграммы	Обозначение сигнала	Амплитуда сигнала, В	Длительность сигнала, мс
	$+A_c$ $-A_c$ $+B_c$ $-B_c$ $+C_c$ $-C_c$	55	—
	$+A_o$ $-A_o$ $+B_o$ $-B_o$ $+C_o$ $-C_o$	20	—
	α_{1min}, α_{1T}, β_{1min} $+A_o$	$-12(\alpha_{min})$ $-18(\alpha_T$ и $\beta_{min})$	$0{,}55...4{,}75(\alpha_{min})$ $0{,}2(\alpha_T$ и $\beta_{min})$
	α_{2min}, α_{2T}, β_{2min} $-A_o$		
	α_{1min}, α_{1T}, β_{1min} $+B_o$		
	α_{2min}, α_{2T}, β_{2min} $-B_o$		
	α_{1min}, α_{1T}, β_{1min} $-C_o$		
	α_{2min}, α_{2T}, β_{2min} $-C_o$		

форматоров тока и источников напряжений 50 В, 50 Гц, фазы которых сдвинуты на 90°, и проверка сигналов на контрольных гнездах при отсутствии тока нагрузки с помощью осциллографа согласно инструкции завода-изготовителя.

Наладка блока БДНТ производится на монтажном столе; соединение с зажимами, расположенными в щите комплектного устройства КУ, осуществляется с помощью удлинительных шлангов. При этом проверяются напряжения источников питания, работа высокочастотных генераторов и сигналы на контрольных гнездах, которые должны соответствовать приведенным в инструкции завода-изготовителя. Проверка работы высокочастотных генераторов производится с помощью осциллографа. Для этого осциллограф подключают к контрольным гнездам каждой из шести ячеек ЯГ, и на экране наблюдается синусоидальный сигнал частотой 100—150 кГц, амплитудой 8—12 В (рис. 11-53, *а*). При заданной максимальной частоте выходного напряжения преобразователя (25 Гц) на экране осциллографа, подключенного к контрольным гнездам ячейки ЯГ, наблюдается «срыв» генерации высокочастотных колебаний генератора (рис. 11-53, *б*).

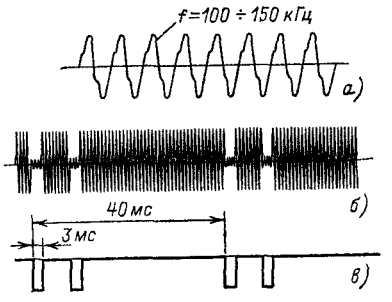
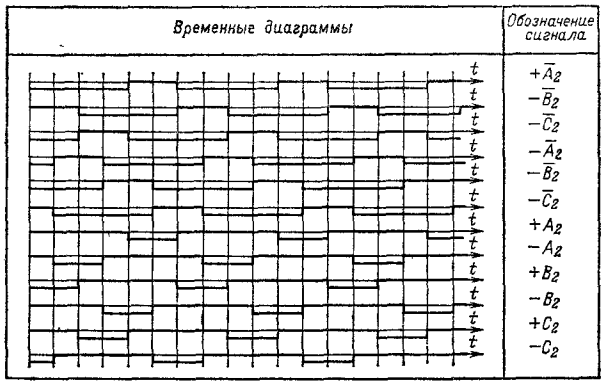


Рис. 11-53. Диаграммы сигналов высокочастотного генератора.

Таблица 11-8

Сигналы на контрольных гнездах БЛ (амплитуда —5÷—7 В)



При регулировании чувствительности датчика на экране осциллографа, подключенного к контрольным гнездам ячейки ЯГ, должен появиться сигнал, приведенный на рис. 11-53, *в*.

Наладка блока БЗГ в основном заключается в проверке на функционирование его отдельных узлов.

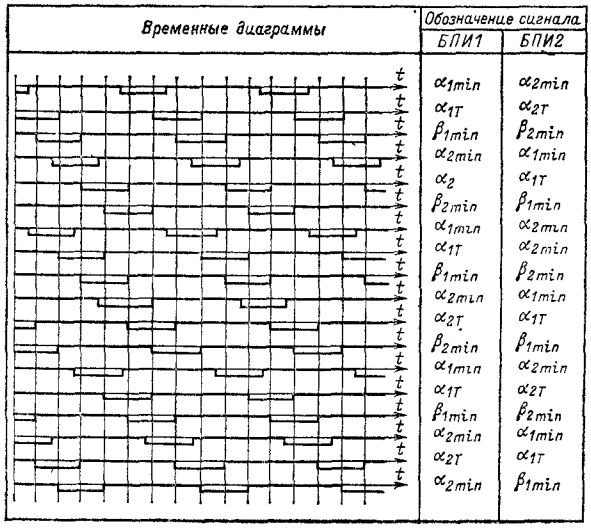
Ячейка ЗГ. При максимальном задании частоты и минимальных значениях заданного темпа разгона и торможения на экране осциллографа, подключенного к выходному контрольному гнезду ячейки, должны наблюдаться импульсы длительностью 300 мкс, амплитудой 12 В. При поданном на вход ячейки от постороннего источника напряжении $u_f=20$ В и регулировании потенциометром подстройки частоты выставляется частота импульсов на выходе ЗГ, равная $6f_{зад}=150$ Гц. При изменении напряжения u_f на входе ЗГ снимается характеристика зависимости частоты ЗГ от входного напряжения. Частота импульсов ЗГ должна быть пропорциональна входному сигналу задания во всем диапазоне его изменения. Проверяются диаграммы сигналов на контрольных гнездах БЗГ при установке командоаппарата в положение «вперед» и «назад» (рис. 11-50).

Узел запаздывания. Настройка узла заключается в выборе времени запаздывания $t_{зап}$, значение которого влияет на форму тока нагрузки. Проверяется наличие сигналов запаздывания на контрольных гнездах, которые должны соответствовать приведенным на рис. 11-50. Устанавливается максимальный диапазон изменения $t_{зап}$ каждого из шести каналов; полученные значения измеряют с помощью осциллографа и устанавливают равными наименьшему из полученных значений. Общим регулирующим органом для всех шести каналов устанавливается предварительного значения $t_{зап}=3{,}3$ мс. Окончательное значение выбирается при работе на рабочую нагрузку с заданной частотой.

Узел реверса. При имитации реверса электропривода проверяется изменение порядка счета пересчетного кольца; при этом длительность импульса команды на реверс устанавливается равной $t_р=150$ мкс.

Таблица 11-9

Сигналы на контрольных гнездах БПИ1, БПИ2 (амплитуда —6÷—7 В, длительность 6,66 мс)



Остальные узлы проверяются только на функционирование в соответствии с инструкцией завода-изготовителя.

Наладка блока БСЗГ заключается в проверке на функционирование формирователя синхронизированных частот. Проверяется наличие импульсов всех синхронизированных частот на контрольных гнездах в соответствии с инструкцией завода-изготовителя. Импульсы частотой 600 Гц формируются из импульсов 300 Гц путем сдвига последних на половину периода и последующего их суммирования, при этом длительность импульсов устанавливается $t_и = 180$ мкс. Блоки БЛ, БПИ1 и БПИ2 проверяются на функционирование путем сравнения сигналов, измеренных с помощью осциллографа на контрольных гнездах, с диаграммами, приведенными в табл. 11-8, 11-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

11-1. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка, А. П. Хечумяна. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976.—560 с.

11-2. **Справочник** по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. — 3-е изд. — М.: Энергоиздат, 1982.—416 с.

11-3. **Справочник** по преобразовательной технике/Под ред. И. М. Чиженко. — Киев: Техника, 1978.—448 с.

11-4. **Шинилло В. П.** Автоматизированный вентильный электропривод. — М.: Энергия, 1969.—400 с.

11-5. **Барский В. А.** Раздельное управление реверсивными тиристорными преобразователями. — М.: Энергия, 1973.—112 с.

11-6. **Писарев А. Л., Деткин Л. П.** Управление тиристорными преобразователями. — М.: Энергия, 1975.—264 с.

11-7. **Сборник** указаний по наладочным работам. Вып. 2. — М.: Энергия, 1973.—240 с.

11-8. **Силовые** полупроводниковые приборы/О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Ю. В. Сахаров (справочник). — М.: Энергия, 1975.—512 с.

11-9. **Жемеров Г. Г.** Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. — М.: Энергия, 1977.—280 с.

11-10. **Калашников Б. Е., Кривицкий С. О., Эшптейн И. И.** Системы управления автономными инверторами. — М.: Энергия, 1974.—105 с.

РАЗДЕЛ ДВЕНАДЦАТЫЙ

БЕСКОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А. ОСНОВЫ НАЛАДКИ

12-1. ОСОБЕННОСТИ НАЛАДКИ БЕСКОНТАКТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Основные понятия. Непрерывный рост степени автоматизации технологических процессов приводит к повышению сложности систем управления с одновременным повышением требований к их надежности, быстродействию, габаритам и другим параметрам. Выполнение этих требований возможно только при широком использовании бесконтактной техники. При этом логические функции реализуются с помощью бесконтактных логических элементов.

Первоначально бесконтактные логические элементы использовались для построения схем, заменяющих традиционные релейные схемы. В качестве элементной базы этого поколения применялись транзисторные схемы, выполняемые с помощью навесного монтажа, в различном конструктивном исполнении.

Наибольшее распространение в промышленном электрооборудовании получили функционально полные системы элементов Логика-Т и Спектр. Дальнейшее усложнение систем управления потребовало миниатюризации, удешевления и повышения уровня надежности самих элементов. Этим требованиям удовлетворяют твердотельные интегральные микросхемы (ИМС), выпускаемые в настоящее время в нескольких десятках различных по технологии изготовления и электрическим параметрам серий.

На базе бесконтактных элементов разрабатываются бесконтактные системы управления (БСУ) различного объема и сложности.

Многие традиционные методы наладки релейно-контакторных систем управления оказываются непригодными в случае применения БСУ. При этом возникает необходимость в специфических методах, определяемых особенностями используемых бесконтактных логических элементов.

Так, например, оказывается непригодным основной прием наладки контактных систем — прозвонка, что обусловлено отсутствием полностью замкнутых и разомкнутых цепей. Действительно, все цепи образуются включенными или отключенными транзисторами, присутствующими либо в виде навесных компонентов, либо внутри кристалла ИМС. Сопротивления открытых и запертых транзисторов имеют конечные значения, и по их значению невозможно достоверно судить о состоянии и правильности монтажа схемы. Кроме того, цепи бесконтактных элементов чувствительны к значению и полярности напряжений, применяемых в процессе прозвонки. Превышение некоторого значения этого напряжения, различного для разной элементной базы, может привести к выходу из строя элементов. К такому же результату может привести и приложение к элементам напряжения неправильной полярности, даже если по значению это напряжение весьма мало.

С другой стороны, наличие в схемах толь-

ко логических сигналов позволяет существенно формализовать наладочные операции.

Внедрение бесконтактных логических элементов привело к необходимости новых конструктивных решений при построении БСУ и прежде всего к широкому внедрению модульного принципа построения. При этом каждый модуль представляет собой конструктивно и функционально законченное изделие.

Таким образом, в процессе наладки БСУ возникает необходимость проверки отдельных модулей с логическими элементами (ячеек, субблоков, блоков).

При проверке отдельных модулей и БСУ в целом используется общий подход к ряду вопросов. Поэтому целесообразно ввести ряд основных понятий.

Неисправность — физический дефект одного или нескольких компонентов, вызывающих неправильную работу схемы.

К неисправностям логического типа относятся неисправности, характеризуемые постоянным наличием ложных логических сигналов хотя бы на одном выходе, не соответствующих заданному набору входных логических сигналов.

Другим видом неисправности является потеря функциональной устойчивости. Этот вид неисправности может вызываться несоответствием выходных параметров логических элементов паспортным данным (например, уровней логических сигналов, времен задержек распространения сигналов и т. д.).

Операция проверки — операция, состоящая из подачи на входы схемы набора логических сигналов (входного набора) и контроля набора логических сигналов на выходах схемы (выходного набора).

Контрольный тест — совокупность операций проверки, достаточных для выявления всех неисправностей логического типа.

Длина теста — число операций проверки.

Комбинационный тест — контрольный тест, в котором последовательность операций проверки может быть произвольной.

Последовательный тест — контрольный тест, последовательность операций в котором строго задана и не может быть изменена.

12-2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПРОВЕРОК И ИСПЫТАНИЙ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Основным видом проверки для бесконтактных систем управления вне зависимости от элементной базы, на которой они выполнены, является проверка системы на функционирование. При проверке на функционирование достаточно простой системы, состоящей из небольшого числа элементов; анализ правильности ее работы возможен с помощью контрольных тестов. Системы средней и большой сложности проверить в целом на функционирование указанным способом практически невозможно, так как длина контрольного теста для таких систем оказывается слишком большой. Поэтому проверку сложных бесконтактных систем управления на функционирование следует производить поэтапно. На первом этапе должны быть проверены элементарные составные части (модули) системы. Для бесконтактных систем управления (БСУ), выполненных на логических элементах серии Логика-Т, такой частью является блок с проводным монтажом между элементами, а для БСУ, выполненных на устройствах серии Спектр, субблок.

Для проверки на функционирование элементарных частей БСУ различных исполнений, как правило, существуют специальные устройства, работающие в автоматическом, полуавтоматическом или ручном режиме. Автоматические устройства обычно используются на заводах-изготовителях, а полуавтоматические или работающие в ручном режиме поставляются комплектно со сложными БСУ или при поставке большого количества БСУ на один объект. Такие устройства могут использоваться при пусконаладочных работах. Подробнее некоторые из таких устройств будут описаны ниже. Создание устройств, специально предназначенных для пусконаладочных организаций, нецелесообразно из-за большого разнообразия элементной базы БСУ.

На втором этапе проверяется функционирование более сложных узлов БСУ, например комплектных устройств. Для их проверки необходима подача некоторого набора сигналов с целью имитации реального режима работы БСУ. Для этой цели могут применяться специализированные имитаторы сигналов, предназначенные для данной элементной базы. Иногда такие имитаторы входят в состав БСУ и служат не только для проведения пусконаладочных работ, но и для профилактического контроля БСУ в процессе эксплуатации. В последнее время для очень сложных систем бесконтактного управления, построенных с применением больших интегральных микросхем (БИС) и представляющих собой специализированные управляющие логические или вычислительные устройства, оказалось целесообразным включение в состав системы специального устройства или нескольких устройств, проверяющих и индицирующих правильное функционирование частей системы или даже отдельных элементарных модулей. Для программируемых систем, в которых алгоритм управления содержится в памяти устройства, предусматриваются специальные тестовые программы проверки правильности функционирования всей системы и отдельных ее узлов.

На каждом из перечисленных этапов при неправильном функционировании элемента или узла прежде всего следует заменить неисправный модуль на исправный. Затем в неисправном модуле следует выявить конкретный элемент: транзистор, диод, микросхему и т. п., подлежащий замене. Выявление дефектных микросхем облегчается при применении специальных устройств. Так как цифровые микросхемы применяются не только в специальных БСУ, но и в составе многих устройств управления, то для пусконаладочных работ разработан специализированный комплект приспособлений для поиска неисправных микросхем КН-ДИ. Основные технические данные устройств, входящих в этот комплект, приведены в разд. 3.

Рассмотренные выше неисправности БСУ относятся к неисправностям логического типа. Большинство дефектов связано с ошибками внутриблочного монтажа для логических эле-

ментов серий Логика-Т и Спектр, а для систем, выполненных на микросхемной элементной базе, — с некачественными печатным монтажом и пайкой ИМС на печатных платах. В системах, построенных на элементах серий Логика-Т и Спектр, большая часть соединений выполняется проводным монтажом, трудно поддающимся заводскому контролю, а для систем, выполненных на ИМС, основная масса соединений — печатные проводники, где наиболее вероятны случайные перемычки между соседними проводниками, образованные припоем (неисправность типа «перемыкание»), и отсутствие электрической цепи между элементами схемы (неисправность типа «обрыв»).

Однако возможны также неисправности БСУ, связанные со временем прохождения сигналов по тем или иным путям. К числу таких неисправностей, например, относится запаздывание, задержка одного или нескольких сигналов, приводящая к появлению хотя бы кратковременных ложных выходных сигналов. Такого рода неисправности вызываются наличием времени задержки изменения выходных сигналов элементов после изменения сигналов на их входах. Эти времена задержки называют временем распространения сигнала в элементе. Время распространения сигнала обязательно учитывается при проектировании БСУ, но это не исключает возможности потери функциональной устойчивости БСУ, связанной с отклонениями параметров логических элементов от номинальных значений. Если логические сигналы проходят от входа к выходу несколькими независимыми путями и время прохождения этими сигналами по разным путям оказывается примерно одинаковым, то на входах выходного элемента (элементов) могут появляться непредсказуемые, неопределенные комбинации сигналов. Это приведет к ложным выходным сигналам. Неопределенность возникает вследствие изменения во времени (или из-за колебаний температуры среды) распространения сигналов в элементах, а следовательно, и в цепи последовательно включенных элементов. Такой ненормальный режим работы логических схем называют состязанием сигналов или гонками. Возможны и другие причины потери функциональной устойчивости БСУ. Отыскание таких неисправностей представляет значительные трудности, требует применения специальной аппаратуры и трудоемких работ с помощью осциллографа и других приборов. Принцип отыскания неисправностей подобного рода состоит в анализе прохождения сигналов от входа к выходу, так же как и при отыскании неисправностей логического рода, но с обязательным исследованием всех сигналов как по уровню, так и по временным характеристикам.

Не меньшие сложности вызывает отыскание неисправностей БСУ, связанных с наличием сигналов помех. Как правило, проекты содержат комплекс основных мероприятий и средств, предотвращающих влияние внешних помех. Эти мероприятия и средства направлены в основном на снижение вероятности проникновения помех по входным и выходным цепям, а также по цепям питания БСУ. Ниже на примере БСУ, построенных на элементах УБСР-ДИ, дается достаточно подробное изложение методов повышения помехоустойчивости. Эти методы применимы практически для любой элементной базы БСУ.

