

А.Д. Никулин, Л.С. Родштейн, В.Г. Сальников, В.А. Бобков

**Тиристорная преобразовательная техника в цветной металлургии/Никулин А.Д., Родштейн Л.С., Сальников В.Г., Бобков В.А. М.: Металлургия (Экономика топлива и электроэнергии), 1983. 128 с.**

Описаны новые разработки устройств тиристорной преобразовательной техники для цветной металлургии, выпускаемых производственными объединениями Министерства цветной металлургии СССР. Обосновывается экономическая эффективность применения тиристорных преобразователей для электроприводов различных технологических установок и электролиза цветных металлов. Особое внимание уделено вопросам обеспечения надежной и экономичной работы силовой тиристорной техники в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии.

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий, проектных, научно-исследовательских организаций и конструкторских бюро, занимающихся проектированием и эксплуатацией тиристорной преобразовательной техники для цветной металлургии и систем электроснабжения. Ил. 78. Табл. 10. Библиогр. список: 40 назв.



Т 2601000000 - 158 84--83  
040(01) - 83

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
От авторов . . . . .	8
<b>Глава I. Техничко-экономические преимущества внедрения силовой тиристорной техники в цветной металлургии . . . . .</b>	<b>10</b>
1. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электролиза цветных металлов. . . .	10
2. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электроприводов переменного тока. . . .	12
3. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока. . . .	16
4. Убытки, обусловленные влиянием тиристорных преобразователей на качество электрической энергии в системах электроснабжения. . . . .	19
<b>Глава II. Применение тиристорных преобразователей для электролизных установок. . . . .</b>	<b>23</b>
1. Режимы работы полупроводниковых выпрямительных агрегатов питания серий электролизеров стационарными токами . . . .	23
2. Автоматизированные тиристорные системы для электролиза цветных металлов нестационарными токами . . . . .	28
3. Влияние длительности фронтов импульсов тока на технико-экономические показатели работы электролизеров в реверсивном режиме. . . . .	40
4. Рекомендации по ошиновке тиристорных преобразователей . . . .	43
5. Показатели качества электрической энергии в системах электроснабжения действующих предприятий с мощными преобразовательными агрегатами . . . . .	49
6. О резонансе тока в системах электроснабжения переменного тока серий электролизеров цветных металлов . . . . .	54
<b>Глава III. Тиристорные преобразователи для модернизации электроприводов постоянного тока действующего технологического оборудования . . . . .</b>	<b>58</b>
1. Автоматизированные тиристорные преобразовательные системы для модернизации электроприводов прокатного оборудования цветной металлургии . . . . .	58
2. Тиристорный электропривод экскаваторов . . . . .	64
3. Тиристорный электропривод станков шарошечного бурения . . . .	67
4. Модернизация электроприводов карусельных разливочных машин . . . . .	69
<b>Глава IV. Применение тиристорных преобразователей для электроприводов переменного тока в системах автоматического регулирования технологическими механизмами цветной металлургии . . . . .</b>	<b>71</b>
1. Асинхронный электропривод с частотным управлением для технологических механизмов. . . . .	71
2. Асинхронный электропривод по схеме вентильного каскада . . . .	80
3. Тиристорные возбудители синхронных двигателей технологических установок . . . . .	88
<b>Глава V. Обеспечение надежной и экономичной работы тиристорных преобразователей и других электроустановок предприятий цветной металлургии . . . . .</b>	<b>98</b>
1. Особенности систем электроснабжения преобразовательных подстанций . . . . .	98
2. Проверка дальнейшей пригодности действующих систем электроснабжения при реконструкции электролизных производств . . . .	101

3. Координация уровней токов однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения при несинусоидальном напряжении . . . . .	107
4. Выбор оптимальной структуры системы электроснабжения мощных серий электролизеров цветных металлов . . . . .	118
5. Требования к трансформаторному оборудованию силовых тиристорных агрегатов для цветной металлургии . . . . .	123
Библиографический список . . . . .	124

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

БДК	— блок динамический компенсации
В	— выключатель
ВК	— выходной каскад . . . . .
Вп	— выпрямитель
Vi	— вентиль
ГНО	— гистерезисный нуль-орган
Д	— диод
ДН	— датчик напряжения . . . . .
ДНТ	— датчик нулевого значения тока
Др	— дроссель
ДТ	— датчик тока
ДТВ	— датчик тока возбуждения
ДТЯ	— датчик тока якоря
ДТi	— индуктивный делитель тока
Ди	— дроссель насыщения
ДЭ	— датчик э.д.с.
ЗИ	— задатчик интенсивности
ЗС	— задатчик скорости
ЗТС	— устройство задержки токовой связи
ЗУ	— задающее устройство
И	— схема совпадения
ИЗУ	— интегрально-запоминающее устройство
Ип	— инвертор, ведомый сетью
К	— бесконтактный ключ
КА	— силовой коммутационный контактор
Л	— тиратрон
ЛПУ	— логическое переключающее устройство
М	— множительное устройство
МУ	— магнитный усилитель
НЭ	— нелинейный элемент
ОВ	— обмотка возбуждения
П	— предохранитель
ПВУ	— пороговый элемент верхнего уровня
ПНУ	— пороговый элемент нижнего уровня
ПП	— преобразовательная подстанция
ПУ	— пульт управления
Р	— разъединитель
РВ	— реле времени
РП	— распределительная подстанция
РПН	— переключатель ответвлений обмоток силового трансформатора под нагрузкой
РС	— регулятор скорости
РС	— разрядное сопротивление
РТ	— регулятор тока
РТВ	— регулятор тока возбуждения
РЭ	— регулятор э.д.с.
САР	— система автоматического регулирования
СД	— синхронный двигатель
СЗ	— система защиты
СИФУ	— система импульсно-фазового управления
СМУ	— суммирующий магнитный усилитель
СПИ	— система передачи информации
СПУС	— система передачи управляющих сигналов
СУ	— система управления
СУВ	— секция управляемых неререверсивных выпрямителей



СУВР	— секция управляемых реверсивных выпрямителей
СУК	— система управления силовой коммутационной аппаратурой
Сф	— конденсатор фильтра
Сч	— счетчик импульсов
ТГ	— тахогенератор
ТН	— трансформатор напряжения
ТОР	— токоограничивающий реактор
ТПВ	— тиристорный преобразователь цепи возбуждения
ТПЯ	— тиристорный преобразователь якорной цепи
Тр	— трансформатор
ТТ	— трансформатор тока
У	— усилитель операционный
УДТ	— устройство динамического торможения
УЗП	— устройство защиты от перенапряжений
УМ	— усилитель мощности
УПТ	— усилитель операционный постоянного тока
УСВ	— устройство стабилизированного напряжения
УУ	— устройство управления
ФА	— устройство, формирующее амплитуды импульсов тока
ФД	— устройство, формирующее длительность импульсов тока
ФИ	— устройство, формирующее импульсы тока
ФСУ	— фазосмещающее устройство
Шн	— шунт
ЭС	— элемент сравнения
ЯЗ	— ячейка защиты
ЯИ	— ячейка измерительная
ЯПУ	— ячейка пуска и управления
ЯР	— ячейка регулирования
ЯТО	— ячейка токовой отсечки
ЯУ	— ячейка управления
Ld	— индуктивное сопротивление в цепи постоянного тока
В	— резистор

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Цветная металлургия — одна из ведущих отраслей тяжелой промышленности, определяющей темпы развития и технический прогресс всего народного хозяйства страны.

Процессы добычи и переработки руд и производства цветных металлов характеризуются значительными затратами электрической энергии. В 1980 г. расход электрической энергии в отрасли составил 15 % от потребленной всей промышленностью. Мощными приемниками электрической энергии являются преобразовательные установки, значительное количество электрической энергии потребляется на постоянном токе.

В одиннадцатой пятилетке планом развития цветной металлургии предусмотрено дальнейшее увеличение выпуска цветных металлов, повышение производительности труда и уменьшение удельных норм расхода электрической энергии. Выполнение этих задач будет осуществляться путем применения новой техники и передовой технологии на основе широкого внедрения автоматизации производственных процессов.

В промышленной электроэнергетике наиболее перспективным направлением внедрения новой техники является применение тиристорных преобразователей для электролизеров цветных металлов и регулируемого электропривода постоянного и переменного тока. Для успешной разработки и внедрения новых образцов тиристорных преобразователей в отрасли созданы специализированные производственные объединения, которыми накоплен значительный положительный опыт работы.

Однако широкое внедрение преобразовательной техники приводит к значительному искажению кривых тока и напряжения в системах электроснабжения. Несинусоидальность формы напряжения вызывает: интенсивный отказ конденсаторов, применяемых для компенсации реактивной мощности; нарушение нормальной работы релейной защиты и автоматики; снижение коэффициента мощности и увеличение потерь электрической энергии в системе электроснабжения; увеличение в 2—3 раза тока замыкания на землю в системах электроснабжения с изолированной нейтралью против расчетного тока замыкания на землю при синусоидальном напряжении и из-за этого снижение надежности системы электроснабжения, обусловленное увеличением случаев короткого замыкания. В связи с этим вопросы внедрения тиристорных преобразователей необходимо комплексно решать с вопросами развития систем электроснабжения.

В настоящее время отсутствует литература, в которой были бы описаны тиристорные преобразователи для установок цветной металлургии и обобщен опыт их внедрения. Данная книга будет способствовать быстрейшему внедрению в производство этой новой техники с экономическим эффектом более 50 млн. руб в год. В книге обобщен опыт внедрения силовой тиристорной техники в отрасли, показана технико-экономическая эффективность, описаны в основном те технические особенности тиристорных преобразователей, значение которых необходимо при разработке и внедрении силовой тиристорной техники.