В общем случае при наладке БСУ должны быть выполнены следующие виды проверок и испытаний:

внешний осмотр и проверка комплектности изделия;

проверка монтажа БСУ. Как правило, этот вид проверки не требуется на месте монтажа;

измерение сопротивления изоляции и испытание электрической прочности изоляции в соответствии с ПУЭ;

проверка системы питания, включая настройку защит и источников стабилизированного питания;

проверка модулей (ячеек, субблоков, блоков) на функционирование;

проверка внешних цепей;

проверка на функционирование комплектных устройств и БСУ в целом.

Б. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОВЕРКА БСУ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЛОГИКА-Т

12-3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОГИКА-Т

Элементы Логика-Т представляют собой схемы, выполненные из дискретных компонентов на платах с печатным монтажом, помещенные в пластмассовый корпус и залитые компаундом. Таким образом, элементы являются неремонтоспособными модулями. В БСУ элементы комплектуются в блоки, которые устанавливаются в шкафах, реже в щитах станций управления или другом комплектном электрооборудовании.

Способ представления информации: потенциальный (отрицательный потенциал), потенциально-импульсный (положительный импульс).

Функциональный состав

Набор логических элементов И, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, триггеры	7 типов
Функциональные элементы	3 типа
Элементы времени	4 типа
Усилители	5 типов

Основным (базовым) элементом серии является инвертор, построенный с помощью транзисторного усилительного каскада, работающего в ключевом режиме.

Основные электрические параметры элементов Логика-Т

Напряжение логического сигнала «1» (при входном сопротивлении 1,3 кОм) . . .	4 В отрицательной полярности

Продолжение

Напряжение логического сигнала «0» (при входном сопротивлении 1,3 кОм) . . .	1 В отрицательной полярности
Напряжение питания логических и функциональных элементов	—12 В
Напряжение питания усилителей	—24 В
Напряжение смещения . . .	+6 В
Допустимые колебания напряжений питания и смещений .	+10%, —15%
Температура окружающей среды	—40÷ +50 °С

Типы, назначение и особенности применения элементов Логика-Т приведены в [12-1].

12-4. ПРОВЕРКА БЕСКОНТАКТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, ПОСТРОЕННЫХ НА ЭЛЕМЕНТАХ ЛОГИКА-Т

На рис. 12-1 даны основные этапы наладочных работ. Независимо от того, проходили ли блоки проверку на заводе-изготовителе, желательно все блоки проверить на функционирование. Тем самым косвенно производится проверка элементов, входящих в состав блоков. Если в результате обнаружена неисправность, то ее надо локализовать и выявить неисправный элемент или ошибочный межэлементный монтаж. Неисправные элементы заменяются, а неверный монтаж исправляется. Проверка блоков питания БСУ производится традиционными методами наладки аналоговых узлов со снятием характеристик, настройкой и регулировкой параметров и т. п.

В общем случае при наладке БСУ проверка производится в следующем порядке: внешний осмотр, измерение сопротивления изоляции, испытания электрической прочности изоляции, проверка системы питания, проверка на функционирование.

При благоприятных результатах испытаний переходят к проверке БСУ в реальном режиме. На этом этапе осуществляется контроль помехоустойчивости от внешних помех по линиям связи и при необходимости производится отстройка от этих помех.

Внешний осмотр блоков производится для выявления видимых повреждений, несоответствия документации, плохого состояния контактов разъема и паек.

Проверка сопротивления изоляции производится по ГОСТ 2933-74. Измерения производятся относительно металлического корпуса для следующих точек схемы: общая точка цепей питания элементов; потенциально развязанные входы и выходы согласующих элементов, трансформаторов, реле и других аппаратов. Измерения производятся мегаомметром с измерительным напряжением, соответствующим рабочим напряжениям цепей.

Снижение сопротивления изоляции ниже указанной нормы в большинстве случаев связано с нарушениями внутри логического элемента изоляции между крепежными деталями и электрическими цепями. Такие элементы должны быть заменены.

Блоки питания БСУ проверяются при подключении их к достаточно мощной сети 380/220 В через какой-либо защитный аппарат. Устанавливаются номинальные значения выходных напряжений. Снимаются характеристики зависимости выходных напряжений от токов нагрузки. Значения вторичных напряжений блоков питания контролируются в последующем при реальной нагрузке блоков в процессе проверки БСУ на функционирование Проверка функционирования блоков питания производится по таблице проверки, имеющейся в документации. Изоляция блоков питания

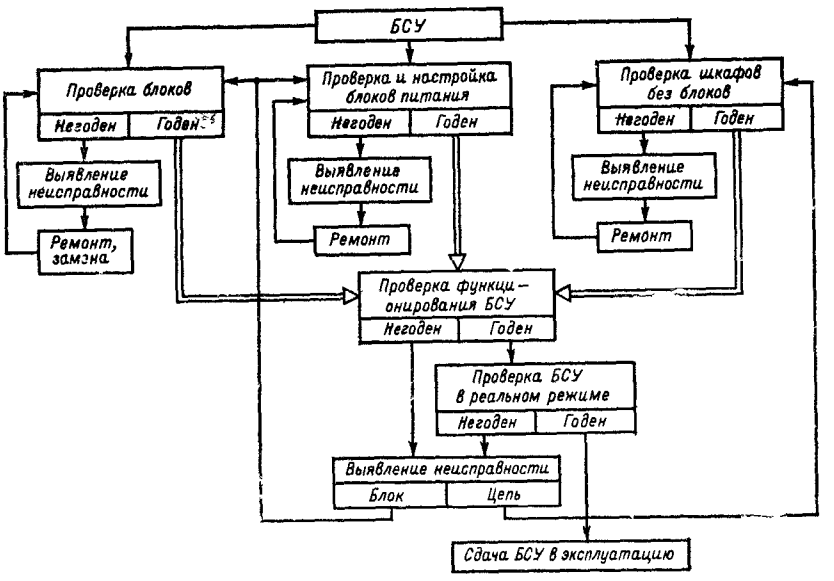


Рис 12-1. Основные этапы наладочных работ.

проверяется так же, как у логических блоков.

После проверки на функционирование шкафа (шкафов) БСУ проверяются сигналы и работоспособность технологических датчиков и источников сигналов внешних блокировок.

Работоспособность упомянутых устройств позволяет перейти к комплексной настройке БСУ, в процессе которой производят управление БСУ от проектных аппаратов управления. При этом контролируют правильность работы объекта управления и узла индикации БСУ. Во время этой проверки может возникнуть необходимость в регулировании выдержек времени, уровней срабатывания элементов, преобразующих входные сигналы в дискретные, и т. п.

Одной из важнейших задач в процессе проверки БСУ на функционирование, как указывалось, является выявление помех и отстройка от их влияния.

12-5. АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ С ЭЛЕМЕНТАМИ ЛОГИКА-Т

Для проверки на функционирование логических узлов (ЛУ), под которыми понимают любое устройство от логического элемента до всей БСУ, предназначенное для обработки логических сигналов, может быть использован специальный блок контроля БК (паспорт 6КМ.367.180-99). Блок БК выпускается Калининским заводом электроаппаратуры. С помощью этого блока можно осуществить как контроль исправности по таблицам контроля, так и поиск неисправности без таблиц. В последнем случае требуются более высокая квалификация наладочного персонала и опыт в выполнении таких работ.

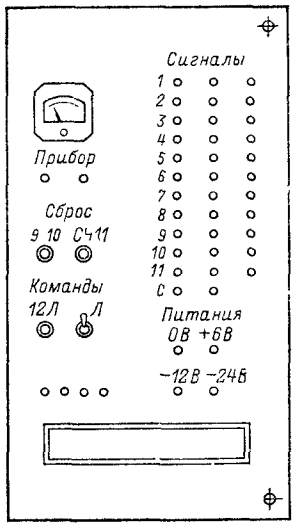


Рис. 12-2. Лицевая панель блока контроля типа БК.

9, 10; СЧ11, *12Л* — кнопки; *Л* — тумблер.

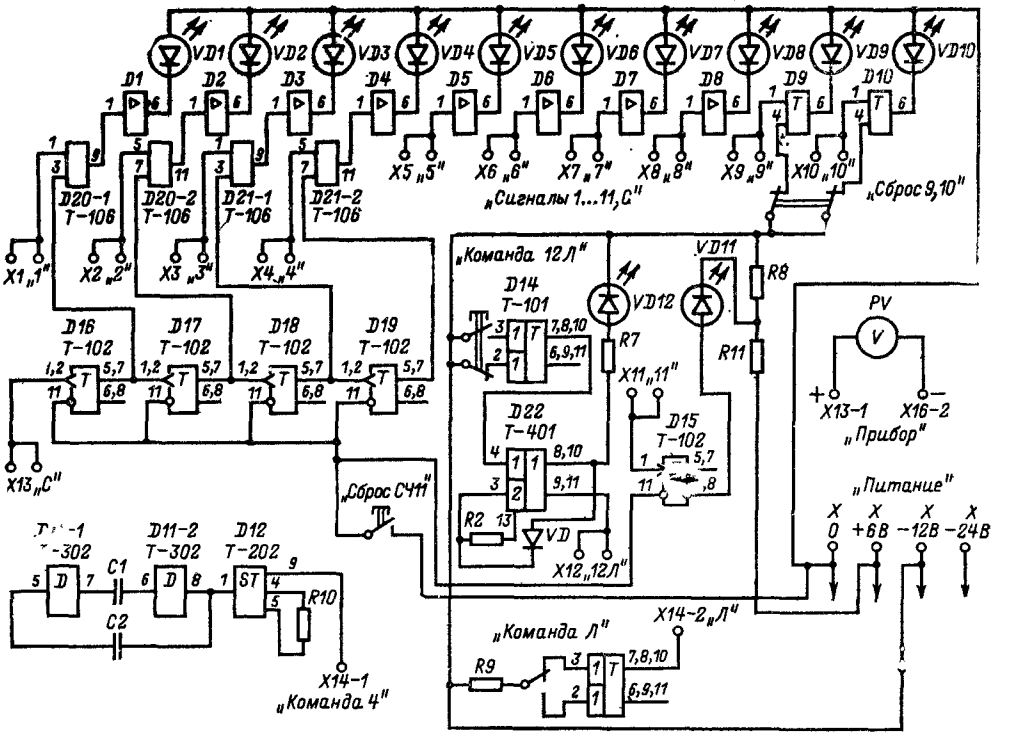


Рис. 12-3. Принципиальная схема блока контроля.

D1—D22 — элементы серии Логика-Т; *VD1—VD12* — светодиоды; *X1—X14* — контрольные гнезда; *PV* — вольтметр.

Блок БК обеспечивает:

а) одновременный визуальный контроль сигналов в 11 точках схемы (8 потенциальных сигналов и 3 импульсных длительностью более 10 мкс с уровнями «1» от минус 4 до минус 12 В);

б) измерение сигнала постоянного тока от 0 до 30 В;

в) визуальный контроль наличия сигнала с частотой до 200 Гц;

г) счет числа импульсов до 15;

д) подачу потенциального сигнала на 7 параллельных нагрузок (уровень «1» от —4 до —12 В);

е) подачу потенциального сигнала на 3 параллельные нагрузки (уровень «1» от —4 до —12 В);

ж) подачу сигнала на 3 параллельные нагрузки с частотой около 2000 Гц (уровень «1» от —4 до —12 В).

В комплект поставки блока входит набор соединительных проводов. Блок размещен в шасси Ш2-21 единой унифицированной блочной конструкции. Все органы управления и коммутации расположены на лицевой панели блока (рис. 12-2). Принципиальная схема БК приведена на рис. 12-3. Контрольные гнезда БК имеют параллельные гнезда для подключения измерительных приборов. В схеме блока применены элементы Логика-Т и специальные транзисторные усилители, параметры которых рассчитаны на включение при уровне сигналов более —4 В. При уровнях сигналов менее 3 В усилители не включаются, что позволяет осуществить также контроль на функциональную устойчивость ЛУ.

Кроме того, при наладке БСУ могут использоваться логический пробник и испытатель логических схем.

Для защиты от помех, проникающих по цепям связей, применяют: цепи с парной скруткой проводов и заземлением одного из этих двух проводов только с одной стороны, экранировку цепей или оба эти мероприятия одновременно. Хорошие результаты дает выделение цепей связи в жгуты, расположенные отдельно от межблочных связей шкафа, а также изменение трассы внешних кабелей связи. Для отстройки от помех входные согласующие элементы должны иметь достаточно большую постоянную времени, обеспечивающую фильтрацию сигналов помех с длительностью менее 20—50 мс. Об устранении помех, проникающих по цепям питания, сказано ниже при описании устройств УБСР-ДИ.

В. МЕТОДИКА НАЛАДКИ УСТРОЙСТВ УБСР-ДИ

12-6. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМС СЕРИИ К 155

Элементной базой многих современных БСУ являются интегральные микросхемы серии К 155. Далее подробно описаны особенности наладки БСУ, построенных на базе устройств УБСР-ДИ, также использующих эти элементы. Номенклатура ИМС серии К 155 достаточно велика. В составе серии имеется функционально полный набор логических элементов, а также набор сложных логических схем (счетчики, сумматоры и т. п.). При этом различают ИМС малой, средней и большой степени интеграции.

Серия К 155 выпускается в пластмассовом корпусе и предназначена для работы в диапазоне температур от —10 до +70 °С. Выпускается также серия КМ 155 в керамическом корпусе для работы в диапазоне температур от —45 до+85 °С. Кроме различия в допустимых температурных диапазонах одноименные, элементы этих серий аналогичны по всем параметрам, что безусловно допускает замену элементов серии К 155 на элементы серии КМ 155.

К моменту подготовки настоящего справочника отечественной промышленностью выпускаются ИМС серии К 155, приведенные в табл. 12-1.

Ниже приводятся некоторые рекомендации по применению ИМС серии К 155.

Имеются некоторые общие особенности применения ИМС серии К 155.

1. Не использованные в схеме входы микросхем необходимо подключать в соответствии с их функциональным назначением и логикой работы схемы к источникам сигналов «0» или «1» Неиспользованные входы ИМС допускается в первом случае подключать к шине 0 В (разрешается подключение одного входа через резистор с сопротивлением не более 470 Ом), а во втором случае — к шине питания +5 В через резистор 1 кОм (до 20 входов). Не допускается подключение неиспользованных входов непосредственно к шине +5 В.

2. Допускается не подключать свободный вход ИМС к источникам нулевого или единичного сигнала, если это не влияет на логику работы схемы и не отражается на помехоустойчивости БСУ.

3. Взаимное влияние микросхем в пределах печатных плат по цепи питания может быть устранено установкой *С*-фильтров, располагаемых в непосредственной близости от каждой или нескольких рядом размещенных микросхем. В качестве конденсаторов для фильтра могут использоваться только малоиндуктивные конденсаторы, например типов КЛС, КМ5 и КМ6. Емкости этих фильтров: для ИМС малой степени интеграции не менее 22 нФ на пять рядом расположенных ИМС, для ИМС средней степени интеграции не менее 22 нФ на каждую ИМС.

4. Замыкания выходов ИМС на шины 0 В или +5 В за счет «мостиков» припоя, как правило, не приводят к выходу их из строя. После удаления «мостика» и повторной проверки ИМС на функционирование в схеме такая микросхема может быть оставлена в работе.

5. Все устройства для контроля и проверки работы ИМС в схемах должны иметь входное сопротивление не менее 20 кОм, чтобы не нарушать работу исследуемой схемы дополнительной нагрузкой.