*О.Н. Багров*

Одним из направлений решения актуальной народнохозяйственной проблемы 80-х годов и одиннадцатой пятилетки — вывести все отрасли народного хозяйства на передовые рубежи науки и техники, выдвинутой на XXVI съезде КПСС, является техническое перевооружение отраслей народного хозяйства на базе модернизации и реконструкции производственных фондов, внедрения высокопроизводительного, автоматизированного оборудования. "Многолетний опыт работы цветной металлургии свидетельствует о том, что выполнение государственных планов выпуска основной продукции невозможно без постоянного совершенствования промышленной энергетики"<sup>1</sup>. Перспективное направление развития промышленной электроэнергетики — внедрение надежной и экономичной полупроводниковой техники.

Внедрение тиристорных агрегатов питания серий электролизеров цветных металлов позволяет наряду с традиционными методами ведения электролиза на постоянном токе применять режимы, связанные с использованием токов сложной формы, периодическими изменениями постоянного тока и пр. Основное преимущество таких режимов состоит в том, что интенсификация процессов и высокое качество продукции достигаются не изменением состава электролита, физико-химических условий электролиза или конструкций электролизеров, а выбором параметров электрического тока [1]. Применение автоматизированного тиристорного электропривода постоянного и переменного тока дает значительный экономический эффект, который обуславливается более высокой экономичностью, надежностью и быстродействием по сравнению с системой генератор — двигатель и другими электроприводами. Тиристорный электропривод полнее отвечает требованиям, предъявляемым к электроприводам автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП), позволяет значительно сократить (например, при производстве глинозема) количество технологических датчиков в АСУ ТП, повысить точность регулирования и пр. [2]. "Внедрение автоматизированных систем управления электролизом алюминия, производством глинозема, соды, цемента, серной кислоты, работой драг и прокатных станов позволило поднять эффективность производства и качество работ, а также увеличить объем выпускаемой продукции, сэкономить сотни миллионов киловатт-часов электроэнергии"<sup>1</sup>.

Между тем опыт внедрения тиристорной преобразовательной техники показывает, что эффективность ее применения зависит не только от технико-экономических показателей преобразователей, но и от их "электромагнитной совместимости" с системой электроснабжения. Подключение мощных тиристорных преобразователей к действующим системам электроснабжения вызывает нарушение синусоидальной формы напряжения и понижение других показателей качества электрической энергии, установ-

<sup>1</sup> Лемаско Н. К. *Электротехника*, 1980, № 18, с. 39-48

ленных ГОСТ 13109—67. Из-за этого область применения тиристорных преобразователей значительно сокращается.

В связи с изложенным при внедрении тиристорной преобразовательной техники на предприятиях необходимо достоверно представлять воздействие преобразователей на качество электрической энергии и в зависимости от показателей качества предусматривать необходимую реконструкцию системы электроснабжения.

В книге рассмотрен тот материал, знание которого необходимо при разработке мероприятий по внедрению тиристорной преобразовательной техники.

Авторы выражают благодарность А.В. Дубровину за ряд ценных советов, данных при рецензировании рукописи.

Гл. I, разд. 1—3; гл. II, разд. 2; гл. III и гл. IV, разд. 1, 2 написаны А.Д. Никулиным, Л.С. Родштейном, В.Г. Сальниковым, В.А. Бобковым, гл. I, разд. 4; гл. II, разд. 1, 3—6; гл. IV, разд. 3 и гл. V — В.Г. Сальниковым.

Авторы с признательностью примут критические замечания и пожелания читателей по содержанию книги.

# Глава I. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ СИЛОВОЙ ТИРИСТОРНОЙ ТЕХНИКИ В ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

## 1. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электролиза цветных металлов

Автоматизированные преобразовательные тиристорные системы (САПТ) для электролиза цветных металлов имеют высокий к.п.д., равный 0,96—0,98 (выше на 8—14 %, чем у мотор-генераторов, на 4—6 %, чем у ртутных выпрямителей, и на 1—2 %, чем у полупроводниковых выпрямительных агрегатов); малые габариты; большую компактность — на 1 кВт преобразованной мощности приходится 1—2 кг массы оборудования (для мотор-генераторов 15—30 кг, ртутных выпрямителей 2—5 кг); высокую надежность, долговечность; простоту устройства и обслуживания; постоянную готовность к работе, высокую автоматизационную способность; безынерционность, отсутствие вращающихся частей.

Мощная серия электролизеров алюминия потребляет в год свыше 1 млрд. кВт·ч электроэнергии. Повышение к.п.д. преобразовательных агрегатов на 1,5 % сокращает потери электроэнергии более чем на 20 млн. кВт·ч в год, что в денежном выражении составляет свыше 100 тыс. руб.

Замена ртутных выпрямителей и мотор-генераторов полупроводниковыми выпрямительными агрегатами позволила сократить расход электроэнергии на 1 т алюминия на 2000 кВт·ч. Внедрение САПТ позволяет снизить удельный расход электроэнергии в дальнейшем еще примерно на 1000 кВт·ч. Техничко-экономическое сравнение преобразовательных подстанций серии электролизеров алюминия на 150 кА, оснащенных ртутными, полупроводниковыми и тиристорными преобразовательными агрегатами, приведено в табл. 1.

Малые габариты, большая компактность тиристорных преобразователей позволяют сократить объем вновь строящихся преобразовательных подстанций. Удельный объем здания преобразовательной подстанции с тиристорными преобразовательными агрегатами составляет 0,02—0,05, а с ртутными выпрямителями 0,11—0,15 м<sup>3</sup>/кВт.

Сокращение числа выпрямительных агрегатов на преобразовательных подстанциях позволяет осуществить групповое управление подстанциями, уменьшить численность оперативного персонала на 40—60 %. Затраты на централизованное управление окупаются за 1,5 года. Эксплуатационные расходы на 1000 кВт·ч электроэнергии, полученной алюминиевым заводом, сокращаются на 15 %.

Применение САПТ позволяет эффективнее, чем при использовании других источников тока, осуществить нестационарные режимы работы серий электролизеров цветных металлов. Они заключаются в повышении плотности тока электролиза в сочетании с реверсированием или прерыванием постоянного тока и стабилизацией электрических параметров. Неста-

**Т а б л и ц а 1. Техничко-экономическое сравнение преобразовательных подстанций, оснащенных ртутными РПП, полупроводниковыми ППП и тиристорными преобразовательными агрегатами ТПП**

Параметр	РПП	ППП	ТПП
Максимальная сила тока, кА . . . . .	200	200	200
Рабочая сила тока, кА . . . . .	150	150	150
Выпрямленное напряжение, В . . . . .	850	850	850
Рабочее напряжение, В . . . . .	800	800	850
Установленная мощность на постоянном токе, кВт . . . . .	170000	170000	170000
Типы агрегатов . . . . .	ТДРК-25600/ВАК-25000/850/10х4хЭВИУ-500/ 2,5х12		САПТ -50000/850-т-3-У4
Число агрегатов, шт. . . . .	10	8	4
К.п.д. подстанции с учетом расхода на собственные нужды, % . . . . .	94,5	97,5	98
Расход воды на охлаждение РВ, тыс. м <sup>3</sup> /год. . . . .	1430	—	—
Годовые потери энергии на преобразование, тыс. кВт·ч. . . . .	61180	26930	18990
Годовые затраты на содержание эксплуатационного и ремонтного персонала, тыс. руб. . . . .	60	30	21
Капитальные затраты на сооружение подстанции с учетом транспортных расходов и монтажа, тыс. руб. . . . .	2200	2400	1900
В том числе:			
строительная часть . . . . .	375	300	240
затраты на текущий ремонт. . . . .	66	24	14

ционные режимы работы серий электролизеров способствуют уменьшению отрицательных явлений, сопутствующих повышению плотности тока (снижение качества катодного осадка, потеря благородных металлов, пассивация анодов, рост расхода электроэнергии).

Наиболее эффективны в лабораторных, опытно-промышленных и промышленных условиях нестационарные режимы серий электролизеров меди, никеля, цинка, кадмия.

Техничко-экономический эффект от применения САПТ при нестационарных режимах электролиза цветных металлов может быть получен за счет одного из следующих факторов либо их совокупности: повышения производительности электролизеров без ухудшения качества катодного металла; сокращения продолжительности осаждения металла между съемами катодного осадка, средняя толщина которого уменьшена; увеличения продолжительности времени между съемом катодного металла с увеличением толщины без ухудшения качества его поверхности и структуры; сокращения относительного удельного расхода электроэнергии; сокращения удельных эксплуатационных расходов; снижения оборотных фондов; снижения капитальных вложений.

На медьэлектролитном заводе "Джеймс Бридж" (Англия) электро-рафинирование меди ведут при высокой плотности реверсивного тока,

равной 350 А/м<sup>2</sup>. Повышение плотности тока в совокупности с его реверсированием позволило увеличить производительность цеха от 34 до 56 тыс. т металла в год, снизить срок растворения анодов и наращивания катодов, который соответственно составляет 14 и 7 суток. Состав катодной меди не ухудшился [3].

В медеелектролитном цехе комбината им. Г. Дамянова (НРБ) применяют периодическое реверсирование постоянного тока при плотности тока 350–400 А/м<sup>2</sup>. Содержание благородных металлов в катодной меди не превышает их содержания при электрорафинировании меди с плотностью тока 210 А/м<sup>2</sup>. Производительность цеха возросла на 30–40 %.

На заводе "Муфулира" (Замбия) при электрорафинировании меди реверсивным током и плотности тока 200 А/м<sup>2</sup> число коротких замыканий уменьшилось на 50 %; снизилось также содержание примесей в катодах.

В отечественной цветной металлургии нестационарные режимы работы серии электролизеров успешно применяют на комбинате "Уралэлектромедь", Лениногорском цинковом заводе, Челябинском электролитном цинковом заводе и других предприятиях. Подтверждена технико-экономическая целесообразность внедрения тиристорных агрегатов для электролиза цветных металлов нестационарными токами. Экономический эффект достигает 200–400 тыс. руб. в год на один агрегат при электролизе цинка и меди. Срок окупаемости составляет менее одного года [3].

Применение САПТ повышает технико-экономические показатели работы серий электролизеров кадмия, висмута и других цветных металлов, работающих в стационарных режимах. Благодаря стабилизации тока повышаются производительность, коэффициент извлечения металла из раствора, выход по току, качество металла. Экономический эффект от внедрения одного тиристорного агрегата при электролизе кадмия составляет 20 тыс. руб в год, срок окупаемости — менее 2 лет [3].

## **2. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электроприводов переменного тока**

Повышение производительности труда и качества продукции на предприятиях цветной металлургии возможно только при широком и эффективном применении АСУ ТП. Большая роль в решении этой задачи отводится автоматизированному электроприводу как основному элементу автоматизации технологических процессов.

Наиболее распространенный электропривод — асинхронный, обладающий рядом значительных преимуществ (надежность, простота конструкции и обслуживания, небольшая масса и стоимость, повышенная устойчивость к окружающей среде) по сравнению с машиной постоянного тока. В основном это асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, десятки тысяч штук которых установлены на предприятиях отрасли, и асинхронные двигатели с фазным ротором. Нерегулируемые приводы большинства технологических механизмов ограничивают возможности оптимизации технологического процесса. Применение различных механических регуляторов малоэффективно из-за низкой надежности, нестабиль-

**Т а б л и ц а 2. Стоимость двигателей и преобразователей  
в зависимости от мощности, руб.**

Показатель.	Тип преобразователя					
	ТПЧ-1А	АГ-100/460-2	ПТЦ-2-22-50	ТПЧ-40	АГ-100/460-2	ПТЦ-2-12-160
	10 кВт				27 кВт	
Двигатель	56	183	183	106	472	472
Преобразо- ватель	2580	2900	2758	3785	2900	5309
Наладоч- ные рабо- ты	1000	1000	1000	1000	1000	1000
И т о г о	3636	4083	3941	4891	4372	6781

Показатель	Тип преобразователя					
	ТПЧ-63	АГ-200/460-2	ПТЦ-2-12-320	ТПЧ-100	АГ-200/460-2	ПТЦ-2-12-320
	45 кВт				75 кВт	
Двигатель	180	630	630	300	724	724
Преобразо- ватель	5400	6000	6532	7000	6000	6532
Наладоч- ные рабо- ты	1000	1000	1000	1000	1000	1000
И т о г о	6580	7630	8162	8300	7724	8256

ности характеристик и трудностей включения в автоматизированную систему. Поэтому модернизация таких систем — одно из основных средств повышения производительности и качества продукции.

С выпуском преобразователей частоты типа ТПЧ различной мощности для управления асинхронными двигателями с короткозамкнутыми роторами ~~создались~~ условия для широкого внедрения асинхронного электропривода с частотным управлением на предприятиях цветной металлургии.

Производственное объединение "Уралэнергоцветмет" совместно с Уральским политехническим институтом им. С.М. Кирова и Павлодарским индустриальным институтом провели промышленные испытания на предприятиях цветной металлургии частотного электропривода с преобразователем ТПЧ на различных механизмах. В результате выявлен ряд технологических особенностей, которые обуславливают требования, предъявляемые к частотному электроприводу. Это вызвало необходимость проведения разработки дополнительных блоков и устройств и их исследование. Разработанные устройства позволили прежде всего расширить область применения частотного асинхронного электропривода на базе преобразователей типа ТПЧ для многих механизмов цветной металлургии, а также повысить их надежность.

Дополнительные капитальные затраты при внедрении регулируемого электропривода складываются из стоимости двигателя и преобразователя, а также стоимости наладочных работ. Учет стоимости двигателя при модернизации существующего асинхронного привода с применением ТПЧ



обуславливается тем, что с уменьшением скорости вращения асинхронного двигателя с самовентиляцией ухудшаются условия его охлаждения. Поэтому мощность двигателя с самовентиляцией при частотном управлении должна быть больше мощности нерегулируемого электропривода.

Величина завышения мощности зависит от диапазона регулирования скорости и от характера нагрузки механизма. Для приводов с постоянным моментом сопротивления (например, конвейерных питателей) мощность двигателя может завышаться до 30 %, а для приводов с вентиляторным характером нагрузки (например, центробежных насосов) может быть использован существующий двигатель.

Целесообразно также провести экономическое сравнение по стоимости тиристорного электропривода постоянного тока и асинхронного частотно-управляемого на базе преобразователя типа ТПЧ (табл. 2). Сравнение производят по максимальной мощности двигателя, который может работать от преобразователя типа ТПЧ, и ближайших больших по мощности тиристорных преобразователей постоянного тока, выпускаемых производственным объединением "Уралэнергоцветмет" (типа ПТЦ) и Запорожским объединением "Преобразователь" (типа АТ) [4].

Как видно из табл. 2, дополнительные капитальные затраты при введении регулируемого тиристорного электропривода на переменном и постоянном токе различаются незначительно. Поэтому при выборе привода при модернизации необходимо учитывать прежде всего условия окружающей среды, в которой работает приводной двигатель, а также другие технические особенности, предъявляемые к электродвигателю на данном предприятии.

В большинстве случаев на предприятиях цветной металлургии область применения привода на постоянном токе ограничена условиями окружающей среды. Так, для технологических механизмов обогатительных фабрик и металлургического производства они характеризуются повышенной влажностью, запыленностью (различные конвейеры), наличием агрессивной среды (насосы подачи кислоты в автоклавы) и пр. Замена короткозамкнутого асинхронного двигателя двигателем постоянного тока в этих условиях значительно снижает надежность электропривода и, следовательно, вызывает снижение производительности и увеличение эксплуатационных расходов.

Наиболее полно экономический эффект от внедрения частотно-управляемого электропривода может быть получен при его работе в системе автоматического регулирования, которая контролирует один или несколько параметров технологического механизма (например, производительность, качество продукции, минимальный расход ценного сырья и т.д.). Для большинства механизмов цветной металлургии требуются системы с автоматической стабилизацией выходных параметров при различных изменениях технологического режима.

Рассмотрим экономическую эффективность от применения асинхронного электропривода с частотным управлением на ряде предприятий. Внедрение частотно-регулируемых приводов на ступителях на Башкирском медно-серном комбинате дало годовой экономический эффект

1888 руб. на один сгуститель. Экономия объясняется уменьшением перехода сернистого натрия и улучшением качества цинкового концентрата. Капиталовложения окупились менее чем за год.

На Иртышском химико-металлургическом заводе внедрение частотно-электродного электропривода подачи электронно-лучевой печи СМО-200 дало экономию 12 тыс. руб в год. Экономическая эффективность при модернизации получена благодаря улучшению качества и снижению брака по химическому составу слитков [4].

На Павлодарском алюминиевом заводе внедрение асинхронного электропривода с частотным управлением на дисковом вакуум-фильтре ДУ-100 позволило повысить производительность и провести серию испытаний различных материалов, используемых в качестве фильтровального полотна, с целью определения их эффективности. Внедрение такого привода на пылесосах соды интенсифицировало процесс приготовления пульпы и дало годовой экономический эффект от модернизации одного электропривода 11 тыс. руб. [4].

Анализ экономической эффективности, полученной от внедрения асинхронного электропривода с частотным управлением на ряде механизмов, подтверждает его целесообразность.

На предприятиях цветной металлургии имеется также большое число технологических механизмов (насосы, вращающиеся печи и др.), электроприводами которых являются асинхронные двигатели с фазным ротором. Для обеспечения качественной продукции и максимальной производительности требуется регулирование частоты вращения. Производственное объединение "Уралэнергоцветмет" выпускает преобразователи типа ПТ АВК для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с фазным ротором по схеме асинхронного вентильного каскада (АВК) от источника постоянного тока. По регулировочным свойствам АВК с учетом требований, предъявляемых к данному электроприводу, не уступает приводам постоянного тока с тиристорным управлением. Наряду с этим он обладает рядом преимуществ, которые объясняются применением в схеме АНД асинхронного двигателя с фазным ротором, а также меньшей стоимостью статического преобразователя для небольшого диапазона регулирования скорости. Экономически целесообразная область применения АНД в качестве электропривода — большая группа технологических механизмов с ограниченным диапазоном регулирования скорости и, как правило, не требующих изменения направления вращения и электрического торможения. К этой же группе относятся дымососы и вентиляторы.

Необходимое регулирование производительности дымососов и вентиляторов осуществляется заслонками, что приводит к большим потерям электрической энергии по сравнению с регулируемым электроприводом. Применение заслонок не позволяет получить наибольший эффект при внедрении САПТ.

Внедрение регулируемых электроприводов способствует снижению потребления электрической энергии, т.е. повышению к.п.д. привода. При мощности электроприводов дымососов и вентиляторов свыше 100 кВт применение регулируемого привода целесообразно даже только в

целях экономии электроэнергии [5]. В ряде случаев внедрение регулируемого электропривода для указанных типов механизмов оказывается целесообразным и при мощности приводного двигателя менее 100 кВт.

В среднем экономический эффект от внедрения одного преобразователя на предприятиях отрасли составляет 5–15 тыс. руб. в год, срок окупаемости — менее 3 лет [6].