6. При использовании электронных осциллографов для наблюдения сигналов в схемах ИМС необходимо использовать входящие в комплект осциллографов измерительные провода с выносными делителями и коаксиальным

Таблица 12-1

Интегральные микросхемы серии К 155

Функциональное назначение схемы	Обозначение микросхемы	Номер эскиза с условным изображением и назначением выводов
Два логических элемента 4И-НЕ	К 155 ЛА 1	1
Один логический элемент 8И-НЕ	К 155 ЛА 2	2
Четыре логических элемента 2И-НЕ	К 155 ЛА 3	3
Три логических элемента 3И-НЕ	К 155 ЛА 4	4
Два логических элемента 4И-НЕ с повышенным коэффициентом разветвления по выходу	К 155 ЛА 6	5
Два логических элемента 4И-НЕ с открытым коллектором и повышенной нагрузочной способностью	К 155 ЛА 7	6
Четыре логических элемента 2И-НЕ с открытым коллектором	К 155 ЛА 8	7
Три логических элемента 3И-НЕ с открытым коллектором	К 155 ЛА 10	8
Четыре логических элемента 2И-НЕ с открытым коллектором и повышенным коллекторным напряжением выходного каскада (15 В, 50 мкА)	К 155 ЛА 11	9
Четыре буферных логических элемента 2И-НЕ	К 155 ЛА 12	10
Четыре буферных логических элемента 2И-НЕ с открытым коллектором	К 155 ЛА 13	11
Шесть логических элементов НЕ	К 155 ЛН 1	12
Шесть буферных инвертеров с открытым коллектором и повышенным напряжением выхода (30 В, 40 мА)	К 155 ЛН 3	13
Шесть буферных усилителей (повторителей) с открытым коллектором и повышенным напряжением выхода (30 В, 40 мА)	К 155 ЛН 4	14

Продолжение табл. 12-1

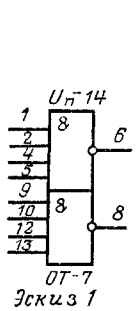
Функциональное назначение схемы	Обозначение микросхемы	Номер эскиза с условным изображением и назначением выводов
Шесть буферных инверторов с открытым коллектором и повышенным напряжением выхода (15 В, 40 мА)	К 155 ЛН 5	15
Четыре логических элемента 2ИЛИ-НЕ	К 155 ЛЕ 1	16
Два логических элемента 4ИЛИ-НЕ со стробированием и возможностью расширения по ИЛИ	К 155 ЛЕ 2	17
Два логических элемента 4ИЛИ-НЕ со стробированием	К 155 ЛЕ 3	18
Четыре буферных логических элемента 2ИЛИ-НЕ	К 155 ЛЕ 5	19
Четыре логических элемента 2ИЛИ-НЕ с открытым коллектором	К 155 ЛЕ 6	20
Четыре логических элемента 2И	К 155 ЛИ 1	21
Два логических элемента 2И с мощным открытым коллекторным выходом	К 155 ЛИ 5	22
Два логических элемента 4И	К 155 ЛИ 6	23
Четыре логических элемента 2ИЛИ	К 155 ЛЛ 1	24
Два логических элемента 2И-2ИЛИ-НЕ, один расширяемый по ИЛИ	К 155 ЛР 1	25
Логический элемент 2, 2, 2, 3И-4ИЛИ-НЕ, расширяемый по ИЛИ	К 155 ЛР 3	26
Логический элемент 4, 4И-2ИЛИ-НЕ, расширяемый по ИЛИ	К 155 ЛР 4	27
Два расширителя 4И-ИЛИ	К 155 ЛД 1	28
Расширитель 8И-ИЛИ	К 155 ЛД 3	29
Четыре двухвходных элемента «исключающее ИЛИ»	К 155 ЛП 5	30
Два логических элемента 2И-НЕ с одним объединенным входом и с мощным выходом	К 155 ЛП 7	31
Формирователь разрядной записи, усилитель воспроизведения и схема установки нуля	К 155 АП 1	32

Продолжение табл. 12-1

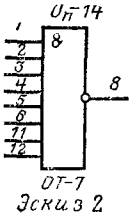
Функциональное назначение микросхемы	Обозначение микросхемы	Номер эскиза с условным изображением и назначением выводов
Многофункциональный логический элемент для ЭВМ	К 155 ХЛ 1	33
Два триггера Шмитта с логическим элементом на входе	К 155 ТЛ 1	34
Одновибратор с логическим элементом на входе	К 155 АГ 1	35
Два одновибратора с логическими элементами на входе	К 155 АГ 3	36
JK-триггер с логическими элементами ЗИ на входах J и K	К 155 ТВ 1	37
Два *D*-триггера	К 155 ТМ 2	38
Четыре *D*-триггера	К 155 ТМ 5	39
Четыре *D*-триггера с прямыми и инверсными выходами	К 155 ТМ 7	40
Четыре *D*-триггера	К 155 ТМ 8	41
Декадный счетчик с фазово-импульсным представлением информации	К 155 ИЕ 1	42
4-разрядный двоично-десятичный асинхронный счетчик	К 155 ИЕ 2	43
4-разрядный асинхронный счетчик-делитель на 12	К 155 ИЕ 4	44
4-разрядный асинхронный двоичный счетчик	К 155 ИЕ 5	45
4-разрядный двоично-десятичный реверсивный счетчик	К 155 ИЕ 6	46
4-разрядный двоичный реверсивный счетчик	К 155 ИЕ 7	47
Управляемый кодом делитель частоты	К 155 ИЕ 8	48
4-разрядный синхронный десятичный счетчик	К 155 ИЕ 9	49
Дешифратор кода 8-4-2-1 в десятичный позиционный код для управления газоразрядными индикаторами	К 155 ИД 1	50
Дешифратор-демультиплексор 4 на 16	К 155 ИД 3	51
Два дешифратора-демультиплексора 2 на 4	К 155 ИД 4	52
Дешифратор кода 8-4-2-1 в позиционный код мозаичного светодиодного цифрового индикатора	К 155 ИД 9	53

Продолжение табл. 12-1

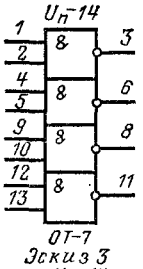
Функциональное назначение микросхемы	Обозначение микросхемы	Номер эскиза с условным изображением и назначением выводов
Однозарядный полный сумматор	К 155 ИМ 1	54
2-разрядный полный сумматор	К 155 ИМ 2	55
4-разрядный полный сумматор	К 155 ИМ 3	56
8-разрядная схема контроля четности и нечетности	К 155 ИП 2	57
Арифметико-логическое устройство (АЛУ)	К 155 ИП 3	58
Схема ускоренного переноса для АЛУ	К 155 ИП 4	59
Селектор-мультиплексор 16 на 1 со стробированием	К 155 КП 1	60
Два селектора-мультиплексора 4 на 1	К 155 КП 2	61
Селектор-мультиплексор 8 на 1	К 155 КП 5	62
Селектор-мультиплексор 8 на 1 со стробированием	К 155 КП 7	63
4-разрядный универсальный регистр	К 155 ИР 1	64
8-разрядный реверсивный регистр сдвига	К 155 ИР 13	65
4-разрядный регистр с тремя состояниями на выходе	К 155 ИР 15	66
ОЗУ 16×1 бит со схемами управления	К 155 РУ 1	67
ОЗУ 16×4 бита со схемами управления	К 155 РУ 2	68
ОЗУ 16×1 бит с вентильным входом усилителя записи	К 155 РУ 3	69
16-разрядное регистровое ЗУ	К 155 РП 1	70
ПЗУ 32×8 битов со схемами управления	К 155 РЕ 3	71
ПЗУ на 1024 бита для преобразования двоичного кода в код русского, латинского алфавита, код арифметических и дополнительных знаков	К 155 РЕ 21; К 155 РЕ 22; К 155 РЕ 23; К 155 РЕ 24	—
Преобразователь двоично-десятичного кода в двоичный	К 155 ПР 6	72
Преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный	К 155 ПР 7	73



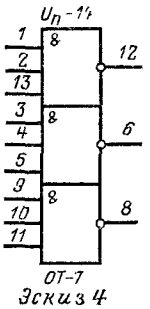
Эскиз 1



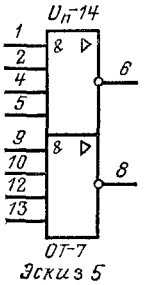
Эскиз 2



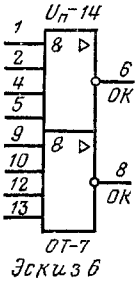
Эскиз 3



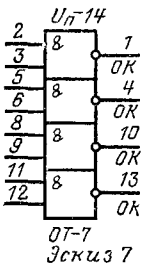
Эскиз 4



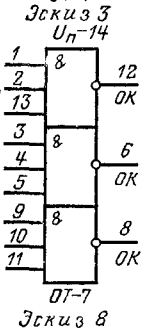
Эскиз 5



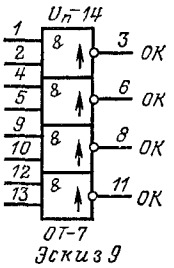
Эскиз 6



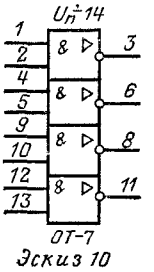
Эскиз 7



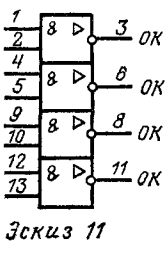
Эскиз 8

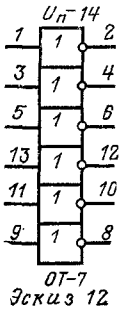


Эскиз 9

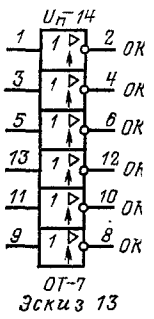


Эскиз 10

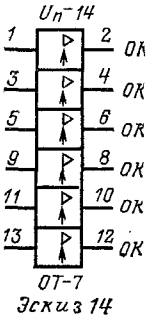

Эскиз 11



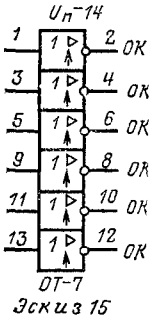
Эскиз 12



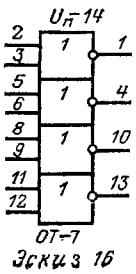
Эскиз 13



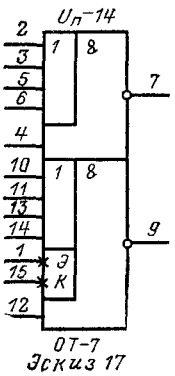
Эскиз 14



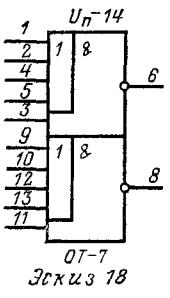
Эскиз 15



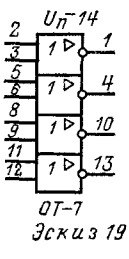
Эскиз 16



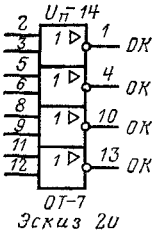
Эскиз 17



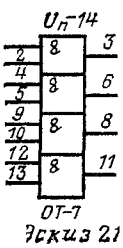
Эскиз 18



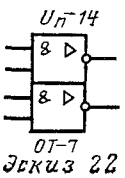
Эскиз 19



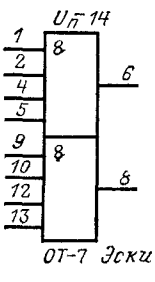
Эскиз 20



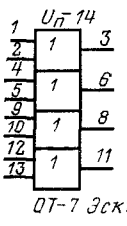
Эскиз 21



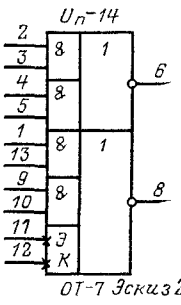
Эскиз 22



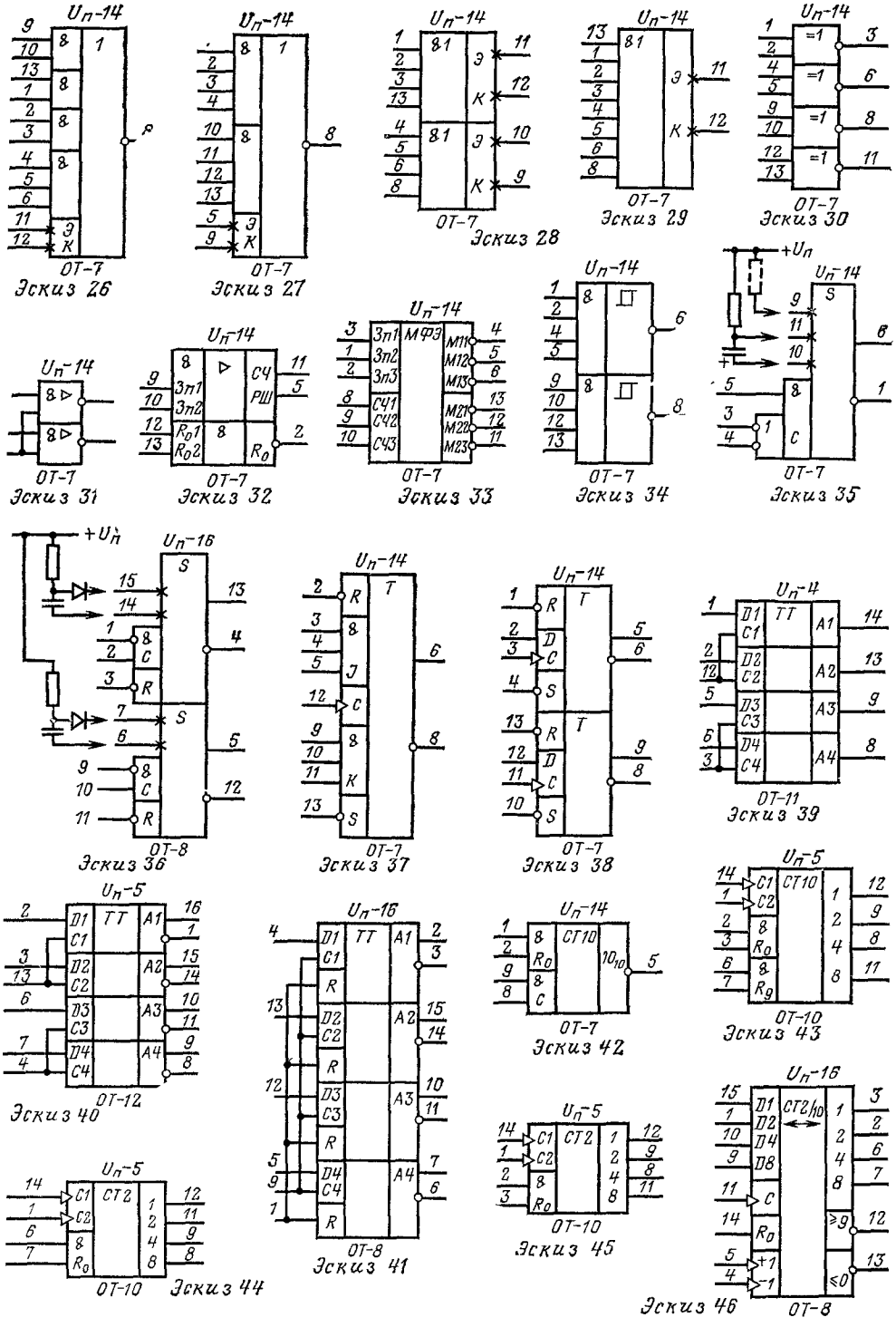
Эскиз 23

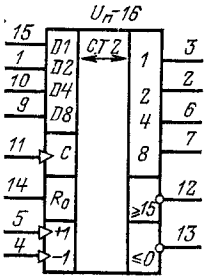


Эскиз 24

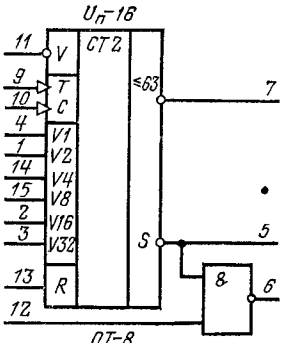


Эскиз 25

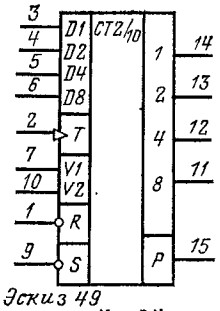

Эскиз 26
Эскиз 27
Эскиз 28
Эскиз 29
Эскиз 30
Эскиз 31
Эскиз 32
Эскиз 33
Эскиз 34
Эскиз 35
Эскиз 36
Эскиз 37
Эскиз 38
Эскиз 39
Эскиз 40
Эскиз 41
Эскиз 42
Эскиз 43
Эскиз 44
Эскиз 45
Эскиз 46



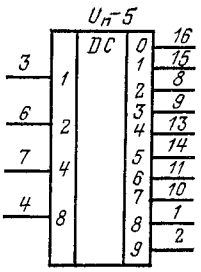
Эскиз 47



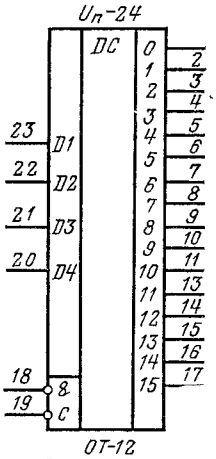
Эскиз 48



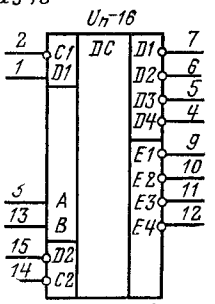
Эскиз 49



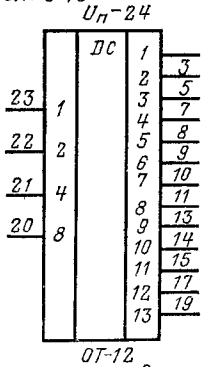
Эскиз 50



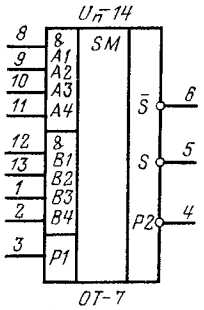
Эскиз 51



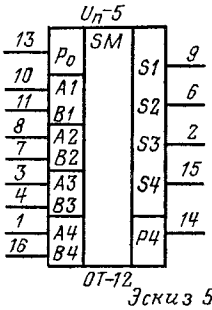
Эскиз 52



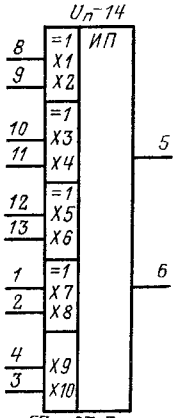
Эскиз 53



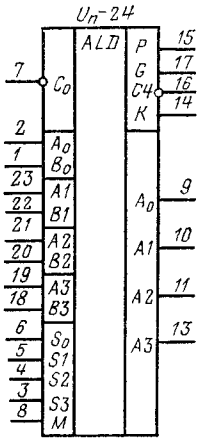
Эскиз 54



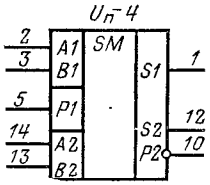
Эскиз 56



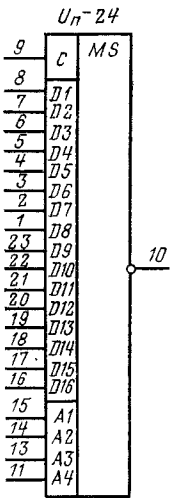
Эскиз 57



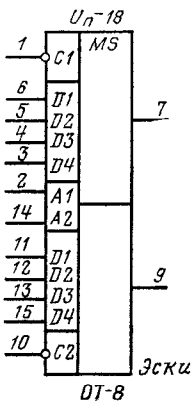
Эскиз 58



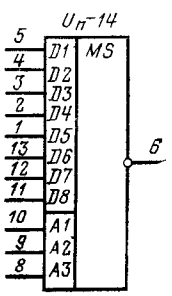
Эскиз 55



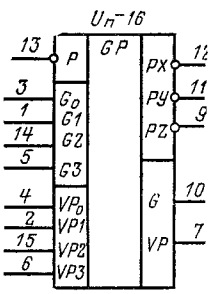
Эскиз 60



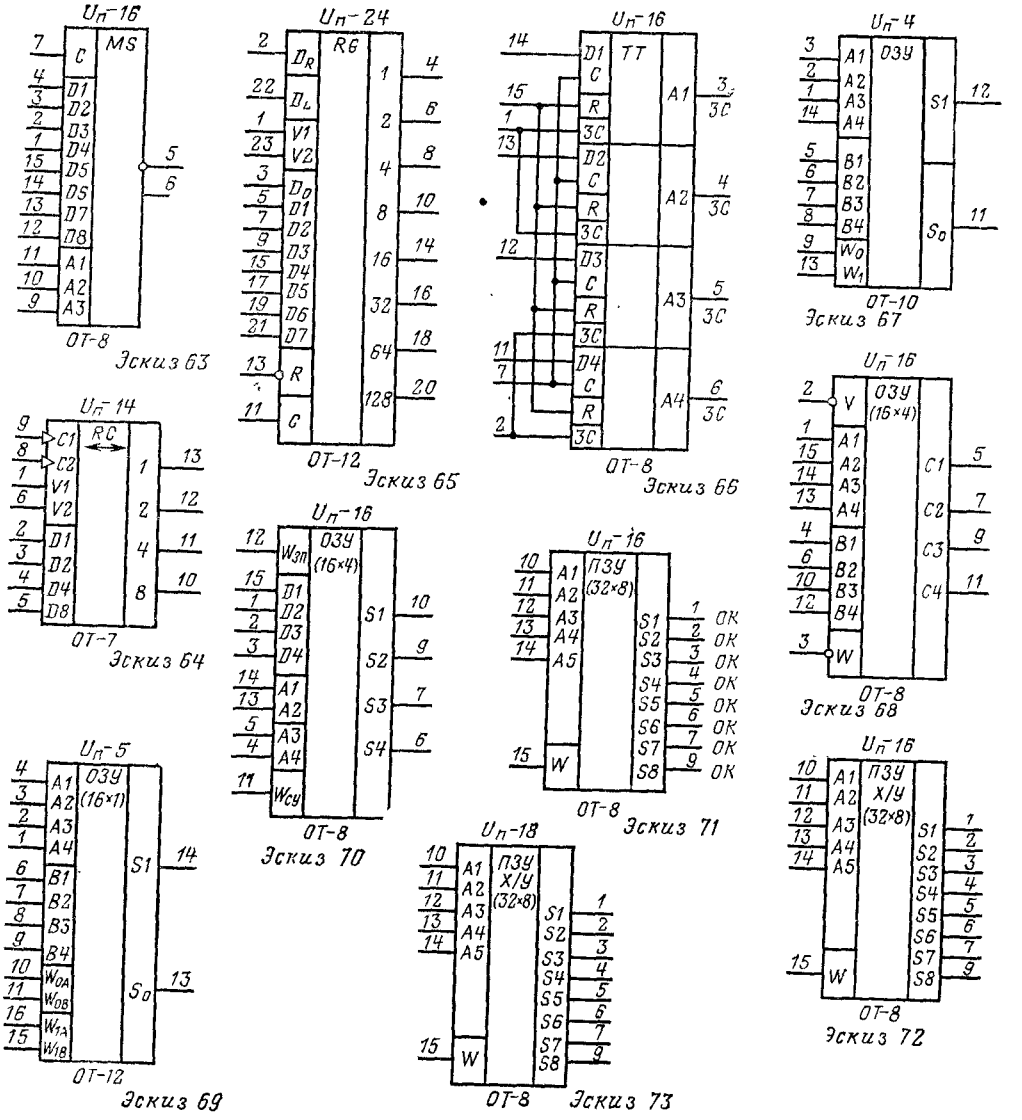
Эскиз 61



Эскиз 62



Эскиз 59



Примечание. ОК — выход с открытым коллектором; ЗС — выход с тремя состояниями; ▷ — повышенная нагрузочная способность; ⁄ — повышенное коллекторное напряжение выходного каскада.

кабелем. При использовании других проводов на экране осциллографа будут наблюдаться импульсные сигналы с искажениями, вызванными отражениями сигналов в этой линии. Подключение общей точки электронного осциллографа к шине 0 В исследуемой схемы следует производить возможно ближе к той точке, сигнал в которой необходимо наблюдать. При подключении общей точки осциллографа к шине 0 В на значительном удалении от исследуемой точки схемы на экране будет наблюдаться суммарный сигнал: исследуемый сигнал плюс падение напряжения на участке шины 0 В.

7. Электронно-измерительные приборы и, в частности, электронные осциллографы с питанием от сети 50 Гц, 220 В, как правило, имеют значительные проходные емкости своих источников питания, через которые в исследуемую схему могут проникать помехи. Поэтому целесообразно питание таких приборов производить через специальный разделительный трансформатор 220/220 В с заземлением вторичной обмотки. Нежелательно подключение к исследуемой схеме одновременно двух и более электронно-измерительных приборов.

12-7. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА УБСР-ДИ

Комплекс УБСР-ДИ предназначен для создания цифровых и цифроаналоговых систем управления автоматизированным электроприводом. На основе этого комплекса могут проектироваться отдельные бесконтактные устройства управления и регулирования, локальные системы управления и регулирования, системы АСУ ТП.

Схемные и конструктивные решения, принятые в УБСР-ДИ, позволяют применять ее совместно с аналоговыми устройствами УБСР-АИ, а также с УВМ ряда АСВТ-М.

Комплекс устройств УБСР-ДИ является конструктивно законченной системой унифицированных узлов, причем в нем достигнута достаточно высокая степень унификации на всех уровнях конструктивно-функционального исполнения (ячейки, блоки, шкафы, комплектные устройства, системы).

Ячейка является минимальным конструктивным модулем и представляет собой печатную плату с разъемом, на которой устанавливают интегральные микросхемы и отдельные дискретные компоненты (резисторы, конденсаторы, транзисторы и т. п.). Все межэлементные соединения и выводы на разъем выполняются с помощью двустороннего печатного монтажа.

Блок является основным конструктивно-функциональным модулем и представляет собой законченный функциональный узел, собранный на ячейках (до восьми ячеек в блоке). В ячейках используют разъемы типа печать—печать, и все межячеечные соединения в блоках выполняют печатным монтажом (объединяющая печатная плата блока). Проводным монтажом выполняют только соединения с внешними разъемами блока.

В составе комплекса УБСР-ДИ имеется определенный набор ячеек и блоков.

Все ячейки разбиты по назначению на группы:

а) функциональные (счетчики, регистры сумматоры, дискриминаторы и т. п.), предназначенные для выполнения различных логических и арифметических операций, преобразований числовой и частотно-импульсной информации;

б) универсальные логические, предназначенные для построения нестандартных логических схем;

в) временные, предназначенные для формирования временных интервалов, эталонных частот, тактирования и стробирования;

г) согласующие, предназначенные для организации внешних связей (с гальванической развязкой) устройств и систем УБСР-ДИ с аппаратурой управления, датчиками, между собой, с УВМ, выходными исполнительными аппаратами и индикаторами;

д) цифроаналоговые, предназначенные для преобразований числовой и частотно-импульсной информации в аналоговые сигналы и наоборот;

е) вспомогательные;

ж) специальные.

В табл. 12-2 приведен перечень блоков УБСР-ДИ, разработанных на момент составления настоящего издания справочника.

Номенклатура блоков УБСР-ДИ охватывает достаточно широкий круг задач автоматического управления, но в принципе ее нельзя считать законченной, она может расширяться, дополняясь новыми блоками, отвечающими всем требованиям унификации комплекса.

В условиях эксплуатации минимальной единицей, доступной для обслуживания, является ячейка, так как любая ячейка может быть вынута из блока и заменена резервной, а неисправная ячейка может быть проверена с помощью контрольно-испытательного оборудования и исправлена (при наличии специального электромонтажного инструмента).

Системы автоматического управления, создаваемые на базе унифицированных узлов УБСР-ДИ, выполняются с учетом тех же требований унификации и типизации в виде комплектных устройств.

Примером могут служить:

цифроаналоговая система регулирования частоты вращения электропривода;

система группового управления скоростными режимами многодвигательных электроприводов;

система позиционного управления двумя электроприводами с синхронизацией перемещения механизмов;

локальная система автоматического управления скоростными режимами чистовой группы клетей стана горячей прокатки;

локальная система автоматического управления нажимными винтами клетей чистовой группы стана горячей прокатки.

Высокая степень унификации комплекса УБСР-ДИ предъявляет определенные требования к проектирующим организациям, заводам-изготовителям, наладочным организациям и к эксплуатирующему персоналу. Меняется подход к созданию и последующей эксплуатации, который был свойственен для БСУ с малой степенью унификации.

К проектировщикам предъявляются требования по соблюдению принципов унифика-

Таблица 12-2

Перечень унифицированных блоков УБСР-ДИ

Блоки	Тип	Назначение
Регистр памяти	Б101	Прием с одного из двух направлений и хранение числовой информации
Регистр памяти	Б102	Прием и хранение восьми четырехразрядных слов
Цифровой интегратор	Б103	Определение в цифровом виде интегральной составляющей разности частот двух последовательностей импульсов
Селектор входных сигналов	Б111	Переключение входной числовой информации с трех направлений на одно
Селектор выходных сигналов	Б112	Переключение выходной числовой информации с трех направлений на одно
Формирователь чисел	Б121	Формирование числа, изменяющегося во времени с заданным темпом до заданного значения, и его хранение
То же	Б122	Формирование числа со знаком, изменяющегося во времени с заданным темпом до заданного значения (с учетом знака), и его хранение
Дискриминатор чисел	Б123	Сравнение по модулю двух чисел с выработкой сигналов «больше», «равно», «меньше»
Устройство арифметическое	Б131	Сложение и вычитание двух чисел
Дешифратор	Б141	Преобразование из кода *ВС* в код 1 из 16 или из *BCD* в код 1 из 10 с селекцией с четырех направлений на входе
Коммутатор сигналов	Б142	Последовательная коммутация логических сигналов
Делитель частоты управляемый	Б151	Деление числа импульсов, поданных на вход, на заданное число, или отсчет заданного числа импульсов
Преобразователь код — частота (ПКЧ)	Б152	Преобразование числа, заданного в виде параллельного кода, в частоту следования импульсов
Преобразователь частота — код (ПЧК)	Б153	Преобразование частоты следования импульсов в число
Блок управления	Б201	Организация нетиповых узлов обработки логической информации в соответствии с алгоритмом управления
Генератор частотных сигналов	Б301	Выработка ряда частотных сигналов
Формирователь сигналов импульсного датчика	Б401	Обработка сигналов импульсного датчика

Продолжение табл. 12-2

Блоки	Тип	Назначение
Блок усилителей выходных	Б403	Гальваническая развязка и усиление по мощности выходных сигналов
Блок формирователя сигналов цифрового вольтметра	Б404	Согласование по уровням и синхронизация управляющих и информационных сигналов вольтметра Ф203 с внутренними сигналами УБСР-ДИ
Преобразователь код — напряжение (ПКН)	Б501	Преобразование числа, заданного в параллельном коде, в пропорциональное или обратно пропорциональное ему напряжение постоянного тока
Блок формирователя аналоговых сигналов	Б502	Формирование аналоговых сигналов и согласование различных контуров цифровых и цифроаналоговых систем
Блок оптимизатора регулятора положения	Б503	Оптимизация сигналов в цифроаналоговых системах позиционных регуляторов
	Блоки СКВТ	
Блок усилителей	Б901	Формирование и усиление переменного напряжения питания синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ)
Блок преобразователя время — код	Б902	Преобразование временны́х сигналов, пропорциональных углам поворота двух датчиков, в унитарные коды
Блок дискриминатора фаз	Б903	Формирование импульсов с временны́м сдвигом, пропорциональным углу поворота датчика
Блок генератора частоты	Б904	Получение импульсов со скважностью 2 и частотой 400 Гц для питания СКВТ
Блок счетчиков	Б905	Циклическое преобразование унитарного кода датчиков положения в параллельный код
Блок регистров	Б906	Запись и хранение кодов чисел
Индикатор цифровой	Б601	Отображение числовой информации, поступающей в коде *BCD*
Устройство питания	У805	Источник стабилизированного напряжения питания +5 В
То же	У806	Источник стабилизированного напряжения питания ±12,6 В (±15 В)
То же	У811	Преобразование трехфазного напряжения сети в напряжение постоянного тока

ции при создании новых комплектных устройств и требования разработки соответствующей методики испытаний новых комплектных устройств, что подразумевает знание проектировщиками общих методов испытаний и комплекса типового контрольно-испытательного оборудования УБСР-ДИ.

На стадии изготовления на заводе-изготовителе контроль и соответствующие испытания узлов (ячеек и блоков) проводятся силами завода с помощью контрольно-испытательного оборудования комплекса УБСР-ДИ по стандартной методике.

Испытания новых типовых комплектных устройств должны проводиться, как правило, с представителями проектной и наладочной организаций, а также эксплуатации. Эти требования определяются тем, что устранение неко-

торых ошибок и соответствующие переделки становятся практически невозможными на месте эксплуатации.

В комплекты поставки систем и комплектных устройств УБСР-ДИ должно входить и контрольно-испытательное оборудование комплекса УБСР-ДИ.

Пусконаладочные работы на месте эксплуатации систем УБСР-ДИ сводятся к минимуму и заключаются в проверке систем с целью устранения неисправностей, возникающих при транспортировке и монтаже, определении и настройке переменных параметров (если таковые имеются), комплексных испытаниях с технологическим оборудованием.

Наличие стандартного контрольно-испытательного оборудования и встроенных устройств контроля значительно облегчает проведение таких испытаний и сокращает их сроки.

В процессе эксплуатации систем УБСР-ДИ можно контролировать состояние отдельных узлов (практически каждый блок имеет контрольные гнезда, выведенные на лицевую панель). Это позволяет быстро обнаруживать места неисправностей (неисправные блоки) и устранять их путем замены неисправного блока на резервный.

Ремонт ячеек и блоков УБСР-ДИ при наладке и эксплуатации может производиться с помощью того же контрольно-испытательного оборудования.

Неисправный модуль подвергается тестовому контролю, на невыполняемых операциях осуществляются поиск места неисправности и ее устранение. Следует отметить, что ремонт печатных плат можно производить только при наличии специального электромонтажного инструмента и оснастки.

12-8. ПРОВЕРКА И НАСТРОЙКА УСТРОЙСТВ УБСР-ДИ

Технологичность производства устройств УБСР-ДИ позволяет достигать высокой производительности труда на заводах-изготовителях, а требование контроля качества заставляет обращать серьезное внимание на контрольно-испытательное оборудование (КИО), используемое на стадии изготовления устройств УБСР-ДИ.

Это требование определяет состав, специализацию испытательных устройств и стендов, степень их автоматизации, методику проведения испытаний. Состав КИО, предназначенного для проведения испытаний в условиях наладки и эксплуатации, несколько иной, но имеет и много общего с составом и назначением устройств контрольно-испытательного оборудования, предназначенного для проведения испытаний на стадии изготовления.

Состав и методика испытаний с помощью КИО УБСР-ДИ максимально удовлетворяет общим требованиям условий производства на заводах-изготовителях, наладки и эксплуатации.

Повышенная заводская готовность устройств УБСР-ДИ позволяет сместить центр тяжести всех работ по контролю и наладке систем на стадию изготовления, что существенно облегчает и качественно изменяет характер наладочных работ на месте установки и эксплуатации оборудования.

На стадии изготовления устройства УБСР-ДИ проходят многие этапы проверок и испытаний при сборе, монтаже и выходном контроле.

Для оценки объема наладочных работ на объекте целесообразно иметь сведения о проверках, проводимых на заводе-изготовителе.

На заводе-изготовителе в общем случае должны производиться следующие испытания:

технологический контроль исправности плат печатного монтажа;

проверка монтажа ячеек и блоков УБСР-ДИ;

приемо-сдаточные испытания ячеек;

проверка ячеек и блоков на функционирование;

проверка правильности монтажа шкафов (комплектных устройств);

комплексные приемо-сдаточные испытания шкафов (комплексных устройств).

При пусконаладочных работах на месте монтажа проводятся:

испытания шкафов (комплектных устройств) в соответствии с ПУЭ;

повторные испытания шкафов (комплектных устройств) на функционирование по программе, оговоренной в «Инструкции по эксплуатации», с целью выявления неисправностей, возникших при транспортировке и монтаже оборудования;

комплексные предпусковые испытания системы, настройка переменных параметров и т. д.;

проверки и испытания в случаях возникновения отказов с целью обнаружения неисправности и ее устранения, а также после ремонта соответствующего модуля.

Аппаратура, предназначенная для проведения приемо-сдаточных испытаний на заводе-изготовителе, должна обеспечивать высокую производительность проведения испытаний. При этом можно проводить испытания в два этапа: на первом — разбраковку по принципу «годен—негоден» (здесь нужна максимальная степень автоматизации проведения испытаний), а на втором — ремонт неисправных изделий (здесь не требуется высокой автоматизации испытаний).

Основным видом испытаний готовых изделий УБСР-ДИ является проверка на функционирование. Для большинства ячеек и части блоков эта проверка производится методами тестового контроля. Такая проверка дает гарантию полной исправности модуля, в каком бы режиме он ни использовался (конечно, при условии, что контрольный тест является полным).

Некоторые ячейки и блоки, а также комплектные устройства в целом не всегда удается проверить с помощью тестового контроля. В этих случаях организуется динамический режим работы проверяемого узла, имитирующий работу узла в реальных условиях применения, с помощью аппаратуры КИО подаются на входы все необходимые сигналы, выходные сигналы частично контролируются аппаратурой КИО, а некоторые (частотно-импульсные, аналоговые) — с помощью внешних приборов (осциллографы, частотомеры, вольтметры). В этих случаях для ячеек и блоков мож-

но организовать несколько режимов, охватывающих все случаи применения.

Для комплектных устройств проверка должна охватывать все возможные режимы, в которых устройство будет работать в реальных условиях эксплуатации.

12-9. КОНТРОЛЬНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ УБСР-ДИ

При разработке комплекса УБСР-ДИ было уделено серьезное внимание разработке КИО, входящего составной частью в комплекс.