Широкое распространение получил также синхронный электропривод, отличающийся большой перегрузочной способностью, высоким к.п.д., устойчивостью работы при колебаниях напряжения сети, возможностью регулирования в широких пределах реактивной мощности. Замена электромашинных возбуждателей синхронных электродвигателей тиристорными возбуждателями позволяет осуществить дальнейшее улучшение технико-экономических показателей системы электроснабжения и синхронного электропривода вследствие увеличения надежности системы возбуждения, повышения к.п.д., уменьшения эксплуатационных расходов и введения режима автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Для этой цели производственное объединение "Уралэнергоцветмет" выпускает тиристорные возбуждатели серии ВТЦ.

Экономический эффект от внедрения одного возбуждателя составляет 2,5–3 тыс. руб. в год; срок окупаемости — менее 3 лет. При этом экономия электрической энергии за счет более высокого к.п.д. по сравнению с электромашинным возбуждателем составляет в среднем 20 тыс. кВт·ч в год, на одну установку [7].

### **3. Техничко-экономическая эффективность внедрения тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока**

*Прокатное оборудование.* На предприятиях цветной металлургии для привода листовых, ленточных, фольгопрокатных, трубоволоочильных и других станов по условиям технологии необходим достаточно широкий диапазон регулирования скорости. В полной мере этим требованиям удовлетворяет регулируемый электропривод постоянного тока. Преобразовательные агрегаты этих приводов выполнены с применением генераторов постоянного тока Г или управляемых ртутных вентилей УРВ.

Система Г—Д с электромашинным управлением в настоящее время значительно уступает по технико-экономическим показателям системе тиристорный преобразователь — двигатель ТП—Д. Основные недостатки этой системы: наличие вращающегося преобразователя, значительные ремонтно-эксплуатационные расходы, необходимость сооружения дорогостоящих фундаментов, громоздкая система управления с тяжеловесными корректирующими устройствами, необходимость применения которых обусловлена инерционностью и сравнительно низким коэффициентом усиления по мощности.

Система УРВ—Д также не лишена недостатков: низкий к.п.д., обусловленный значительными потерями мощности в самом венти́ле (падение напряжения на дуге не зависит от выпрямленного напряжения и составляет 18–20 В); необходимость поддержания температуры в заданных

пределах; громоздкая система охлаждения; сравнительно малый срок службы вентиляей; необходимость определенного времени на подготовку системы к работе; повышенные требования к вентиляции помещений; значительная производственная площадь для установки ртутных преобразователей. Выпускаемые производственным объединением "Уралэнергочетмет" тиристорные преобразователи позволяют осуществить замену электромашинных и ртутных преобразователей и тем самым существенно улучшить технико-экономические показатели прокатного оборудования.

Преимущества тиристорных преобразователей заключаются в следующем:

1. Экономичность, к.п.д. тиристорного преобразователя 0,95—0,98, к.п.д. ртутного преобразователя (особенно при выпрямленном напряжении 220 В) на 10 % ниже, а к.п.д. электромашинных преобразователей 0,81—0,83.

2. Надежность и долговечность. Правильно спроектированный преобразователь имеет более высокую надежность и практически неограниченный срок службы. Долговечность его определяется факторами физического износа.

3. Простота эксплуатации и постоянная готовность к работе. Преобразователи, не имеющие вращающихся частей, практически не нуждаются в систематическом уходе и обслуживании.

4. Преобразователи обеспечивают высокое быстродействие электропривода, что особенно важно для современных автоматизированных электроприводов прокатных станов. Высокий коэффициент усиления по мощности тиристорных преобразователей позволяет создать компактные и надежные оптимальные системы управления, благодаря чему можно в полной мере использовать высокие динамические свойства двигателей постоянного тока. Повышение быстродействия электропривода во многих случаях способствует увеличению производительности и улучшению качества продукции.

5. Применение тиристорных преобразователей позволяет создать более гибкие системы электроприводов. Электромашинные и ртутные преобразователи целесообразнее было выполнять на большие мощности, что привело к довольно широкому распространению общей системы питания для нескольких двигателей. В такой системе все прокатные двигатели многошестеренового прокатного стана (а также реверсивных станов холодной прокатки) получают питание от общего генератора (одного или нескольких). Такая система питания вызывает серьезные затруднения при создании различных систем автоматического регулирования, которые должны иметь независимое управление скоростью отдельных двигателей.

Экономичность тиристорных преобразователей в меньшей степени зависит от мощности, что позволяет создать экономичные индивидуальные системы ТП—Д. Индивидуальные электроприводы открывают широкие возможности для создания высококачественных систем авторегулирования.

6. Применение тиристорных преобразователей позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы по ремонту и обслуживанию электрооборудования.

Внедрение современных систем автоматизированного тиристорного электропривода с одновременной модернизацией механооборудования позволяет: увеличить производительность за счет уменьшения времени переходных процессов, сокращения количества проходов металла при прокатке, увеличения массы прокатываемых рулонов и скорости прокатки; повысить качество выпускаемой продукции за счет лучших динамических параметров системы авторегулирования; получить значительную экономию электроэнергии вследствие снижения потерь и повышения к.п.д. преобразователя; снизить ремонтно-эксплуатационные затраты благодаря повышению надежности электрооборудования.

Годовая экономия электроэнергии в отрасли от внедрения тиристорных преобразователей составляет более 60 млн. кВт.ч. Величина экономического эффекта подтверждена заводами цветной металлургии, на которых осуществляли внедрение.

*Горное оборудование.* На горнорудных предприятиях цветной металлургии эксплуатируются одноковшовые экскаваторы типов ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8 и значительное количество станков шарошечного бурения взрывных скважин типа 2СБШ-200, СБШ-250, БАШ-250, БАШ-320.

Модернизацию электроприводов осуществляют путем внедрения системы ТП—Д вместо системы Г—Д. Для этого производственное объединение "Уралэнергоцветмет" изготавливает тиристорные преобразователи типа КТЭ-3Э и КТП-4Э, предназначенные для питания и управления электродвигателями механизмов подъема, напора, поворота — хода и днища ковша, а также для питания цепей постоянного тока системы управления карьерными экскаваторами, и типа ТП-ЗБС — для питания и управления двигателем вращателя буровых станков шарошечного бурения.

Экономический эффект достигается в основном вследствие повышения производительности на 10—15 %, экономии электрической энергии и снижения ремонтно-эксплуатационных затрат и составляет 10—40 тыс. руб в год при модернизации электроприводов одного экскаватора и 8 тыс. руб. в год — станка шарошечного бурения. Годовой экономический эффект (суммарный) от модернизации на предприятиях отрасли десятки карьерных экскаваторов типа ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8 составил 180 тыс. руб., девятию девяти станков шарошечного бурения 544,5 тыс. руб. и трех шахтных подъемных установок 60 тыс. руб.

*Карусельно-разливочные машины.* Карусельные разливочные машины применяют для розлива свинца, меди и других цветных металлов. Модернизация электроприводов осуществляется путем замены системы Г—Д с контакторным управлением на систему ТП—Д с системой автоматического регулирования.

Экономический эффект при модернизации достигается в основном за счет увеличения производительности карусельно-разливочной машины путем сокращения времени цикла при повороте карусели на один шаг. Например, на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате время

цикла при повороте карусели на один шаг. Например, на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате время цикла сокращено от 21 до 11 с, на Балхашском горно-металлургическом комбинате — от 24,5 до 13 с, на Карабашском медеплавильном комбинате — от 26 до 19 с и т.д. Результаты расчета экономической эффективности от внедрения комплексного тиристорного преобразователя типа ПТЦ взамен системы Г—Д на Кыштымском медеэлектролитном заводе таковы, тыс. руб.: экономия по текущим затратам 34,0, капитальные затраты 34,2 годовой экономический эффект 29,2, срок окупаемости 1,1 года. На других предприятиях, на которых произведена модернизация электроприводов карусельных различных машин, экономический эффект составляет 18—33 тыс. руб. при сроке окупаемости менее 2,5 лет.

#### **4. Убытки, обусловленные влиянием тиристорных преобразователей на качество электрической энергии в системах электроснабжения**

Экономическая работа электроустановок и наивысшая производительность технологических агрегатов достигаются при определенных показателях качества электрической энергии в системе электроснабжения. Показатели качества электрической энергии у ее приемников установлены ГОСТ 13109—67.

Мощные преобразовательные установки для питания серий электролизеров цветных металлов и электроприводов переменного и постоянного тока, внедряемые на предприятиях отрасли, снижают показатели качества электрической энергии в системах электроснабжения (см. гл. II, разд. 5). Они отрицательно влияют на работу всего оборудования, подключенного к системам электроснабжения, обуславливая на предприятиях определенные убытки.

В связи с этим очень важно при внедрении преобразовательных агрегатов обеспечить экономичную работу всего заводского оборудования. Однако, чтобы принять правильное техническое решение по повышению качества электрической энергии, необходимо объективно и методически строго производить оценку убытков, вызываемых понижением показателей ее качества.

Убытки состоят из электромагнитной и технологической составляющих [8].

Электромагнитная составляющая, обусловленная отклонениями напряжения в сторону отрицательных значений, характеризуется увеличением потребления тока приемниками электрической энергии и дополнительными потерями активной мощности в системах электроснабжения. При несинусоидальном напряжении эта составляющая обуславливается увеличением потерь активной мощности, ускорением старения изоляции электрооборудования и кабельных сетей, ограничением области применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности. При несимметрии напряжений электромагнитная составляющая определяется: увеличением потерь активной мощности, увеличением потребления активной и реактивной мощностей, интенсификацией процесса старения изоляции электрооборудования, недовыработкой конденсаторами и синхрон-

ными машинами реактивной мощности, необходимостью завышения номинальных мощностей электродвигателей и трансформаторов, сечений кабелей и проводов, снижением освещенности рабочих мест.

Технологическая составляющая, обусловленная отклонениями напряжения в сторону отрицательных значений и колебаниями, характеризуется снижением производительности технологических установок [2]. При несинусоидальном напряжении эта составляющая обуславливается повышением себестоимости продукции за счет увеличения удельного расхода электроэнергии из-за невозможности применения конденсаторных установок для повышения коэффициента мощности; снижением надежности работы элементов системы электроснабжения из-за увеличения вероятностей возникновения однофазных замыканий на землю и перехода их в двух- и трехфазные короткие замыкания. При несимметрии напряжений технологическая составляющая возникает в результате изменения скольжения и вращающегося момента асинхронных двигателей и соответствующего снижения производительности технологических механизмов, а также уменьшения максимального момента синхронных двигателей.

По данным исследований, в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии наблюдаются следующие показатели качества электрической энергии: с вероятностью 0,92 отклонения напряжения находятся в пределах от  $-5$  до  $10$  % от номинального значения; напряжение обратной последовательности (несимметрия напряжения) составляет  $0,2-2$  % от номинального напряжения; коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения  $K_{нс} = 3,7-12,7$  %. Из сравнения этих показателей качества электрической энергии с показателями, обусловленными "Нормами качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения", ГОСТ 13109-67 видно, что величина несимметрии напряжения удовлетворяет предъявляемым требованиям, а вероятность отклонения напряжения 0,92 близка к величине 0,95. Ввиду этого здесь не рассматриваются убытки, обусловленные несимметрией напряжения и отклонениями напряжения.

Электромагнитные составляющие убытка при несинусоидальном напряжении:

а) высшие гармонические составляющие тока при протекании через двигатели, трансформаторы, кабели и другое электрооборудование вызывают дополнительные потери активной мощности и ускоренное старение изоляции. Методика определения дополнительных потерь активной мощности на токоведущих частях  $\Delta P_{vi}$ , изоляции под действием высокочастотных электромагнитных полей  $\Delta P_{dv}$ , обусловленных токами высших гармоник, и относительного (по отношению к синусоидальному режиму тока) сокращения срока службы изоляции  $\Delta t_*$  приведена в гл. V.

При расчете убытка, обусловленного дополнительным тепловым старением изоляции, относительное сокращение срока ее службы представляется соответствующим относительным увеличением отчислений на реновацию электрооборудования:  $\Delta t_* = K_p$ .

Ежегодный убыток, руб/год, обусловленный дополнительными потерями активной мощности и интенсивным старением изоляции, рассчитывают по формуле [8]

$$Y_{\nu} = \beta T_i \Delta P_{\nu i} 10^3 + K_{pi} K_i K_{p.n}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — стоимость потерь электроэнергии, руб/кВт.ч;  $T_i$  — продолжительность работы  $i$ -того вида электрооборудования в году, тыс. ч;  $K_{p.n}$  — нормативный коэффициент на реновацию от капитальных затрат  $K_i$   $i$ -того вида электрооборудования;

б) при несинусоидальном напряжении в системе электроснабжения и включении конденсаторной батареи для повышения коэффициента мощности всегда возникают резонансы тока в цепи батарея конденсаторов — внешняя сеть на частотах высших гармонических. Конденсаторы перегружаются по току и мощности и выходят из строя (см. гл. II, разд. 6).

Для нормальной эксплуатации конденсаторные батареи необходимо защищать реакторами от проникновения в них высших гармонических или включать в цепь фильтров высших гармонических. В этом случае убыток определяется затратами на установку и эксплуатацию защитных реакторов или реакторов фильтра (руб/год):  $Y_p = EK + C_p$  (2), где  $E$  — суммарный коэффициент отчислений (нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений и коэффициенты отчислений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание), от капитальных затрат  $K$  на реакторы;  $C_p$  — стоимость потерь электроэнергии и активной мощности в реакторах, руб. При  $K_{nc} > 5\%$  и значительных мощностях конденсаторных батарей защитные реакторы не всегда обеспечивают их нормальную работу, а фильтро-компенсирующие установки на напряжение 6–10 кВ отечественная электротехническая промышленность не выпускает, поэтому конденсаторные батареи часто приходится отключать. При этом убыток определяется стоимостью дополнительных потерь мощности и электрической энергии, если в системе электроснабжения низкий коэффициент мощности ( $\lg \varphi$  больше нормативного). Стоимость дополнительных потерь мощности и электрической энергии, руб/год, определяют по формуле  $Y_k = \delta (\alpha K_m + \beta \tau) (\Delta P_m - \Delta P_{m.k})$  (3), где  $\alpha$  — удельные затраты, обусловленные расширением электростанций системы для покрытия потерь активной мощности, руб/кВт;  $\beta$  — удельные затраты на выработку электроэнергии на шинах электростанций, руб/(кВт.ч);  $K_m$  — отношение потерь активной мощности в момент наибольшей активной нагрузки энергосистемы к наибольшим потерям активной мощности;  $\tau$  — время максимальных потерь, ч;  $\delta$  — коэффициент, учитывающий затраты на расширение электрических сетей, обусловленные передачей мощности для покрытия потерь активной мощности;  $\Delta P_m$  и  $\Delta P_{m.k}$  — соответственно наибольшие потери активной мощности при отключенных и работающих конденсаторных установках, кВт.

Технологические составляющие убытка при несинусоидальном напряжении:

а) математическое ожидание убытка, руб/год, обусловленного однофазными замыканиями на землю в системах электроснабжения 6–10 кВ,



определяют по формуле  $\bar{Y}_1 = \bar{\lambda}_1 \Phi C_1$  (4), где  $\bar{\lambda}_1$  — математическое ожидание интенсивности отказов фидеров в системе электроснабжения, приводящих к однофазным замыканиям на землю (см. гл. V);  $\Phi$  — число фидеров в системе электроснабжения (длина кабеля одного фидера условно принята 1000 м);  $C_1$  — затраты на ликвидацию одного пробоя кабеля на землю, руб.

Замыкание второй фазы на землю возможно в месте первого пробоя и в других местах, электрически связанных с поврежденным кабелем;

б) убыток из-за многофазных коротких замыканий определяется затратами на ликвидацию последствий коротких замыканий и убытками от перерыва электроснабжения приемников электрической энергии. Математическое ожидание этого убытка, руб/год, определяют по формуле

$$\bar{Y}_{2,3} = \bar{\lambda}_{2,3} \Phi C_{2,3} + \sum_{i=1}^m \bar{y}_i \bar{P}_i, \quad (5)$$

где  $\bar{y}_i$  — математическое ожидание удельного убытка от перерыва электроснабжения длительностью  $t_i$ , руб/кВт;  $\bar{P}_i$  — математическое ожидание активной мощности, отключаемой при перерыве электроснабжения, кВт;  $\bar{\lambda}_{2,3}$  — математическое ожидание интенсивности двух- и трехфазных коротких замыканий в системе электроснабжения при несинусоидальном напряжении, год<sup>-1</sup>;  $C_{2,3}$  — затраты на восстановление кабельных линий, руб.;  $m$  — количество многофазных замыканий в системе электроснабжения за год.

На рис. 1 приведены зависимости математического ожидания удельного убытка различных предприятий от длительности перерыва электроснабжения. Кривые построены на основании статистических данных об убытках при перерывах электроснабжения, а также данных, полученных расчетным путем после тщательного анализа технологических процессов. 95 %-ный доверительный интервал изменения математического ожидания удельного убытка составляет  $\pm 0,3$  у.

Количество расчетных двух- и трехфазных коротких замыканий в системе электроснабжения определяют по формуле:  $m = \bar{\lambda}_{2,3} \Phi$ . Значение  $\bar{\lambda}_{2,3}$  с вероятностью 0,95 составляет 0,05–0,09 (см. гл. V).

Продолжительность перерыва электроснабжения при двух- и трехфазных коротких замыканиях определяется в отдельных случаях временем восстановления фидеров, а чаще всего временем, необходимым для переключения в системе электроснабжения.

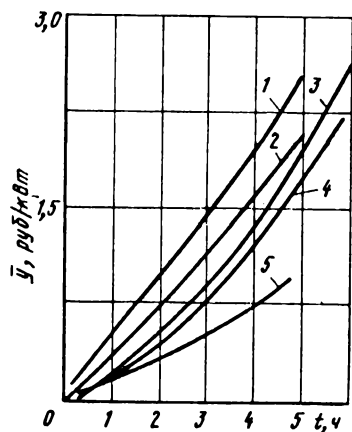


Рис. 1. Зависимость математического ожидания удельного убытка  $\bar{y}$  от длительности перерыва электроснабжения  $t$ : 1 — цинковый завод; 2 — медеплавильный; 3 — алюминийный; 4 — магниевый; 5 — никелевый

Практика расчетов показывает, что величина убытков, полученных по выражениям (3) – (5), на порядок больше убытков, полученных по выражениям (1) и (2). Основную часть убытка при несинусоидальном напряжении составляет технологическая составляющая, обусловленная снижением надежности системы электроснабжения.