Ниже приведен перечень устройств, разработанных в составе КИО УБСР-ДИ:

1) полуавтоматическое устройство для проверки интегральных микросхем серии К 155;

2) полуавтоматическое устройство для проверки печатных плат;

3) наборы аппаратуры для проверки в ручном режиме правильности монтажа блоков и шкафов;

4) устройство для проверки на функционирование ячеек УБСР-ДИ (кроме ячеек СКВТ);

5) устройство для проверки на функционирование ячеек СКВТ;

6) устройство для проверки на функционирование блоков УБСР-ДИ;

7) набор аппаратуры для проверки на функционирование шкафов и комплектных устройств;

8) анализатор логических сигналов;

9) индикатор логических сигналов;

10) автоматическое устройство для разбраковки ячеек и блоков УБСР-ДИ.

Для наладки и эксплуатации устройств УБСР-ДИ заводом-изготовителем поставляются комплекты для проверки ячеек и блоков (КПЯ-1 и КПБ-1).

Автомат разбраковки позволяет быстро определить «негодные» ячейки и блоки, поступающие на участок технического контроля завода-изготовителя. В большинстве случаев неисправности в этих узлах легко устраняются, так как являются неисправностями типа «перемыкание» или «разрыв» в печатном монтаже.

Автомат разбраковки, работающий по принципу «годен—негоден», не определяет место неисправности в ячейке (блоке).

Неисправный модуль передается на устройство проверки ячеек (блоков), где проходит пооперационную проверку в ручном режиме. Ручные стенды проверки ячеек или блоков позволяют достаточно быстро обнаруживать место неисправности.

Эти стенды оказываются основными устройствами КИО для наладки и эксплуатации.

Ниже рассмотрены основные типы устройств из состава КИО УБСР-ДИ, которые находят широкое применение в условиях наладки и эксплуатации.

1. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЯЧЕЕК (УПЯ)

Устройство предназначено для проверки на функционирование следующих типов ячеек УБСР-ДИ: 2Я101, 2Я104—2Я108, 2Я119, 2Я123, 2Я201—2Я206, Я301, 2Я302, 2Я401—2Я403, Я501—Я505.

Устройство обеспечивает:

проверку соединений (замыканий) между выводами разъема ячейки;

определение уровня изоляции между экраном ячейки и основными цепями, а также между гальванически развязанными цепями;

проверку на функционирование, гарантирующую исправность всех цепей и элементов ячейки.

Все ячейки проверяются пооперационно в ручном режиме, причем большинство ячеек проверяется в статическом режиме с помощью тестового контроля.

Контрольный тест представляет собой законченный набор операций, где каждая операция определяется набором входных сигналов, выдаваемых стендом на входы ячейки, на которые ячейка должна ответить определенной комбинацией выходных сигналов. Каждая операция записывается в виде строки таблицы, а выполняется описанным ниже образом.

На панели управления стенда имеются три клавиши, соответствующие трем режимам: ввод входного слова, ввод выходного слова и режим проверки.

В первом режиме с помощью цифровой клавиатуры набирается входное слово, определяющее 16-разрядную комбинацию логических сигналов на соответственно 16 выводах внешнего разъема стенда. Эти сигналы через специальный адаптер, подключаемый к разъему стенда, поступают на входы проверяемой ячейки. 16-разрядное входное слово запоминается в соответствующем регистре стенда и выводится на индикатор входного слова.

Во втором режиме с помощью той же цифровой клавиатуры стенда набирается выходное 16-разрядное слово, представляющее собой заданную комбинацию логических сигналов, которой должна отвечать проверяемая ячейка при подаче на ее входы входного слова.

Реальная комбинация выходных сигналов, выдаваемая ячейкой, через адаптер и далее разъем стенда возвращается в схему стенда, где сравнивается с заданной. Входное и выходное слова хранятся в регистрах.

В третьем режиме результаты сравнения анализируются и выводятся на выходные индикаторы «годен» или «негоден» и 16 ламп индикации неисправностей в выходных каналах.

В процессе этого контроля проверяется по каждому выходному каналу уровень сигнала по амплитуде, т. е. соответствие его уровням логического нуля или логической единицы, а также совпадение его с правильным тестовым уровнем. Если по всем 16 каналам отмечено совпадение с тестовыми сигналами (фактическое выходное слово совпадает с заданным выходным словом), на панели стенда загорается лампа «годен». Если хотя бы по одному из каналов будет отмечено несовпадение сигналов по уровню или логическому значению, то загорается лампа «негоден», а на табло каналов индицируется номер канала, по которому отмечена неисправность.

Ввод и отображение на цифровых индикаторах входного и выходного слов производятся с помощью цифровой клавиатуры в восьмеричном коде, что позволяет сократить время каждой операции, облегчает чтение испытательных таблиц при наборе заданий, по-

Таблица 12-3

Пример испытательной таблицы

№ операции	Входное слово	Выходное слово	№ операции	Входное слово	Выходное слово
1	003 400	002 457	8	003 440	003 105
2	003 000	002 017	9	003 500	003 105
3	003 401	002 232	10	003 600	003 105
4	003 402	002 232	11	002 400	002 232
5	003 404	002 232	12	001 400	003 105
6	003 410	002 232	13	001 000	002 017
7	003 420	003 105	14	002 000	002 017

вышает наглядность таблиц, уменьшает число ошибок при наборе.

Дешифрация из восьмеричного кода в 16-разрядный позиционный код, хранящийся затем в регистре, выполняется на контактных группах клавиатуры.

Например, если слово задания (входное или выходное) должно иметь вид

0 010 011 111 001 110,

то оно будет вводиться и соответственно выводиться из регистра на цифровой индикатор в виде

023716.

Таблица 12-3 дает пример такой испытательной таблицы для ячейки 2Я107.

Таким образом, вся испытательная таблица (контрольный тест) кодируется в восьмеричном коде.

При обнаружении неисправности на какой-либо операции возникает необходимость поиска места ее возникновения. Тогда закодированные в восьмеричном коде входные и выходные наборы логических сигналов становятся неудобными для работы. Поэтому наряду с таблицей в восьмеричном коде существует в комплекте технической документации и таблица в позиционном коде (см. табл. 12-4).

Эта таблица показывает обозначения всех входов и выходов ячейки, приводит их в соответствие с нумерацией входов и выходов стенда, показывает значения логических сигналов, что позволяет достаточно быстро находить место неисправности. Поиск неисправности начинают с того, что на разъеме ячейки находят вывод, соответствующий неисправному каналу, проверяют его уровень с помощью вольтметра или индикатора логических сигналов, удостоверяясь, что он не соответствует заданному (по таблице). Далее, идя по цепочке логической схемы от выхода к входу, находят место неисправности. Очень часто при неисправности индицируются сразу несколько неисправных каналов. Пользуясь принципиальной схемой ячейки, можно проанализировать возникшую комбинацию несоответствия выходных сигналов и чисто умозрительно локализовать место неисправности, что сократит поиск точки возникновения ее.

В ручном стенде для проверки ячеек применяется адаптерный принцип сопряжения ячейки со стендом. Поскольку количество и точки вывода на разъем стенда входных сигналов ячейки (сигналов, выдаваемых стендом) и выходных сигналов ячейки (сигналов, принимаемых стендом) со стороны стенда определены, а количество входов и выходов и размещение их на разъеме ячейки различны для разных типов ячеек, то возникает необходимость в узле, который приводит в соответствие внешние цепи проверяемой ячейки с внешними цепями стенда. Можно иметь такой программно переключаемый узел коммутации в самом стенде, но он оказывается конструктивно и схемно очень сложным и громоздким.

Адаптерный принцип позволяет иметь стенд упрощенным (а соответственно достаточно малогабаритным), но при этом появля-

Таблица 12-4

Проверка на функционирование ячейки 2Я107 (позиционный код)

Выводы разъема № операции	Входы											Выходы										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	А4, А22	Б4, А16	А6, А19	Б5, А18	Б15, Б24	Б3, Б15	Б9, Б20	А5, А17	А7, А23	Б14, Б18	Б6, Б19	Б7	Б11	А20	А21	Б8	Б10	Б12	Б21	Б22	Б23	А3
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
5	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
6	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
7	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
9	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1

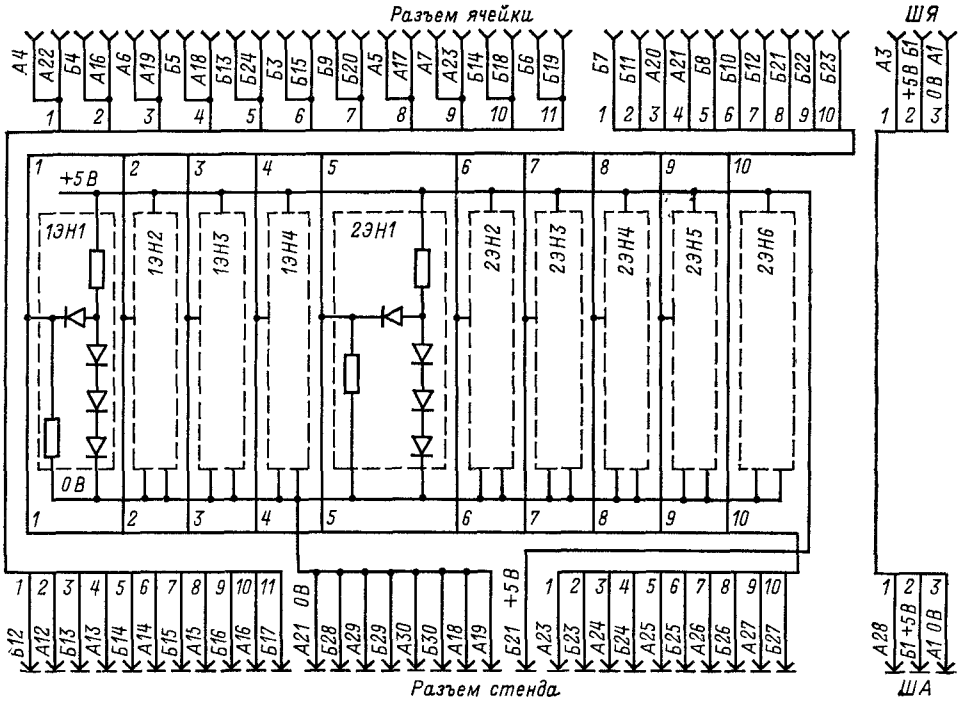


Рис. 12-4. Принципиальная схема адаптера ячейки 2Я107.

1ЭН1—1ЭН4, 2ЭН1—2ЭН6 — стандартные элементы нагрузки.

ется набор адаптеров, число которых равно числу типов ячеек, проверяемых на стенде.

На рис. 12-4 приведена принципиальная схема адаптера ячейки 2Я107.

Из табл. 12-4 и рис. 12-4 видно, что в адаптере осуществляется попарное соединение входов ячейки, на каждую пару подается входной сигнал от разъема стенда. Выходные сигналы ячейки, проходя в адептер, попадают на цепи эквивалентной максимальной нагрузки и проходят к разъему стенда. От стенда подаются цепи питания ячейки и нагрузки, размещенной в адаптере. Размещение нагрузки в адаптере вызвано тем, что у некоторых типов ячеек нагрузочная способность выходов разная, а иногда и схема нагрузки отлична от типовой.

Для ячеек, проверка которых производится в динамическом режиме или требующих подачи на вход эталонного или регулируемого напряжения, в испытательной таблице задается только входное слово, которое одновременно определяет значения входов логических сигналов, частоту входных импульсов или значение эталонного (входного) напряжения постоянного тока. В стенде предусмотрены программно управляемые узлы источника частотно-импульсного сигнала с диапазоном от 100 Гц до 1 МГц и источника эталонного напряжения с диапазоном регулирования от 0 до 10 В. Коды задания отбираются от регистра входного слова.

Контроль выходных сигналов таких ячеек производится с помощью стандартных измерительных приборов (осциллографы, частотомеры, вольтметры), подключаемых к предусмотренным для таких случаев специальным гнездам стенда.

Таблица 12-5

Проверка на функционирование ячейки Я504 (восьмеричный код)

№ операции	Входное слово	Выход
1	000 000	0,00 В ± 2 мВ
2	000 100	4,00 В ± 10 мВ
3	000 000	0,00 В ± 2 мВ
4	000 100	4,00 В ± 10 мВ
5	000 377	9,90 В ± 50 мВ
6	000 360	9,00 В ± 50 мВ
7	000 340	8,00 В ± 40 мВ
8	000 040	2,00 В ± 20 мВ
9	000 020	1,00 В ± 20 мВ
10	000 017	0,90 В ± 20 мВ
11	000 016	0,80 В ± 20 мВ
12	000 004	0,40 В ± 10 мВ
13	000 002	0,20 В ± 10 мВ
14	000 001	0,10 В ± 10 мВ
15	000 400	0,10 В ± 20 мВ
16	114 400	9,90 В ± 100 мВ

Испытательные таблицы ячейки Я504 (табл. 12-5 и 12-6) дают пример проверки цифроаналоговой ячейки преобразователя код — напряжение. Входное слово определяет код задания ячейки, а выходной аналоговый сигнал измеряется с помощью цифрового вольтметра, подключенного к стенду.

Таблица 12-6

Проверка на функционирование ячейки Я504 (позиционный код)

№ операции	Выводы разъема									
	Входы									Выход
	1	2	3	4	5	6	7	8	25	1
	Б22	Б19	Б15	А4	А23	Б24	А3	Б12	А6	Б8, Б9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0 В	0,00 В ± 2 мВ
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0,0 В	4,00 В ± 10 мВ
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0 В	0,00 В ± 2 мВ
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0,0 В	4,00 В ± 10 мВ
5	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0 В	9,90 В ± 50 мВ
6	0	0	0	0	0	1	1	1	0,0 В	9,00 В ± 50 мВ
7	0	0	0	0	0	1	1	1	0,0 В	8,00 В ± 40 мВ
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0,0 В	2,00 В ± 20 мВ
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0,0 В	1,00 В ± 20 мВ
10	1	1	1	1	0	0	0	0	0,0 В	0,80 В ± 20 мВ
11	0	1	1	1	0	0	0	0	0,0 В	0,80 В ± 20 мВ
12	0	0	1	0	0	0	0	0	0,0 В	0,40 В ± 10 мВ
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0,0 В	0,20 В ± 10 мВ
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0 В	0,10 В ± 10 мВ
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1 В	0,10 В ± 20 мВ
16	0	0	0	0	0	0	0	0	9,9 В	9,90 В ± 100 мВ

Инструкция по проверке некоторых ячеек, кроме того, определяет необходимый порядок операций по настройке переменных параметров. Например, для ячейки типа Я504:

а) проверка ячейки производится только в режиме «вход» стенда;

б) выходной сигнал измеряется цифровым вольтметром, сигнальный вход которого подключается к зажиму выходного канала *1*, а нулевой вывод — к зажиму 0 В стенда;

в) установка нуля производится на операциях 1 и 3 с помощью переменного резистора *R29* ячейки;

г) выставление требуемого выходного сигнала (коэффициента усиления) производится на операциях 2 и 4 с помощью переменного резистора *R27* ячейки;

д) проверка ограничения производится при операции 5 следующим образом:

если выходной сигнал меньше 9,9 В, изменением значения переменного резистора *R32* ячейки находят такое положение, при котором выходной сигнал увеличивается до 9,9 В;

если сигнал равен 9,9 В, то резистором *R32* находят такое положение, при котором он начинает уменьшаться.

2. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ БЛОКОВ (УПБ)

Устройство обеспечивает выдачу на входные цепи проверяемого блока:

числовой информации в виде 16-разрядных слов с двумя уровнями входных сигналов (5 В, 24 В) с помощью устройств задания кодов (УЗК);

логических управляющих сигналов с двумя уровнями (5 В, 24 В);

эталонных напряжений постоянного и переменного токов;

частотно-импульсных сигналов с широким диапазоном частот.

Подключение к устройству осуществляется через соответствующий данному блоку адаптер.

Устройство обеспечивает контроль выходной числовой информации на цифровых инди-

Таблица 12-7

Проверка блока Б121

№ операции	Входы							Выходы		
	Число, выставляемое на УЗК1	Положение переключателей логических входов						Показания *HD1*	Показания *HL*	
		B1	B2	B3	B4	B5	B6		1	2
1	0000	1	0	0	0	0	1	0000	0	1
2	7777	0	1	0	0	0	1	7777	1	1
3	8888	0	1	0	0	0	1	8888	1	1
4	0000	0	1	0	0	0	1	0000	1	1
5	0000	0	0	1	0	0	1	9999	0	1
6	0000	0	0	0	1	0	1	0000	0	1

Таблица 12-8

Проверка блока Б152

№ операции	Входы				Выходы
	Число, выставляемое на УЗК1	Положение переключателей логических сигналов			Показания частотомера
		В1	В2	В3	
1	0000	1	0	1	00 000
2	7777	1	0	0	07 777
3	8888	1	0	0	08 888
4	8888	1	1	0	08 889
5	0000	1	0	0	00 000

каторах *HD* и выходных логических сигналов на индикаторах *HL* (*HD* и *HL* — обозначения на лицевой панели заводской УПБ). Устройство позволяет контролировать (в контрольных гнездах адаптера) все необходимые выходные сигналы с помощью осциллографа, частотомера, цифрового вольтметра.

Ниже приведены примеры испытательных таблиц блоков (табл. 12-7, 12-8).

3. ИНДИКАТОР ЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Прибор выполнен в виде щупа с цифровым малогабаритным индикатором и предназначен для оценки уровня логических сигналов в статическом режиме для микросхем серии К 155. Щуп позволяет зондировать практически любые точки печатной платы. Индикатор, размещенный на щупе, позволяет визуально контролировать уровень сигнала. На индикаторе высвечивается один из трех знаков: «1» — соответствует уровню логической единицы, т. е. не менее 2,4 В; «0» — соответствует уровню логического нуля, т. е. не более 0,4 В; *L* — соответствует нелогическим уровням, лежащим в пределах 0,5—2,3 В (неисправность).

Аналогичный прибор — логический пробник П-1 выпускается Московским опытным заводом электромонтажной техники специально для наладочных работ (см. разд. 3).