## Глава II. ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ УСТАНОВОК

### 1. Режимы работы полупроводниковых выпрямительных агрегатов питания серий электролизеров стационарными токами

Для питания мощных серий электролизеров цветных металлов применяют полупроводниковые выпрямительные агрегаты, управляемые дросселями насыщения, типов ВАКЭЛ, ВАК (ВАКВ, ВАКД), АВП. Более со-

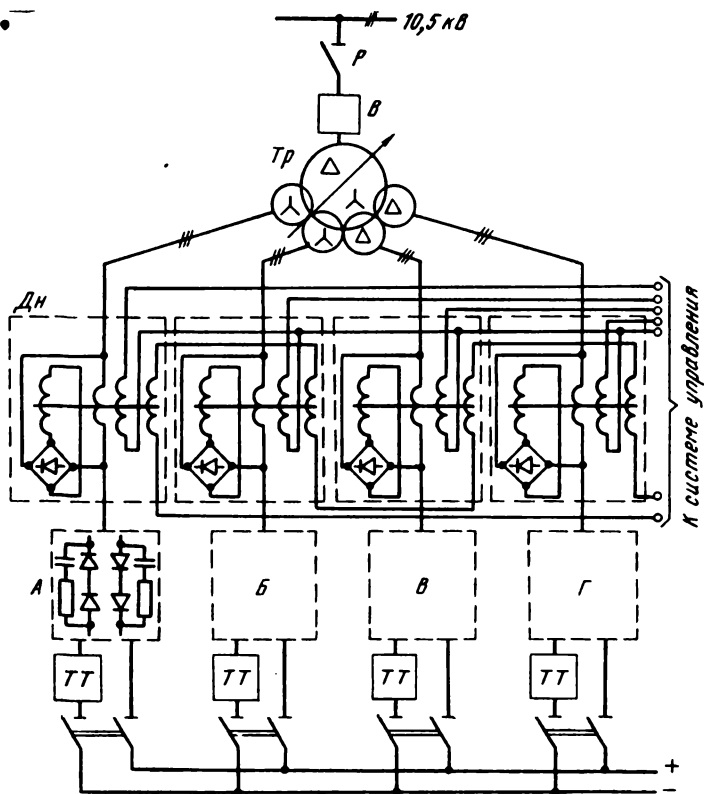


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема агрегата типа ВАКЭЛ 11250-450:

А, Б, В, Г – выпрямительные трехфазные мосты

вершенные агрегаты типа ВАК по основным элементам, схеме выпрямления и компоновке принципиально не отличаются от агрегатов типа ВАКЭЛ [1].

Агрегаты на выпрямленное напряжение 300–850 В выполняются по трехфазной мостовой схеме и имеют двенадцатимпульсный режим выпрямления. Ступенчатое регулирование выпрямленного напряжения под нагрузкой производится путем переключения отводов силового трансформатора, плавное — дросселями насыщения.

На рис. 2 приведена принципиальная электрическая схема агрегата типа ВАКЭЛ 11250-450. Работа этой и других схем и особенности технического обслуживания агрегатов подробно описаны в монографии [9]. В процессе эксплуатации полупроводниковых выпрямительных агрегатов, управляемых дросселями насыщения, происходит перераспределение нагрузки между трехфазными выпрямительными мостами одного и того же агрегата. Отдельные выпрямительные мосты перегружаются до 70 % и более. Работа перегруженных трехфазных выпрямительных мостов характеризуется значительной величиной угла коммутации [10]. В результате этого коэффициент мощности полупроводникового выпрямительного агрегата  $\chi$  снижается. Зависимость  $\chi$  от угла коммутации  $\gamma$  определяют по выражению [10]

$$\chi = (3/\pi) (\sqrt{2}/\sqrt{2 - \gamma/\pi}) \cos \gamma/2 \cos \varphi_1, \quad (6)$$

где  $\varphi_1 = \alpha + \gamma/2$  — угол сдвига между первой гармоникой тока и фазной э.д.с. трансформатора;  $\alpha$  — угол управления.

Снижение  $\chi$  происходит под действием случайных процессов, возникающих в полупроводниковом выпрямительном агрегате. Для математического описания процесса применяют моделирование операций по схеме марковских случайных процессов. Режимы работы агрегата условно разделяются на три состояния, при которых  $\chi \geq 0,91$ ;  $0,91 > \chi > 0,7$ ;  $\chi \leq 0,7$ . Эти условные состояния охватывают весь диапазон изменения коэффициента мощности во время эксплуатации.

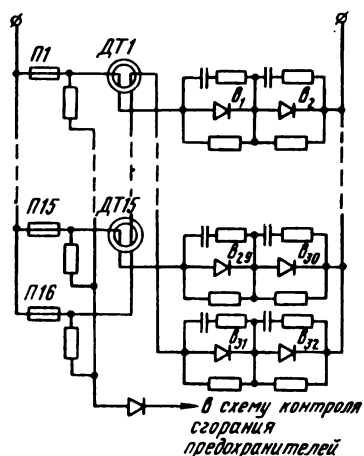


Рис. 3. Принципиальная схема параллельных ветвей плеча трехфазного выпрямительного моста:

П1–П16 — предохранители; В<sub>1</sub>–В<sub>4</sub> — вентили; ДТ1–ДТ15 — индуктивные делители тока

Для марковского процесса время пребывания полупроводникового выпрямительного агрегата в каком-либо состоянии должно быть распределено по экспоненциальному закону. В данном случае время работы полупроводникового выпрямительного агрегата в одном из трех режимов зависит от времени, которое он уже проработал. В связи с этим процесс,

происходящий в полупроводниковом выпрямительном агрегате, не является чисто марковским. Чтобы искусственно свести этот процесс к марковскому введены два псевдосостояния:  $S_2$  — полупроводниковый выпрямительный агрегат работает с коэффициентом мощности  $0,91 > \chi > 0,7$  при неодинаковости более чем на 10 % тока в параллельных цепях ветвей плеч выпрямительного моста (рис. 3);  $S_3$  — агрегат работает при неравномерном распределении тока нагрузки между его выпрямительными мостами. Размеченный граф состояний показан на рис. 4.

Из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$  полупроводниковый выпрямительный агрегат перейдет, когда в параллельных ветвях плеч выпрямительных мостов начнут протекать токи неодинаковой величины (см. рис. 3). Неравномерное распределение тока между параллельными ветвями происходит из-за неодинакового общего падения напряжения в них при протекании прямого тока, которое не должно отличаться более чем на 0,02 В,

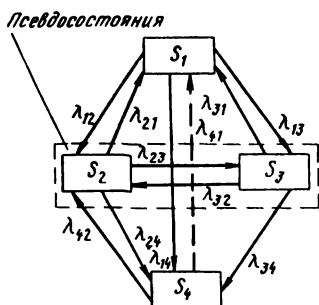


Рис. 4. Размеченный граф состояний полупроводникового выпрямительного агрегата

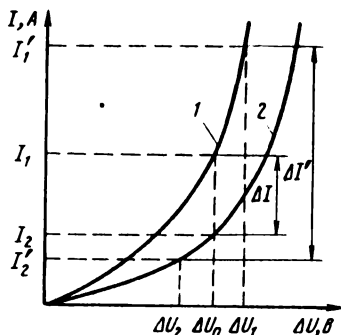


Рис. 5. Влияние вольтамперных характеристик вентиля на распределение тока в параллельных ветвях

неодинаковых падений напряжения в силовых вентилях на сопротивлениях проводов и предохранителей, вследствие неоднородности магнитного поля, созданного токами, протекающими во всех плечах выпрямительного моста (в различных ветвях индуктируются э.д.с., разные по величине и направлению), и изменения магнитного потока в железе делителей тока из-за нарушения качества сборки [9].

Неравномерное распределение тока между параллельными ветвями происходит также из-за выхода из строя вентиля и замены их без соответствующих проверок и подбора по параметрам [9]. Для примера рассмотрим две параллельные ветви [11]. Пусть кривые 1 и 2 (рис. 5) соответственно представляют функции  $I = f(\Delta U)$  этих параллельных ветвей. Тогда при одинаковом падении напряжения в параллельных ветвях  $\Delta U_0$  различие в силе тока составляет  $\Delta I$ , при несовпадении падений напряжения  $-\Delta I'$ , т.е. значительно увеличивается.

Плотность вероятности перехода агрегата из состояния  $S_1$  в  $S_2$  зависит от интенсивности отказов элементов и определяется по формуле

$$\lambda_{12} = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i, \quad (7)$$

где  $m$  — количество типов элементов;  $n_i$  — количество  $i$ -того типа элемента в схеме выпрямления;  $\lambda_i$  — интенсивность отказа  $i$ -того элемента, год<sup>-1</sup>.

Ниже приведены средние значения интенсивности отказов элементов полупроводниковых выпрямительных агрегатов Усть-Каменогорского титаномagneйного комбината, определенные при доверительной вероятности 0,95:

Элемент	$\lambda \cdot 10^{-5}, \text{год}^{-1}$	Элемент	$\lambda \cdot 10^{-5}, \text{год}^{-1}$
Делитель тока . . . . .	0,013	Контактный разъем . . . . .	0,003
Силовой диод . . . . .	0,05	Трансформатор . . . . .	0,5
Предохранитель типа ПНБ. . . . .	0,146	Магнитный усилитель . . . . .	0,09
Дроссель насыщения . . . . .	0,5	Стабилизатор напряжения . . . . .	0,07
Реле . . . . .	1,8		

Из состояния  $S_1$  в состояние  $S_3$  полупроводниковый выпрямительный агрегат переходит при отказах дросселей насыщения. При повреждении в цепях обмоток отрицательной обратной связи и смещении или при ослаблении обжатия магнитопроводов изменяется настройка дросселей насыщения. Одинаковой силы электрический ток в обмотках управления дросселей насыщения не обеспечивает равномерного регулирования напряжения каждым мостом. Загрузка выпрямительных мостов изменяется.

Из состояния  $S_2$  в состояние  $S_3$  полупроводниковый выпрямительный агрегат перейдет при исправных дросселях насыщения и системы управления, если в 160 параллельных ветвях агрегата токи будут отличаться от среднего значения более чем на 10 %.

Ниже приведены интенсивность нарушения равномерной загрузки в 160 параллельных ветвях:

Наименование событий	$\lambda \cdot 10^{-5}, \text{год}^{-1}$
Неравномерное распределение тока в параллельных ветвях, вызванное перегрузкой выпрямительных мостов. . . . .	0,48
Полный отказ системы автоматического регулирования . . . . .	0,1
Отклонение более чем на 25 % от средней нагрузки трех выпрямительных мостов . . . . .	1,5
Отклонение тока от среднего значения более чем на 10 % в параллельных ветвях . . . . .	2,72
Восстановление равенства токов при ежегодной проверке и наладке систем агрегата:	
в параллельных ветвях. . . . .	5,7
между выпрямительными мостами . . . . .	3

Плотность вероятности перехода характеризуется потоком Эрланга 160-го порядка.

Из состояния  $S_1$  в состояние  $S_4$  полупроводниковый выпрямительный агрегат переходит, когда система регулирования тока нагрузки оказывается полностью разрегулирована из-за отказов стабилизатора задающего напряжения, магнитных усилителей и пр. Такие явления наблюдаются при пожаре в шкафах управления.

Из состояния  $S_3$  в состояние  $S_2$  агрегат переходит, когда происходят отказы дросселей насыщения, в результате чего отдельные выпрямительные мосты перегружаются и при этом наблюдается выход из строя вентиля и предохранителей в параллельных ветвях.

Из состояния  $S_3$  в состояние  $S_4$  полупроводниковый агрегат переходит, когда загрузка по току трех выпрямительных мостов отличается от средней более чем на 25 %. Плотность вероятности перехода представляет собой поток Эрланга третьего порядка.

Переход системы из состояний  $S_2$  и  $S_3$  в состояние  $S_1$  происходит под действием ежегодных проверок электрооборудования и системы управления. Интенсивность восстановления равенства токов в параллельных ветвях и между трехфазными выпрямительными мостами приведена выше.

Плотности вероятности перехода полупроводникового выпрямительного агрегата из одного состояния в другое ( $a \cdot 10^{-5}$ ) в соответствии с рис. 4, рассчитанные по выражению (7) на основании приведенных выше данных, составляют:  $\lambda_{12}$  10,7;  $\lambda_{13}$  12,5;  $\lambda_{14}$  0,1;  $\lambda_{21}$  5,7;  $\lambda_{23}$  0,07;  $\lambda_{24}$  0,1;  $\lambda_{31}$  3;  $\lambda_{34}$  1,5;  $\lambda_{32}$  0,48;  $\lambda_{42}$  2,72.

Для определения предельных вероятностей состояний  $p_1, p_2, p_3, p_4$ , которые представляют собой средние относительные значения времени пребывания полупроводникового выпрямительного агрегата в данных состояниях, составляют уравнения А.Н. Колмогорова:

$$\left. \begin{aligned} dp_1/dt &= \lambda_{21}p_2 + \lambda_{31}p_3 - p_1(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}); \\ dp_2/dt &= \lambda_{12}p_1 + \lambda_{32}p_3 + \lambda_{42}p_4 - p_2(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24}); \\ dp_3/dt &= \lambda_{13}p_1 + \lambda_{23}p_2 - p_3(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34}); \\ dp_4/dt &= \lambda_{14}p_1 + \lambda_{34}p_3 + \lambda_{24}p_2 - \lambda_{42}p_4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

уравнение нормированного условия  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$  (9).

Для определения предельных вероятностей состояний полупроводникового выпрямительного агрегата приравнивают нулю все левые части уравнений (8). Решая совместно выражения (8) и (9), получаем:  $p_1 = 0,1282$ ;  $p_2 = 0,3499$ ;  $p_3 = 0,3294$ ;  $p_4 = 0,1925$ . Это означает, что полупроводниковый выпрямительный агрегат, управляемый дросселями на номинальную мощность, работает с коэффициентом мощности  $\chi \geq 0,91 - 12,82\%$  времени,  $0,91 > \chi > 0,7 - 67,93\%$ ,  $\chi \leq 0,7 - 19,25\%$ .

Значительное относительное время работы полупроводникового выпрямительного агрегата с коэффициентом мощности ниже паспортного значения показывает, что ежегодные неполные проверки, проводимые на предприятиях цветной металлургии, не устраняют все дефекты отклонения от нормальной работы в оборудовании и системе регулирования.

В связи с изложенным возникает необходимость в определении частоты дополнительной полной проверки соответствия оборудования и системы автоматического регулирования техническим требованиям [9] и устранения отмеченных недостатков, позволяющих полупроводниковому выпрямительному агрегату работать с номинальным или близким к нему коэффициентом мощности.

Введем в размеченный граф состояния рис. 4 плотность вероятности перехода  $\lambda_{41}$  полупроводникового агрегата из состояния  $S_4$  в состояние  $S_1$ , которая нам неизвестна.

Математическое ожидание времени, через которое следует проводить полную проверку, определяют по формуле [12]:  $Mt = 1/\lambda_{41}$  (10).

Составляя уравнения А.Н. Колмогорова и решая их на ЭЦВМ при различных значениях  $\lambda_{41}$ , определяют предельные вероятности состояния. При устранении отступлений от технических требований систем полупроводникового выпрямительного агрегата один раз в три года продолжительность работы агрегата в режиме  $\chi \geq 0,91$  составляет 18 % от общего времени работы,  $0,91 > \chi > 0,7-80,75 \%$ ,  $\chi \leq 0,7 \div 1,25 \%$ .

В связи с этим рекомендуется для повышения  $\chi$  работающих в настоящее время полупроводниковых выпрямительных агрегатов, управляемых дросселями насыщения, один раз в три года проводить полную ревизию оборудования и систем управления с целью устранения причин, вызывающих неравномерную нагрузку между трехфазными выпрямительными мостами агрегата.

## 2. Автоматизированные тиристорные системы для электролиза цветных металлов нестационарными токами

Для электролиза алюминия, магния, меди, никеля и цинка выпускается серия автоматизированных тиристорных преобразователей САПТ.

Ниже приведены общие технические данные этой серии:

Ряд номинальных выпрямленных токов, кА. . . . . 6,3; 12,5; 25;  
37,5; 50

Ряд максимальных выпрямленных напряжений, В. . . . . 450, 850

Диапазон регулирования выпрямленного тока, % . . . . . 5-100

Пределы регулирования длительности импульсов тока, с:

прямого направления. . . . . 10-100

обратного направления. . . . . 0,2-2

Пределы регулирования паузы в импульсном режиме, с . . . . . 0,2-2

Точность поддержания заданного тока нагрузки, % . . . . .  $\pm 3$

Коэффициент полезного действия, не менее. . . . . 0,95

Коэффициент мощности при работе в неперереверсивном режиме. 0,82-0,92

Фазность пульсаций выпрямленного напряжения при номинальном токе, кА:

6,3 . . . . . 6

12,5 и выше. . . . . 12

Основными системами тиристорных преобразователей являются секции управляемых выпрямителей, защиты от перенапряжений, управления.

В зависимости от схемы выпрямления секции управляемых выпрямителей имеют пять типоразмеров: реверсивные с мостовой СУВР-М, нулевой СУВР-Н и встречно-параллельными схемами; неперереверсивные с мостовой СУВ-М, нулевой анодной СУВ-А и нулевой катодной СУВ-К схемами. Неперереверсивный мостовой выпрямитель образуется секциями СУВ-А и СУВ-К, реверсивный — двумя секциями СУВР-Н.

Технические данные секций приведены ниже:

	СУВР-Н	СУВР-М	СУВ-М	СУВ-А	СУВ-К
Номинальный выпрямленный ток, А . . . . .	12500	6300	6300	12500	12500
Число тиристоров в одном плече. . . . .	20	10	10	20	20
Допустимый ударный ток в течение 10 мс, кА. . . . .	220	110	110	220	220
Максимально допустимое значение интеграла квадрата аварийного тока в течение 10 мс, МА . . . . .	235	59	59	235	235

Конструктивно секции выполнены в виде шкафа двустороннего обслуживания, в котором размещены тиристоры типа Т-630, предохранители типа ПП-57, индуктивные делители тока, формирователи управляющих импульсов, RC-цепочки для защиты тиристоров от коммутационных перенапряжений, ячейки схемы бесконтактного контроля перегорания предохранителей. Тиристоры установлены на шести водоохлаждаемых шинах квадратного сечения. Применение тиристоров высоких классов позволило отказаться от последовательного их соединения, повысить показатели стойкости силовой части серии в аварийных режимах и существенно снизить габариты преобразовательных систем. Так, коэффициент использования объема неререверсивной секции с мостовой схемой на 6300 А и 30 В составляет  $1,2 \text{ МВт/м}^3$ .

Устройства защиты от перенапряжений ограничивают возникающие в питающей сети внешние либо в нагрузке коммутационные перенапряжения до уровня, не вызывающего повреждения тиристоров секции. В УЗП установлены также фильтры для подавления радиопомех. В зависимости от максимального выпрямленного напряжения серий устройства имеют две модификации – УЗП-450 и УЗП-850.