При пусконаладочных работах иногда возникают трудности с поиском мест возникновения случайных сбоев, вызванных, как правило, наличием помех. Когда сбои очень редкие, а требуется просматривать одиночные короткие импульсы или серии импульсов с очень большой скважностью, пользоваться осциллографом весьма затруднительно или просто невозможно. Для таких целей в составе КИО УБСР-ДИ *был разработан специальный прибор* — анализатор логических сигналов. Этот прибор предназначен для выявления и локализации неисправностей в цифровых синхронных системах.

На каждом такте работы исследуемой системы устройство непрерывно принимает информацию по четырем каналам, а в выбранный момент времени запоминает ее на отрезке в 10 тактов и выдает ее на индикацию. Этот момент времени определяется выбранным синхросигналом.

Анализатор позволяет просмотреть состояние четырех исследуемых каналов в течение 10 тактов до момента выделения синхроимпульса (так называемый режим донулевой развертки), а также после определенной задержки (до 100 тактов) после прохождения синхроимпульса. Таким образом, в общем случае имеется возможность просмотра информации с момента времени, начиная за 10 тактов до синхроимпульса и кончая 110 тактами после него.

При обнаружении неправильной информации, носящей случайный характер (сбои), можно перейти на замедленную смену информации на индикаторах (до 2 с), а в момент фиксации сбоя остановить смену информации, зафиксировав сбой на индикаторе для последующего анализа и нахождения неисправности.

12-10. ПОМЕХИ В СИСТЕМАХ С УСТРОЙСТВАМИ УБСР-ДИ. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В отличие от вычислительных комплексов, предназначенных для применения в автоматизированных системах управления (АСУ ТП) и устанавливаемых в специальных экранированных помещениях, устройства УБСР-ДИ предназначены для размещения в электромашинных помещениях, т. е. в непосредственной близости от мощных силовых агрегатов (тиристорных преобразователей, комплектных трансформаторных подстанций, двигателей постоянного и переменного тока) и щитов управления с расположенными на них магнитными пускателями, контакторами и другой коммутационной аппаратурой. Каждое из этих устройств является в общем случае источником электромагнитных помех. Даже включение маломощного реле может привести к сбою в работе сложного комплектного устройства при неудачных компоновке системы, конфигурации ее внешних связей и внутреннего монтажа шкафов. Поэтому обеспечение надежной работы устройств УБСР-ДИ должно рассматриваться как вопрос первостепенной важности на всех стадиях создания системы автоматического управления от проектирования до монтажа и наладки.

Помимо так называемых внесистемных помех, источники которых находятся вне устройств УБСР-ДИ, существуют и внутрисистемные помехи, обусловленные особенностями элементной базы, взаимным влиянием межблочных связей, отдельных функциональных узлов через общую систему питания и т. д. Обе разновидности помех могут быть сведены к минимуму при условии выполнения *специальных мероприятий при проектировании* и монтаже устройств УБСР-ДИ.

Несмотря на то что основные мероприятия по повышению помехоустойчивости должны проводиться при разработке устройств УБСР-ДИ и проектировании систем, наладочный персонал должен быть знаком с особенностями применения элементной базы, блоков и устройств и рекомендуемыми способами подавления помех, так как любые изменения в схемах устройств, проведенные без учета влияния помех, могут привести к сбоям в работе системы управления.

Основные понятия и определения. Одним из основных электрических параметров ин-

тегральной логической микросхемы (ИМС) является статическая помехоустойчивость. Для ее определения, как правило, используется передаточная характеристика, т. е. зависимость выходного напряжения схемы от напряжения на одном из входов при постоянном напряжении на остальных входах и заданном числе нагрузок. На рис. 12-5 приведены типовые передаточные характеристики с учетом изменения параметров при изменении температуры для микросхем серии К 155. При напряжениях на входе $U_{вх} < U''_{пор}$ на выходе микросхемы (закрытой) присутствует сигнал высокого уровня — логической единицы. При напряжении на входе $U_{вх} > U'_{пор}$ на выходе микросхемы (открытой) устанавливается сигнал низкого уровня — логического нуля. Входные пороговые напряжения $U'_{пор}$, $U''_{пор}$ определяют из условий

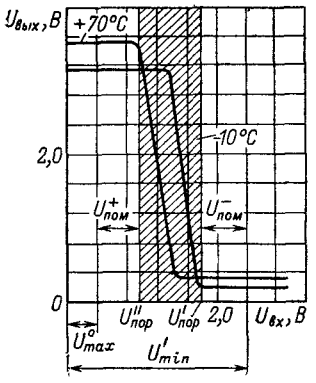


Рис. 12-5. Типовые передаточные характеристики микросхем серии К 155.

$$\left.\frac{dU_{вых}}{dU_{вх}}\right|_{U_{вх}=U'_{пор}} = \left.\frac{dU_{вых}}{dU_{вх}}\right|_{U_{вх}=U''_{пор}} = -1. \qquad (12\text{-}1)$$

При напряжениях на входе $U''_{пор} \leqslant U_{вх} \leqslant U'_{пор}$ ИМС находится в области переключения. В этой области (на рис. 12-5 заштрихована) ИМС не должна находиться в статическом режиме, иначе работа цифрового устройства будет нарушена.

В цифровых устройствах входные напряжения ИМС определяются выходными напряжениями предыдущих ИМС. В связи с этим статическая помехоустойчивость закрытой схемы по отношению к отпирающей помехе на входе определяется значением напряжения

$$U^{+}_{пом} = U''_{пор} - U^{0}_{max}, \qquad (12\text{-}2)$$

а статическая помехоустойчивость открытой схемы

$$U^{-}_{пом} = U^{1}_{min} - U'_{пор}, \qquad (12\text{-}3)$$

где U^{0}_{max} — максимальное напряжение логического нуля на выходе открытой ИМС (для серии К 155 + 0,48 В); U'_{min} — минимальное напряжение логической единицы на выходе закрытой ИМС (для серии К 155 +2,48 В).

Значения входных пороговых напряжений, полученные на основании типовых передаточных характеристик и (12-1), составляют

$$U''_{пор} = 0{,}95 \text{ В}; \quad U'_{пор} = 1{,}8 \text{ В}.$$

Из (12-2) и (12-3) получим

$$U^{+}_{пом} \approx 0{,}5 \text{ В}; \quad U^{-}_{пом} \approx 0{,}6 \text{ В}.$$

Из характеристик (рис. 12-5) видно, что с ростом температуры окружающей среды статическая помехоустойчивость закрытой ИМС по отношению к отпирающей помехе ухудшается, а открытой ИМС по отношению к запирающей помехе улучшается.

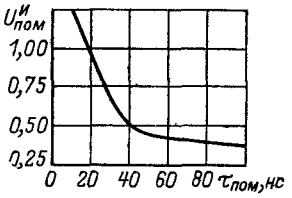


Рис. 12-6. Амплитудно-временна́я характеристика микросхем серии К 155.

При разработке аппаратуры с ИМС серии К 155 максимально допустимое напряжение статической помехи на входе принимают равным 0,4 В.

Для нормального функционирования цифровой аппаратуры необходимо обеспечить не только статическую, но и динамическую помехоустойчивость по отношению к импульсным помехам, которые могут иметь бо́льшую амплитуду, чем статические.

Динамической называют помеху, длительность которой соизмерима со временем переключения микросхем.

Наиболее широко используется метод оценки импульсной помехоустойчивости с помощью амплитудно-временно́й характеристики. При этом рассматривается импульс помехи прямоугольной формы, имеющий только два параметра: амплитуду напряжения (тока) и длительность.

На рис. 12-6 приведена амплитудно-временна́я характеристика зависимости значения допустимой импульсной помехи $U^{и}_{пом}$ на верхнем и нижнем уровнях сигнала от ее длительности $\tau_{пом}$ для ИМС серии К 155.

Импульсные помехи в цифровых устройствах на интегральных схемах могут вызываться следующими факторами: отражениями в сигнальных линиях связи от несогласованных нагрузок и неоднородностей линий связи; перекрестными наводками между сигнальными линиями связи; паразитными связями между микросхемами по цепям питания и заземления; искажениями формы сигнала в микросхемах; искажениями формы сигнала в линиях связи; состязаниями сигналов в логических

цепях; наводками от внешних электромагнитных полей.

Одним из методов повышения помехоустойчивости цифровых устройств на интегральных схемах является усовершенствование самих ИМС в процессе их разработки и изготовления. На этих стадиях решаются две основные задачи: повышается устойчивость схем к помехам, действующим по входным цепям, цепям питания и заземления; уменьшаются амплитуда и длительность помех, а также искажения полезного сигнала, создаваемые самими ИМС при переключении.

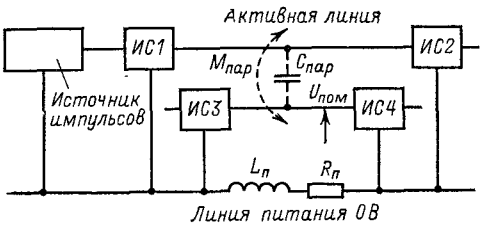


Рис. 12-7. Упрощенная схема возникновения помехи за счет взаимодействия связей и сопротивления линии питания 0 В.

ИС1—ИС4 — источники сигналов; $M_{пар}$ — коэффициент взаимоиндукции; $C_{пар}$ — межпроводная емкость связи; $U_{пом}$ — напряжение помехи; $L_п$ — индуктивность линии питания; $R_п$ — активное сопротивление линии питания.

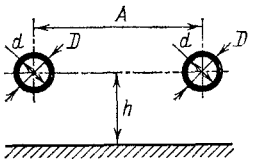


Рис. 12-8. Расположение проводников линий связи.

Другие методы заключаются в рациональном конструировании аппаратуры с ИМС, обеспечивающем малые отражения сигналов от несогласованных нагрузок и неоднородностей, малое затухание и искажение полезного сигнала при включении распределенных вдоль линии нагрузок, уменьшение перекрестных наводок и паразитных связей между схемами через цепи питания и заземления, уменьшение наводок от внешних электромагнитных полей и т. д.

Помимо указанных важное значение имеют схемнотехнические и структурные методы повышения внутрисистемной помехоустойчивости, например стробирование сигналов ИМС, введение дополнительных логических связей, разработка мажоритарных систем и т. д.

Перекрестными называются помехи, вызванные взаимодействием соседних сигнальных линий, расположенных вблизи друг друга. В одной системе параллельных линий может быть как согласное, так и встречное включение, при котором сигналы передаются в противоположных направлениях.

На рис. 12-7 приведена упрощенная схема возникновения помехи за счет взаимодействия связей и сопротивления линии питания 0 В. Помеха возникает в виде емкостной и индуктивной наводок, а также в виде падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях общей линии питания.

Если $t_л \leqslant t_ф$, где $t_л$ — полная задержка в линии, $t_ф$ — длительность фронта импульса, вызывающего помеху, то линия является электрически короткой и к анализу помех можно применить метод сосредоточенных параметров. В противном случае линия связи считается длинной и анализируется с помощью методов анализа линий с распределенными параметрами.

Для ТТЛ-схем в связи с низким выходным сопротивлением открытой передающей схемы преобладают индуктивные отпирающие помехи. Запирающие помехи имеют емкостный характер.

Взаимодействие линий связи определяется коэффициентами емкостной и индуктивной связи k_C и k_L. Коэффициент емкостной связи между двумя проводниками круглого сечения (рис. 12-8), расположенными на расстоянии A друг от друга и удаленными на расстояние h от проводящей поверхности, равен

$$k_C = \left(1 + 2 \frac{\ln \frac{D}{d} \frac{2A}{2A-D} + \varepsilon \ln \frac{2A-D}{D}}{\ln \frac{D}{d} \frac{4h}{4h-D} + \varepsilon \ln \frac{4h-D}{D}} \right)^{-1},$$

где d — диаметр проводящей жилы; D — диаметр провода с изоляцией; ε — диэлектрическая проницаемость.

Коэффициент индуктивной связи может быть вычислен по тому же выражению, если положить $\varepsilon = 1$.

Для уменьшения коэффициентов связи необходимо располагать проводники возможно ближе к проводящей поверхности, увеличивать расстояние между проводниками или применять витые пары.

Коэффициент индуктивной связи в витых парах мало отличается от аналогичного коэффициента для одиночных проводов. Однако по обратным проводам витых пар протекает ток, противоположно направленный по отношению к току в прямых проводах. При равенстве этих токов эффективный коэффициент индуктивной связи равен нулю.

Волновое сопротивление одиночного круглого проводника, Ом, зависит от его диаметра и расстояния до проводящей поверхности

$$\rho = \frac{60 \ln 4h}{d}.$$

Линия связи, выполненная в виде витой пары, имеет фиксированное волновое сопротивление, не зависящее от расстояния провода до проводящей поверхности,

$$\rho \approx \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{2D}{d}.$$

Это обстоятельство является важным при согласовании линии связи с выходным сопротив-

лением источника сигнала, которое производится с целью уменьшения искажений формы сигнала.

12-11. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ И МОНТАЖУ УСТРОЙСТВ УБСР-ДИ

С целью уменьшения внутрисистемных помех при разработке и наладке устройств УБСР-ДИ должны строго выполняться мероприятия, оговоренные предприятиями — разработчиками ИМС.

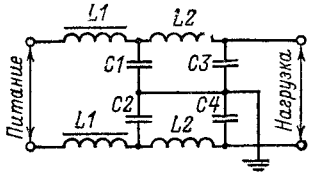


Рис. 12-9. Фильтр в цепи питания.

Блоки УБСР-ДИ. В блоках УБСР-ДИ все металлические части блока, а также печатные проводники, обрамляющие ячейки (экраны), выводят на специально отведенный контакт разъема, который должен быть подключен к шине «земля» комплектного устройства. Допускается подключение шлейфом лишь двух блоков, расположенных в одной кассете.

Ответная часть разъема блока должна обеспечивать возможность подключения сигнальных и обратных проводов витых пар. При этом обратные провода должны подключаться к точкам, связанным электрически непосредственно с контактом разъема блока 0 В.

Не рекомендуется подавать на разъемы блоков сигналы от внешних устройств, находящихся вне комплектного устройства, без промежуточной гальванической развязки.

Система питания. С целью снижения статических помех напряжение питания ИМС должно быть стабилизированным и иметь минимум пульсаций. Рекомендуется применение 12-пульсных источников выпрямленного напряжения. Разводка питания по блокам должна осуществляться радиально с применением свитых проводов. Сечение проводов питания должно быть не менее 0,75 мм^2.

Для подавления импульсных помех от питающей сети в системе питания должны устанавливаться сетевые *C*- или *LC*-фильтры. На рис. 12-9 приведена схема сетевого *LC*-фильтра. Фильтр выполнен симметричным. Двухобмоточный дроссель *L1* с ферромагнитным сердечником и конденсаторы *C1* и *C2* рассчитываются исходя из условия подавления низкочастотных помех. Двухобмоточный дроссель *L2* и конденсаторы *C3* и *C4* предназначены для подавления высокочастотных помех. Дроссель *L2* выполняется без ферромагнитного сердечника.

Сетевые трансформаторы должны иметь электростатические экраны между первичной и вторичными обмотками для снижения паразитной междуобмоточной емкости, которая может составлять сотни пикофарад. Применение электростатического экрана дает ощутимый эффект, снижая значение междуобмоточной емкости в 10—15 раз. Особое внимание следует обращать на конфигурацию цепей питания с точки зрения отсутствия замкнутых контуров, образованных цепями +5 В или 0 В. Наличие таких контуров может существенно ухудшить помехоустойчивость системы.

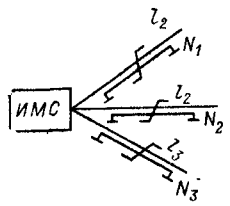
Межблочные соединения должны монтироваться объемными проводниками с обязательным соблюдением следующих правил:

1) линии связи длиной до 30 см для синхронных и до 20 см для асинхронных устройств выполняются одиночным проводом. С выхода одного передающего элемента допускается проводить до пяти радиальных связей с общей длиной линий связей не более 50 см;

2) линии связи длиной от 30(20) см до 1 м должны выполняться несогласованными витыми парами. С выхода одного элемента

Таблица 12-9

Несогласованные линии связи

Схема связи	Рекомендации по применению	Приращение задержки на выходе, нс			
		ИМС		линии связи	
		$\Delta t_з^{01}$	$\Delta t_з^{10}$	$\Delta t_з^{01}$	$\Delta t_з^{10}$
	При радиальном способе разводки нагрузка сосредоточена на конце линии связи. При комбинированном способе разводки нагрузка распределяется по длине линии связи. Длина каждой линии связи не более 1 м	$8\,l_\Sigma$	$6\,l_\Sigma$	$8\,l_\Sigma+5l_i$	$6\,l_\Sigma+5\,l_i$

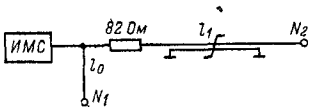
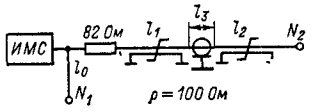
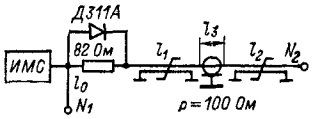
Примечания: 1. К выходу триггера согласованную линию связи подключать нельзя.

2. При определении приращения задержки длину линий l_i брать в метрах.

Обозначения: $t_з^{01}$ — время задержки при переключении из состояния 0 в состояние 1; $t_з^{10}$ — время задержки при переключении из состояния 1 в состояние 0; l_i — витая пара или кабель с волновым сопротивлением 100 Ом; $l_\Sigma = l_1 + l_2 + l_3 \leqslant 2$м.

Таблица 12-10

Согласованные линии связи

Схема связи	Количество элементов нагрузки N_i		Приращение задержки на выходе, нс				Длина участков линии, м		Тип передающего элемента (ИМС)
			ИМС		Линии связи				
	N_1	N_2	$\Delta t_з^{01}$	$\Delta t_з^{10}$	$\Delta t_з^{01}$	$\Delta t_з^{10}$	Одиночная связь	Жгут	
	5	1	8	6	8+5 l	6+5 l	$l_1 \leqslant 3$	—	Любой элемент с нагрузочной способностью $N \geqslant 10$
	2	2							
	5	1	8+10 l	6	8+5 l	6+5 l	—	$l \leqslant 3$	
	2	2							
Витая пара или кабель с волновым сопротивлением 100 Ом	17	1	8	6	8+5 l	6+5 l	$l_1 \leqslant 3$		Только К 155 ЛА6
	6	2							
	17	1	3	6	8+5 l	6+5 l	$l_1+l_2 \leqslant 3$ $\Sigma l \leqslant 10$		Только К 155 ЛА6
	6	2							
	0	2	8+2 l	6	8+5 l	6+5 l	$l_1 \leqslant 0{,}5$ $l_2 \leqslant 0{,}5$ $l_3 \leqslant 30$		

Примечания: 1. К выходу триггера согласованную линию связи подключать нельзя.

2. При определении приращения задержки длину брать в метрах.

3. Нагрузка N_1 подключается одиночным проводом при $l_0 \leqslant 20$ см или витой парой при $l_0 \leqslant 50$ см.

допускается проводить не более трех витых пар с суммарной длиной не более 2 м. При этом следует учитывать, что время задержки сигналов увеличивается (табл. 12-9);

3) обратный провод витой пары подключается с двух сторон к контакту разъема блока 0 В, при этом длина разделенной части витой пары не должна превышать на каждом конце 3 см;

4) одиночные провода не допускается укладывать в жгут. Несогласованные витые пары допускается укладывать в плоские жгуты (шлейфы) и в группы проводов без их увязки в жгуты;

5) разводку связей с выхода микросхемы типа К 155 ЛА6, имеющей большой коэффициент разветвления по выходу, необходимо осуществлять так, чтобы к каждой линии связи было подключено не более 10 элементов;

6) от витой пары допускается делать отводы одиночным проводом. Суммарная длина отводов не должна превышать 20 см;

7) в линии связи, выполненной витой парой, отдельные участки цепи допускается проводить одиночным проводом, при этом суммарная длина одиночных проводов в данной линии связи не должна превышать 20 см, а длина всей линии связи — 1 м;

8) линии связи длиной от 1 до 3 м выполняются только согласованными витыми парами. Согласование линии связи производится с помощью резистора МЛТ-0,125 сопротивлением 82 Ом±5% (табл. 12-10);

9) согласованные линии связи длиной более 3 м необходимо выполнять с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 100 Ом;

10) разводку цепей синхронизации при длине линии не более 50 см следует выполнять несогласованным коаксиальным кабелем (без резистора и диода). При длине линии связи более 50 см следует применять согласованный коаксиальный кабель;

11) монтаж линий связи между блоками и переключателями, тумблерами и т. д. выполняется с помощью экранированных или одиночных проводов, собранных в жгут и помещенных в общую экранную оплетку с внешней изоляцией в виде, например, полихлорвиниловой трубки;

12) укладка в один жгут информационных цепей и цепей коммутации и индикации не допускается;

13) не допускается укладка в общий короб информационных и других цепей с уровнем напряжения питания +5 В (±15 В) и цепей переменного тока 50 Гц, а также цепей с уровнем напряжения 24 В (внешние связи комплектных устройств);

14) не рекомендуется осуществлять связи

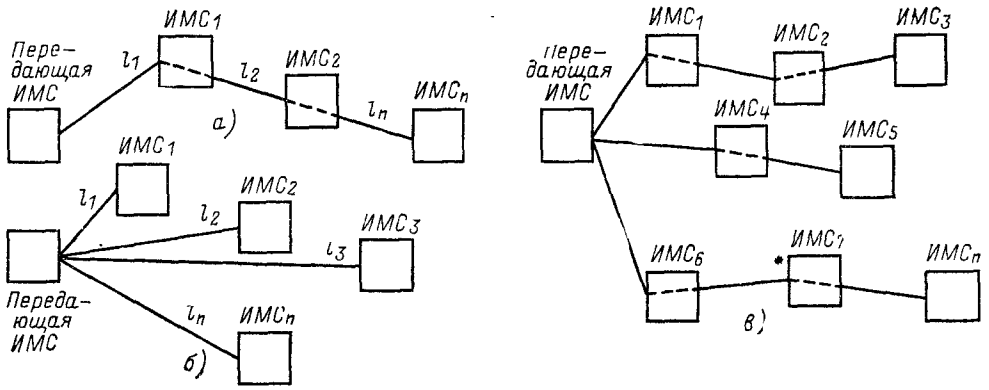


Рис. 12-10. Способы соединения передающей и приемных микросхем.

а — последовательный способ подключения элементов нагрузки к источнику сигнала (подключение шлейфом); *б* — радиальный способ подключения элементов нагрузки к источнику сигнала; *в* — комбинированный способ подключения элементов нагрузки к источнику сигнала.

между отдельными комплектными устройствами на уровне сигналов с напряжением питания +5 В.

На рис. 12-10 и 12-11 приведены поясняющие примеры разводки связей в соответствии с вышеизложенными требованиями.

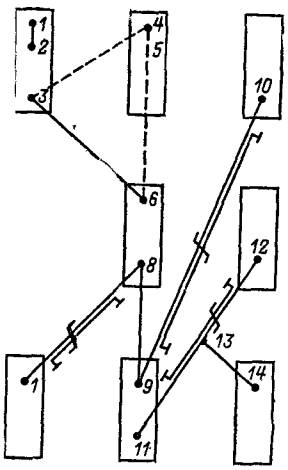


Рис. 12-11. Способы выполнения межблочных связей.

При соединении точек *3—6* шлейфом (как показано пунктиром) *l* 20 см и требуется применение витой пары. Соединение точек комбинированным способом (при $l \leqslant 20$ см) можно осуществить одиночным проводом; между двумя витыми парами допускается проводить одиночный провод *8—9* длиной не более 10 см; от витой пары допускается делать отводы *13—14* длиной не более 10 см.

Для удобства разводки монтажа и его контроля следует осуществлять монтаж различных цепей проводами разных цветов.

Заземление. В системе УБСР-ДИ корпусы шкафов выполняют роль экранов. С этой целью подвижные металлические части (поворотные рамы, двери) должны быть соединены гибкими проводниками с неподвижной частью шкафа. Шкаф должен быть надежно заземлен. Рекомендуется организация на объекте отдельного контура заземления для устройств УБСР-ДИ, так как общецеховой контур заземления обладает большими токами растекания, обусловленными воздействиями со стороны сильноточной аппаратуры и сварки.

В комплектном устройстве выбирается одна точка, к которой радиально подключаются шины заземления, шины питания 0 В, шины питания 0 ВВ (системы питания внешних устройств), а также экраны внешних кабелей, по которым передаются выходные сигналы. Эта точка должна быть надежно соединена с контуром заземления.

Внешние связи устройств УБСР-ДИ. Обработка информации в цифровых устройствах УБСР-ДИ производится на уровне сигналов с напряжением питания +5 В. С целью повышения помехоустойчивости систем сигналы, поступающие от внешних устройств (датчиков, коммутационной аппаратуры, расположенной на пультах управления, других комплектных устройств), передаются на уровне 24 В. В комплектных устройствах устанавливаются входные и выходные согласующие устройства, предназначенные для преобразования уровней сигналов и их гальванической развязки. К этим устройствам относятся ячейки разделителей входных сигналов (2Я401 — с входными реле, 2Я402 — с оптронами), ячейки выходных усилителей (2Я403 — с оптронами), блоки выходных усилителей (Б403).

Согласующие ячейки выполнены с двумя штепсельными разъемами, расположенными на противоположных концах печатной платы. На лицевой панели ячейки согласования устанавливается разъем для подключения цепей с сигналами от внешних устройств, передаваемыми на уровне 24 В. На противоположной стороне платы устанавливается разъем, аналогичный разъемам всех остальных ячеек УБСР-ДИ. Через этот разъем поступают сигналы на уровне +5 В, обрабатываемые внутри комплектного устройства, развязанные гальванически с внешними сигналами.

Наличие разъема, установленного на лицевой панели ячейки, позволяет обеспечивать раздельную прокладку цепей внешних и внутренних сигналов в комплектном устройстве, что приводит к существенному ослаблению перекрестных помех.

Система питания устройств согласования на уровне 24 В выполняется гальванически разделенной от системы питания внутренних устройств.

На рис. 12-12 приведена схема организации внешних связей комплектных устройств УБСР-ДИ.

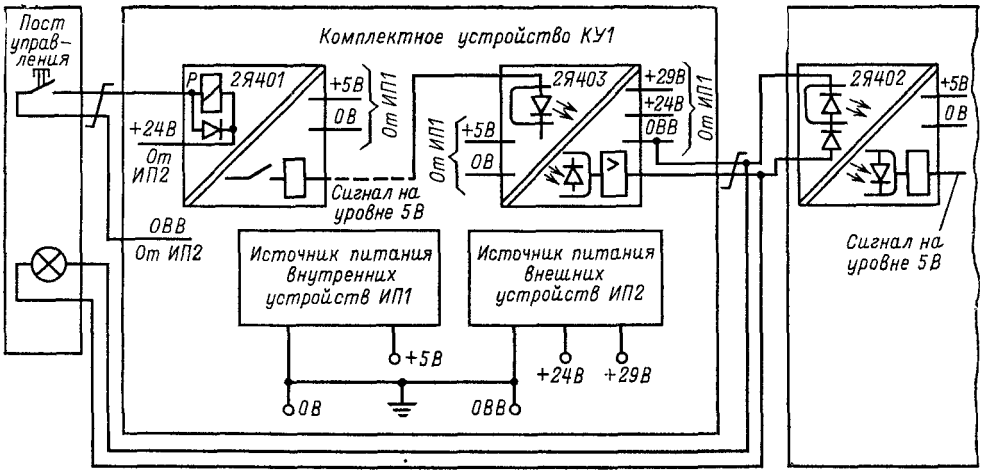


Рис. 12-12. Схема организации внешних связей комплектных устройств УБСР-ДИ

Приняты следующие принципы организации внешних связей:

цепи входных сигналов, поступающих от пассивных аппаратов типа «сухой контакт», например кнопок, ключей, переключателей и т. п., получают питание от источника питания внешних устройств соответствующего комплектного устройства;

цепи выходных сигналов комплектного устройства получают питание от источника питания внешних устройств этого комплектного устройства.

При организации внешних связей следует иметь в виду, что входные сигналы от контактных аппаратов должны поступать только на ячейку разделителей сигналов с входными реле 2Я401, имеющую противодребезговую защиту. Входные цепи этой ячейки должны включаться с учетом полярности питающего напряжения в связи с наличием диода, шунтирующего обмотку реле для подавления помехи при его отключении. Ячейка разделителей с оптронами 2Я402 также требует определенной полярности входного сигнала из-за наличия в цепи оптрона защитного диода.

В общем случае внешняя информация может быть подразделена на три группы:

команды, поступающие от контактных или бесконтактных аппаратов;

информация в виде параллельного кода;

последовательности импульсов.

Для снижения уровня помех рекомендуется передавать сигналы первой группы кабелями связи, имеющими парную скрутку проводов.

Сигналы второй группы могут передаваться по кабелям связи с общим экраном, поверх которого наложена изоляция.

Для уменьшения искажения формы сигналов третьей группы рекомендуется передавать их с помощью коаксиальных кабелей связи.

При выборе кабелей связи должны учитываться также затухания сигналов и требования пожарной безопасности.

Экраны кабелей должны заземляться в одной точке в комплектном устройстве, передающем информацию.

Анализ относительных уровней напряженностей электрических и магнитных полей в системах управления электроприводами, системах автоматики и АСУ ТП, а также технических характеристик отечественных и зарубежных кабелей и проводов связи позволяет сформулировать ряд специфических требований к кабелям и проводам связи с точки зрения повышения их помехозащищенности.

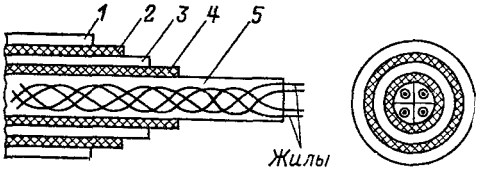


Рис. 12-13. Многополюсный коаксиальный кабель.

1 — изоляция; *2* — экран (стальной); *3* — изоляция; *4* — экран (медный); *5* — заполнитель.

При передаче цифровых и импульсных сигналов с частотой более 10 кГц целесообразно применение однополюсных и многополюсных коаксиальных кабелей (рис. 12-13). Основными отличиями рекомендуемых технических параметров коаксиальных кабелей связи от широко используемых в настоящее время являются:

повышенная толщина изоляции, определяемая необходимостью повышения сопротивления изоляции. При этом уменьшаются токи утечки между жилами и на землю, благодаря чему снижаются потери мощности и коэффициенты искажения передаваемых сигналов;

увеличение сечения жил (до 0,75—1,5 мм²) с целью снижения электрического сопротивления;

наличие парной скрутки с шагом, не превышающим 25—30 мм;

применение в качестве основного экрана не медного, а стального, что связано с преобладанием в промышленных условиях эксплуа-

тации низкочастотных (50—1200 Гц) магнитостатических полей. Экранирующий эффект экрана из стальной оцинкованной проволоки по отношению и к электростатическому, и к магнитостатическому полю в области частот до 10^3 Гц достаточно высок. Дополнительное применение медного экрана оправдано лишь в случаях воздействий высокочастотных электромагнитных полей (свыше 10^4 Гц).

При передаче низкочастотных сигналов, в том числе и аналоговых, могут применяться двухполюсные и многополюсные кабели и провода связи. Как и для коаксиальных кабелей, в этом случае предъявляются повышенные требования в части рабочего напряжения (сопротивления изоляции), сопротивления жил и шага скрутки. В то же время требования к значениям емкостей между жилами, экраном и землей могут быть несколько снижены, что объясняется ростом экранирующего эффекта медных и стальных экранов по мере снижения частоты влияющего электростатического поля. В качестве основного экрана также целесообразно применять стальной экран.

Следует подчеркнуть, что основным мероприятием, существенно снижающим уровень помех в проводах и кабелях связи, является парная скрутка проводов. Результаты экспериментов свидетельствуют, что при уменьшении шага скрутки уровень помех пропорционально снижается с коэффициентом пропорциональности 1—5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

12-1. **Справочник** по наладке электроустановок/Под ред. А. С. Дорофеюка и А. П. Хечумяна — М.: Энергия, 1976, — 560 с.

12-2. **Проектирование** микроэлектронных цифровых устройств/О. А. Пятлин и др. — М.: Советское радио, 1977.

12-3. **Помехоустойчивость** устройств на интегральных логических схемах./Ю. Е. Наумов — М.: Советское радио, 1975.

12-4. **Пасковатый О. И.** Электрические помехи в системах промышленной автоматики. — М.: Энергия, 1973. — 104 с.

12-5. **Осипов О. И., Усынин Ю. С.** Уровни промышленных помех в вентильных электроприводах прокатных станов на элементах УБСР. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. — М.: 1974, вып. 4 [30].

12-6. **Масленников А. Р.** Вопросы защиты от помех автоматизированных систем управления технологическими процессами с применением управляющих вычислительных машин. — Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. — М.: Энергия, 1977, № 3, с. 6—12.

12-7. **Справочник** по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами. — 3-е изд./Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. — М.: Энергия, 1982. — 416 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматические выключатели быстродействующие постоянного тока, проверка и настройка 241
— — — — — — серии ВАБ-42 236
— — — — — — — ВАБ-43 239
— — — — — — — ВАТ-42 236
— — переменного тока серии А-3100 227
— — — — — — А-3700 222
— — — — — — АВМ 215
— — — — — — АЕ-2000 228
— — — — типа АП-50 227
— — серии «Электрон», основные технические данные 231
— — — — — проверка 116
— — — — — проверка максимальной токовой защиты 234
Автотрансформаторы, испытания 93
— регулировочные, технические данные 29
Аккумуляторные батареи, проверка и испытания 112
Аппаратура управления и защиты напряжением до 1000 В, общие указания по проверке 204
— — — — — — — — — реле тепловые 214
— — — — — — — — — — электромагнитные 210
Аппараты и приборы для наладочных работ, общие сведения 18
— — — — — — разные 33
— — — — — — разработанные и применяемые организациями Главэлектромонтажа Минмонтажспецстроя 35
Асинхронные вентильные каскады, наладка 378
— двигатели с короткозамкнутым ротором с релейно-контакторным управлением 369
— — — — — — — фазным управлением 370
— — — — — — — частотным регулированием 372
— — с фазным ротором с машиной двойного питания 380
— — — — — — — релейно-контакторным управлением 377

Б

Бесконтактные системы управления, аппаратура для проверки 451
— — — основные понятия 447
— — — особенности наладки 447
— — — проверка 450
Блоки питания БП-11 172
— — БПЗ-401, БПЗ-402 167
— — БПТ-1002, БПН-1002 156
— — стабилизированного напряжения 163

В

Вентиляция аварийная, проверка 118
Выключатели воздушные, испытания и наладка 89
— масляные, испытания и наладка 89

Г

Гальванометры 28

Д

Диэлектрические потери, определение 64

З

Защиты дифференциальные 199
— при однофазных замыканиях на землю 182, 194
— проверка направленности 195

И

Измерение времени 62
— емкости и индуктивности 56
— мощности 50
Измерение напряжения и тока 48
— сопротивления заземлителей 70
— — заземляющих проводников 70
— — петли фаза—нуль 74
— удельного сопротивления грунта 73
— частоты 57
— электрического сопротивления 54
— электроэнергии 52
Изоляторы, испытания 114
Изоляция электрическая, определение прочности 66
— — — сопротивления 63
— — — увлажненности 65
Интегральные микросхемы серии К155 452

К

Кабели, определение мест повреждений 76
Катушки дугогасящие, испытания 93
Комплектные распределительные устройства, испытания и наладка 108
Комплекты измерительные 30
Конденсаторы силовые, испытания 110
Контакторы, неисправности и способы их устранения 210
— проверка 206
Короткозамыкатели, испытания 104

Л

Логические устройства, проверка и испытание 448
— — элементы 449
Люксметры 30

М

Магнитные усилители 282
Масло трансформаторное, испытания 112
Машины электрические, измерение вибрации 268
— — — воздушных зазоров 253
— — — зазора в подшипниках 253
— — — разбега ротора (якоря) в осевом направлении 269
— — — расхода охлаждающего воздуха 269
— — — сопротивления изоляции обмоток 245
— — — — — подшипников 247
— — — — обмоток 251
— — испытания изоляции обмоток 248
— — — на нагревание 265
— — наладка коммутации 270
— — неисправности 258
— — приемо-сдаточные испытания 244
— — пробный пуск 258
— — проверка поверхности коллектора, контактных колец, щеток и нейтрального положения щеток 256
— — — правильности соединения и исправности обмоток 253
— — условия возможности включения без сушки 246
— — характеристики асинхронных электродвигателей 278
— — — машин постоянного тока 270
— — — синхронных машин 275

Н

Наладочные работы, взаимоотношения с заказчиком и смежными строительно-монтажными организациями 39
— — общие требования 37
— — подготовка к выполнению 38
— — порядок выполнения 41
— — проект организации 39
— — сдача-приемка 43
— — указания по технике безопасности 43

О
Определение порядка следования фаз и снятие векторных диаграмм 58
Освещение аварийное, проверка 118
Осциллографы светолучевые 31
— электронно-лучевые 32
Отделители, испытания 104
П
Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, оценка работоспособности 59
Помехи в системах с устройствами УБСР-ДИ 463
Приборы для измерения электрических величин 22
— самопишущие и цифровые 27
Р
Разрядники вентильные, испытания 109
Разъединители, испытания 104
Реакторы масляные, испытания 93
— токоограничивающие, испытания 114
Регистрация электрических процессов 62
Реле времени 146
— газовые 185
— индукционные максимальные 136
— контроля синхронизма 136
— максимального тока электромагнитные 126
— направления мощности 142
— новые 202
— понижения и повышения частоты 175
— промежуточные 153
— тока дифференциальные 127
— — нулевой последовательности 178
— электромагнитные 121
Релейная защита, общие указания 119
— — подготовительные работы 187
— — проверка действия устройств 187
— — проверка качества монтажа 187
С
Сельсины 283
Синхронные двигатели с тиристорным возбуждением 387
— — — частотным регулированием 396
— — — электромашинным возбуждением 386
Системы автоматического регулирования, борьба с помехами 350
— — динамические параметры цепи возбуждения 306
— — — — — — якоря 297
— — наладка 351
— — — определение динамических параметров по переходным характеристикам 310
— — — — — — — частотным характеристикам 313
— — — подчиненного регулирования 319
— — — позиционные 336
— — — регуляторы тока 319
— — — — частоты вращения 321
— — — с обратной связью по напряжению 334
— — — частоты вращения 338
Системы автоматического регулирования, электрической синхронизации 337
— генератор — двигатель 338
— частотного управления асинхронными электроприводами, наладка 357
— — — — — механические характеристики АД 356
— — — — — общие сведения 354
Т
Тахогенераторы 284
Тиристорные преобразователи постоянного тока нереверсивные, наладка
— — — — — силовые схемы 403
— — — — — системы защиты 411
— — — — — — импульсно-фазового управления 408
— — — — реверсивные, общие сведения 416
— — — — — с раздельным управлением 420
— — — — — совместным управлением 417
— — частоты, общие сведения 424
— — — с автономными инверторами напряжения 424
— — — — непосредственной связью 436
Токопроводы, испытания 115
Трансформаторы измерительные, проверка 104
— — технические данные 29
— напряжения, проверка вторичных цепей 188
— силовые, испытания 93
— тока, проверка вторичных цепей 191
У
Унифицированные блочные системы регуляторов 287
Устройства УБСР-ДИ, контрольно-испытательное оборудование 463
— — общие требования к конструкции и монтажу 470
— — основные характеристики 455
— — проверка и настройка 462
Устройство сигнализации замыкания на землю 181
Ф
Фазировка электрических цепей и снятие векторных диаграмм 194
Ш
Шинопроводы, испытания 145
Шунты, технические данные 29
Э
Электрическая энергия, контроль качества 58
Электротехнические материалы, характеристики 12
Электротехнические справочные данные, буквенные обозначения 7
— — — допустимые температуры нагрева токоведущих частей 15
— — — общие 7
— — — расчетные формулы 19
Электроприводы переменного тока, общие вопросы наладки 363
— — — основные обозначения и соотношения 365

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ
ОБЩИЕ СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

А. Общие электротехнические данные

1-1. Обозначения и основные электротехнические зависимости . . . 7
1-2. Характеристики электротехнических материалов 12
1-3. Допустимые температуры нагрева токоведущих частей 15

Б. Аппараты и приборы для наладочных работ

1-4. Общие сведения 18
1-5. Приборы для измерения электрических величин 22
1-6. Приборы самопишущие и цифровые 27
1-7. Гальванометры 28
1-8. Трансформаторы измерительные, шунты, регулировочные автотрансформаторы 29
1-9. Люксметры 30
1-10. Измерительные комплекты . . . 30
1-11. Светолучевые осциллографы . . 31
1-12. Осциллографы электронно-лучевые 32
1-13. Аппараты и приборы разные . . 33
1-14. Аппараты и приборы, разработанные и применяемые организациями Главэлектромонтажа Минмонтажспецстроя СССР 35
Список литературы 37

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ
ОРГАНИЗАЦИЯ НАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

2-1. Общие требования 37
2-2. Подготовка к выполнению работ . 38
2-3. Проект организации наладочных работ 39
2-4. Взаимоотношения с заказчиком и смежными строительно-монтажными организациями 39
2-5. Порядок выполнения работ . . . 43
2-6. Сдача — приемка выполненных наладочных работ 45
2-7. Указания по технике безопасности . 45

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ
ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ

А. Измерение типовых величин и регистрация процессов

3-1. Общие сведения 47
3-2. Измерение напряжения и тока . 48
3-3. Измерение мощности 50
3-4. Измерение электроэнергии . . . 52
3-5. Измерение электрического сопротивления 54
3-6. Измерение емкости и индуктивности 56
3-7. Измерение частоты 57
3-8. Определение порядка следования фаз и снятие векторных диаграмм 58
3-9. Контроль качества электрической энергии 58
3-10. Оценка работоспособности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем 59
3-11. Измерение времени 62
3-12. Регистрация электрических процессов 62

Б. Испытание изоляции

3-13. Измерение сопротивления изоляции мегаомметрами 63
3-14. Определение диэлектрических потерь 64
3-15. Определение увлажненности изоляции 65
3-16. Определение прочности изоляции повышенным напряжением . . . 66

В. Измерение сопротивления заземления

3-17. Измерение сопротивления заземляющих проводников 70
3-18. Измерение сопротивления заземлителей 70
3-19. Измерение удельного сопротивления грунта 73
3-20. Измерение сопротивления петли фаза — нуль 74

Г. Определение повреждений кабельных линий

3-21. Прожигание поврежденных мест изоляции кабеля 76
3-22. Методы определения повреждений в кабельных линиях 78
Список литературы 85

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ
ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

4-1. Испытания и наладка масляных выключателей и приводов к ним . 86
4-2. Испытания и наладка воздушных выключателей 89
4-3. Испытания силовых трансформаторов, автотрансформаторов, дугогасящих катушек и масляных реакторов 93
4-4. Испытания разъединителей, отделителей и короткозамыкателей . 104

4-5. Проверка измерительных трансформаторов 104
4-6. Испытания и наладка комплектных распределительных устройств (КРУ) напряжением выше 1000 В 108
4-7. Испытания вентильных разрядников 109
4-8. Испытания силовых бумажно-масляных конденсаторов 110
4-9. Проверка и испытания аккумуляторных батарей 112
4-10. Испытания трансформаторного масла 112
4-11. Испытания сухих токоограничивающих реакторов 114
4-12. Испытания вводов и изоляторов . 114
4-13. Испытания комплектных экранированных токопроводов и шинопроводов 115
4-14. Проверка автоматических выключателей серии «Электрон» . . . 116
4-15. Проверка схем аварийного освещения и аварийной вентиляции . 118
Список литературы 118

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

А. Проверка и регулировка приборов и устройств релейной защиты

5-1. Общие указания 119
5-2. Реле электромагнитные РТ-40 и РН-50 121
5-3. Реле электромагнитные максимального тока РТ-40/Р и РТ-40/1Д . 126
5-4. Реле тока дифференциальные РНТ-565—РНТ-567, ДЗТ-11 и дифференциальная защита ДЗТ-21 . 127
5-5. Реле контроля синхронизма РН-55 136
5-6. Индукционные максимальные реле тока серий РТ-80 и РТ-90 . . . 136
5-7. Реле направления мощности РБМ-170 и РБМ-270 142
5-8. Реле времени РВ-01 146
5-9. Реле времени серий ЭВ-100, ЭВ-200 и РВ-100, РВ-200 . . . 148
5-10. Реле времени РВМ-12 и РВМ-13 . 151
5-11. Реле промежуточные 153
5-12. Блоки питания БПТ-1002 и БПН-1002 156
5-13. Блоки питания стабилизированного напряжения БПНС-2 . . . 163
5-14. Блоки питания и заряда БПЗ-401, БПЗ-402 и блоки конденсаторов БК-400 167
5-15. Блоки питания серии БП-11 . . 172
5-16. Реле понижения частоты РЧ-1 и реле повышения частоты РЧ-2 . 175
5-17. Реле тока нулевой последовательности РТЗ-51 и РТЗ-50 . . . 178
5-18. Устройство сигнализации замыкания на землю УСЗ-2/2 181
5-19. Защита при однофазных замыканиях на землю ЗЗП-1 182
5-20. Реле газовое РГЧЗ-66 185

Б. Проверка и наладка устройств релейной защиты

5-21. Подготовительные работы, проверка качества монтажа, испытания изоляции, проверка действия устройств 187
5-22. Проверка вторичных цепей трансформаторов напряжения . . . 188
5-23. Проверка вторичных цепей трансформаторов тока 191
5-24. Фазировка электрических цепей и снятие векторных диаграмм . . 194
5-25. Проверка максимальной токовой защиты от однофазных замыканий на землю 194
5-26. Проверка направленности защит . 195
5-27. Проверка дифференциальных защит 199
5-28. Новые реле 202
Список литературы 204

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

АППАРАТЫ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

А. Общие указания по проверке

6-1. Проверка сопротивления изоляции 204
6-2. Измерение сопротивления катушек постоянному току 205
6-3. Испытание электрической прочности изоляции 205
6-4. Проверка контактной системы . . 205
6-5. Определение параметров срабатывания аппаратов 206

Б. Контакторы

6-6. Проверка контакторов 206
6-7. Наиболее характерные неисправности и способы их устранения . . 210

В. Аппаратура управления и защиты . . . . . .

6-8. Проверка и регулировка электромагнитных реле 210
6-9. Проверка и регулировка тепловых реле 214

Г. Автоматические выключатели переменного тока

6-10. Автоматические выключатели серии АВМ 215
6-11. Наладка автоматических выключателей серии АВМ 218
6-12. Автоматические выключатели серии А-3700 222
6-13. Проверка и настройка автоматических выключателей серии А-3700 . 225
6-14. Автоматические выключатели серии А-3100 227
6-15. Автоматические выключатели типа АП-50 227
6-16. Автоматические выключатели серии АЕ-2000 228
6-17. Проверка и испытание выключателей серий А-3100, АЕ-2000 и типа АП-50 229
6-18. Основные технические данные автоматических выключателей серии «Электрон» 231
6-19. Проверка максимальной токовой защиты автоматических выключателей серии «Электрон» . . . 234

Д. Автоматические выключатели быстродействующие постоянного тока

6-20. Выключатели серий ВАБ-42 и ВАТ-42 236

6-21. Выключатели серии ВАБ-43 . . 239
6-22. Методы проверки и настройки быстродействующих выключателей постоянного тока 241
6-23. Особенности регулировки и наладки выключателей серий ВАБ-42 и ВАТ-42 243
6-24. Особенности регулировки и наладки выключателей серии ВАБ-43 . 243
Список литературы 244

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

7-1. Объем приемо-сдаточных испытаний 244
7-2. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками 245
7-3. Определение возможности включения электрических машин без сушки 246
7-4. Измерение сопротивления изоляции подшипников электрических машин 247
7-5. Испытание изоляции обмоток повышенным напряжением промышленной частоты и повышенным выпрямленным напряжением . . 248
7-6. Измерение сопротивления обмоток постоянному току 251
7-7. Измерение воздушных зазоров . 253
7-8. Измерение зазора в подшипниках 253
7-9. Проверка правильности соединений и исправности обмоток . . 253
7-10. Проверка поверхности коллектора, контактных колец, щеток и нейтрального положения щеток машин постоянного тока 256
7-11. Пробный пуск, проверка работы при холостом ходе 258
7-12. Возможные неисправности электрических машин 258
7-13. Испытание на нагревание . . . 265
7-14. Измерение вибрации электрических машин 268
7-15. Измерение расхода охлаждающего воздуха 269
7-16. Измерение разбега ротора (якоря) в осевом направлении 269
7-17. Наладка коммутации машин постоянного тока 270
7-18. Определение характеристик машин постоянного тока 274
7-19. Характеристики синхронных машин 275
7-20. Определение характеристик асинхронных электродвигателей . . 278
Список литературы 281

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. Элементы систем регулирования

8-1. Магнитные усилители 282
8-2. Сельсины 283
8-3. Тахогенераторы 284
8-4. Унифицированные блочные системы регуляторов (УБСР) . . . 287

Б. Определение динамических параметров

8-5. Определение динамических параметров якорной цепи 297
8-6. Определение динамических параметров цепи возбуждения . . 306
8-7. Определение динамических параметров по переходным характеристикам 310
8-8. Определение динамических параметров электропривода по частотным характеристикам . . . 313

В. Системы регулирования

8-9. Общие принципы построения систем подчиненного регулирования 316
8-10. Настройка регуляторов тока и частоты вращения двигателей электропривода постоянного тока . 319
8-11. Влияние способа управления реверсивным преобразователем на динамику электропривода . . 326
8-12. Настройка систем регулирования с обратной связью по напряжению 334
8-13. Особенности настройки П- и ПИ-регуляторов частоты вращения двигателя нереверсивного электропривода 336
8-14. Настройка позиционных систем . 336
8-15. Настройка системы электрической синхронизации взаимного положения двух электроприводов . . 337
8-16. Настройка контурных регуляторов в системе генератор — двигатель 338
8-17. Системы регулирования частоты вращения с изменением потока возбуждения 338
8-18. Борьба с помехами в системах регулирования 350
8-19. Рекомендации по приборам и спецустройствам для наладки систем регулирования 351
Список литературы 353

РАЗДЕЛ ДЕВЯТЫЙ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

9-1. Общие сведения 354
9-2. Механические характеристики АД при различных законах частотного управления 356
9-3. Наладка систем управления, разомкнутых по скорости . . . 357
Список литературы 362

РАЗДЕЛ ДЕСЯТЫЙ

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. Общие вопросы наладки электроприводов переменного тока

10-1. Программа и методики наладки электроприводов с релейно-контакторным управлением 363

10-2. Основные обозначения и соотношения для электроприводов переменного тока 365

Б. Наладка электроприводов с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором

10-3. Электроприводы с релейно-контакторным управлением . . . 369
10-4. Электроприводы с фазным управлением 370
10-5. Электроприводы с частотным регулированием, ориентированным по полю 372

В. Наладка электроприводов с асинхронным двигателем с фазным ротором

10-6. Электроприводы с релейно-контакторным управлением 377
10-7. Асинхронные вентильные каскады 378
10-8. Электроприводы с машиной двойного питания 380

Г. Наладка электроприводов с синхронными двигателями

10-9. Электроприводы с электромашинным возбуждением 386
10-10. Электроприводы с тиристорным возбуждением 387
10-11. Электроприводы с частотным регулированием 396
Список литературы 401

РАЗДЕЛ ОДИННАДЦАТЫЙ

УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

А. Нереверсивные тиристорные преобразователи постоянного тока

11-1. Силовые управляемые полупроводниковые вентили (тиристоры) . 402
11-2. Силовые схемы 403
11-3. Системы импульсно-фазового управления 408
11-4. Системы защиты 411
11-5. Наладка преобразователей . . 412

Б. Реверсивные тиристорные преобразователи постоянного тока

11-6. Общие сведения 416
11-7. Наладка реверсивных тиристорных преобразователей с совместным управлением 417
11-8. Наладка реверсивных тиристорных преобразователей с раздельным управлением 420

В. Тиристорные преобразователи частоты

11-9. Общие сведения 424
11-10. Наладка тиристорных преобразователей частоты с автономными инверторами напряжения . . 424
11-11. Наладка тиристорных преобразователей частоты с непосредственной связью 436
Список литературы 447

РАЗДЕЛ ДВЕНАДЦАТЫЙ

БЕСКОНТАКТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А. Основы наладки

12-1. Особенности наладки бесконтактных систем управления . . . 447
12-2. Основные виды проверок и испытаний логических устройств . . . 448

Б. Технические особенности и проверка БСУ с элементами Логика-Т

12-3. Технические особенности элементов Логика-Т 449
12-4. Проверка бесконтактных систем управления, построенных на элементах Логика-Т 450
12-5. Аппаратура для проверки логических схем с элементами Логика-Т 451

В. Методика наладки устройств УБСР-ДИ

12-6. Особенности применения ИМС серии К 155 452
12-7. Основные характеристики комплекса УБСР-ДИ 459
12-8. Проверка и настройка устройств УБСР-ДИ 462
12-9. Контрольно-испытательное оборудование УБСР-ДИ 463
12-10. Помехи в системах с устройствами УБСР-ДИ. Методы обеспечения помехоустойчивости . . 467
12-11. Общие требования к конструкции и монтажу устройств УБСР-ДИ 470
Список литературы 474
Предметный указатель 475