Устройства управления обеспечивают отработку заданной токограммы и защиту серии при возникновении аварийных режимов. Они также имеют две модификации – УУ-7 (для управления трехфазным мостовым выпрямителем) и УУ-6 (для управления двумя фазосмещенными трехфазными мостовыми выпрямителями, подключенными к вентильным обмоткам силового трансформатора, которые соединены в звезду и треугольник). Каждая модификация имеет несколько типоразмеров, отличающихся масштабами измерительных приборов. Конструктивно эти устройства (как

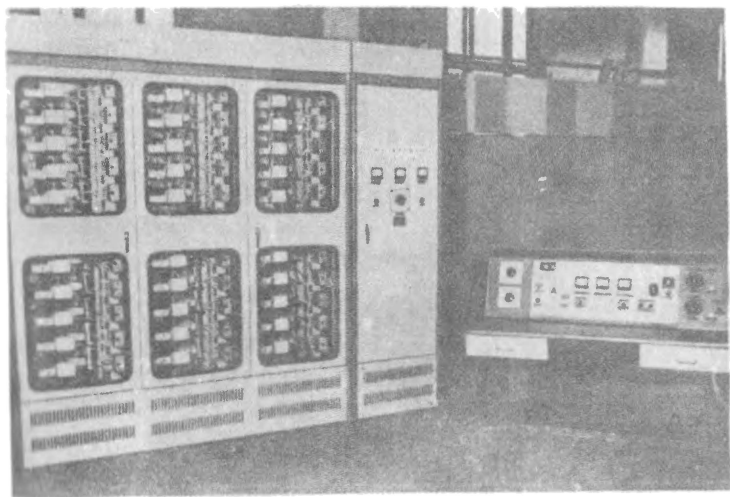


Рис. 6. Тиристорный преобразователь серии САП1, состоящий из секций типа СУВР-Н, устройства управления УУ-6, пульта управления ПУ-1



и устройства защиты от перенапряжений) выполнены в виде шкафа двустороннего обслуживания с габаритными размерами 700х2500х800 мм.

Созданы две модификации пультов управления — ПУ-1 (для задания и контроля параметров токограммы в реверсивном и импульсном режимах) и ПУ-2 (для управления коммутационной аппаратурой и сигнализацией состояния узлов серии). Внешний вид секции СУВР-Н, устройства управления УУ-6 и пульта управления ПУ-1 показан на рис. 6.

Технические данные тиристорных преобразовательных агрегатов разработанной серии приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Технические данные тиристорных преобразователей

Типоисполнение серии САПТ-1	Номинальный выпрямленный ток, А	Максимальное выпрямленное напряжение, В	Трансформатор	
			тип	число
6300/450-Т-Э-У4	6300	450	ТМНП-6300	1
12500/450-Т-Э-У4	12500	450	ТДНПВ-12500	1
12500/850-Т-Э-У4	12500	850	ТДНП-25000	1
25000/450-Т-Э-У4	25000	450	ТДНП-25000	1
25000/850-Т-Э-У4	2500	850	ТДНП-4000	1
37500/450-Т-Э-У4	2500	450	ТДНП-12500	3
37500/850-Т-Э-У4	37500	850	ТДНП-25000	3
50000/450-Т-Э-У4	37500	450	ТДНП-25000	2
50000/850-Т-Э-У4	50000	850	ТДНП-40000	2

На рис. 7 показана структурная схема нереверсивной серии типа САПТ-1-25000/850-Т-Э-У4 для питания нагрузки постоянным или импульсным током. Реакторы Др1, Др2 обеспечивают автономную работу фазосмещенных мостовых выпрямителей, образованных секциями СУВ-А и СУВ-К. Вентильные обмотки силового трансформатора типа ТДНП-4000/10, имеющие одну группу соединений, включены параллельно. Переключение ступеней силового трансформатора производится автоматически при выходе углов управления тиристорами из оптимальной зоны. Для выравнивания

нагрузки параллельно работающим мостовым выпрямителям используют специальную схему выравнивания тока.

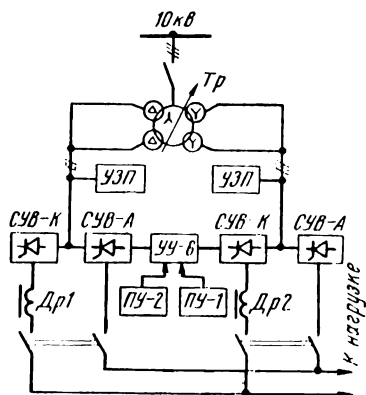


Рис. 7. Структурная схема тиристорных преобразователей типа САПТ-1-25000/850-Т-Э-У4

Системы на токи 37500 и 50000 А строят из блоков на 12500 и 25000 А соответственно, имеющих общую систему задания и регулирования тока.

Для питания электролизеров кадмия, висмута, олова, золота и редкоземельных элементов выпускают тиристорные агрегаты, в состав которых входят три типа секций управляемых выпрямителей неперевёрсивного СУВ и реверсивного СУВР исполнения с естественным воздушным охлаждением вентилях.

Ниже приведены технические данные секций:

	СУВР-500	СУВ-1000	СУВ 1600
Номинальный ток, А . . . . .	500	1000	1600
Напряжение максимальное выпрямленное, В . . . . .	660	660	660
Схема выпрямления трехфазная, мостовая. . . . .	Реверсивная	Неперевёрсивная	
Число параллельных вентилях в плече	1	2	4
Габариты (ширинаХглубинаХвысота), мм . . . . .	900х450х2150		1050х525х2150
Масса, кг . . . . .	475	475	900

Силовую часть секций СУВР-500 и СУВ-1000 собирают из 12 легкоъемных блоков БТ-500 (рис. 8), в которых размещены таблеточный тиристор 1500, линейный реактор, предохранитель ПП-57 и защитная RC-цепь. Блок выполнен симметричным относительно горизонтальной оси. Силовую часть тиристорных агрегатов на токи 2000-4000 А получают соединением в параллель нескольких секций. Секции имеют одностороннее обдувание, что позволяет устанавливать их вплотную одну к другой.

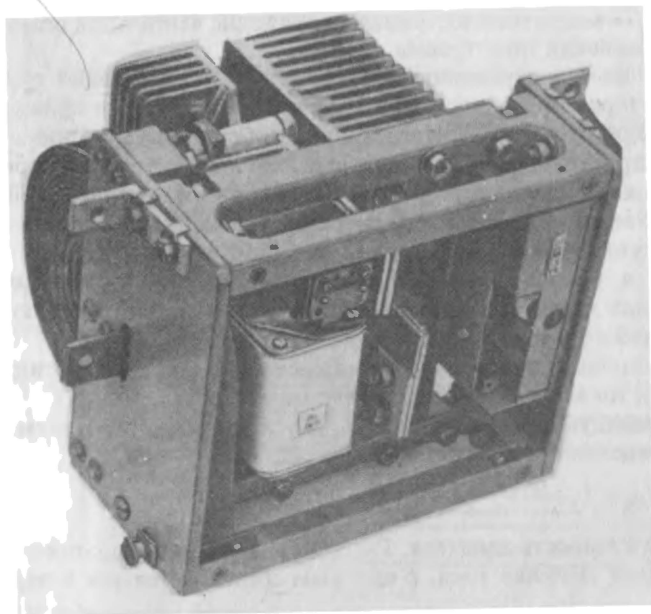


Рис. 8. Блок силовой БТ-500

Особенность тиристорных преобразователей серии САПТ — наличие реакторов на выходе параллельно работающих фазосмещенных мостовых выпрямителей. Необходимость в их установке обуславливается разностью мгновенных значений выпрямленных напряжений — напряжением небаланса. При отсутствии реакторов напряжение небаланса, меняющее полярность через 30 электрических градусов, попеременно запирает тиристоры выпрямительных мостов, вынуждая их коммутировать с двойной частотой и амплитудным значением тока, равным току нагрузки. Это приводит к повышенному нагреванию тиристоров и предохранителей, увеличению коммутационных потерь и динамических нагрузок на электрооборудование, снижению коэффициента мощности.

Индуктивность реактора определяют из соотношения

$$L_p = (R_{\text{ш}} + 4R_T + 2R_p) / 23 f \ln [I_y / (I_y - I_{\text{н min}})] - 2L_T, \quad (11)$$

где  $R_{\text{ш}}$  — сопротивление оцновки, Ом;  $R_T$  — активное сопротивление фазы вентильной обмотки силового трансформатора, Ом;  $R_p$  — активное сопротивление реактора, Ом;  $L_T$  — индуктивность фазы вентильной обмотки силового трансформатора, Гн;  $f$  — частота напряжения сети Гц;  $I_{\text{н min}}$  — минимальный ток нагрузки, до которого сохраняется автономная работа выпрямительных мостов, А;  $I_y$  — установившееся значение уравнивающего тока, А.

Напряжение небаланса  $u_{\text{нб}}$  зависит от угла управления и определяется по формуле

$$u_{\text{нб}} = 0,875 u_{2\phi \text{ max}} \sqrt{\pi/6 + \sin^2(\alpha + \pi/6) - \sin^2(\alpha + \pi/3)}, \quad (12)$$

где  $u_{2\phi \text{ max}}$  — максимальное фазное напряжение вентильной обмотки, В;  $\alpha$  — угол управления тиристорами.

Рассчитанные по выражению (11) реакторы обеспечивают параллельную работу тиристорных агрегатов в режиме стабилизации прямого тока и полупроводниковых агрегатов. Такая необходимость возникает в период реконструкции преобразовательной подстанции при замене полупроводниковых агрегатов тиристорными. Эффективное использование тиристорov достигается при равномерном распределении тока в параллельных ветвях. Неравномерное распределение токов в параллельных ветвях происходит в основном из-за технологического разброса параметров вольтамперных характеристик тиристорov и асимметрии тока по фазам, обусловленной конструктивными особенностями.

Для выравнивания тока в параллельных ветвях применяют индуктивные делители тока по схеме с задающим тиристором.

Выравнивающую э.д.с. в ветвях, В, обусловленную действием делителя тока, определяют по выражению

$$e_k = L_d (i_k - i_c) / dt, \quad (13)$$

где  $L$  — индуктивность делителя, Гн;  $i_k$  — величина тока  $k$ -той ветви, А;  $i_c$  — задающее значение тока, с которым сравнивается ток в параллельных ветвях;  $i_c = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k$ , где  $n$  — число параллельных ветвей.

Последовательно с каждым тиристором прямого и обратного комплектов устанавливают быстродействующие предохранители ПИ-57. Параметры предохранителей выбирают так, чтобы обеспечивалось отключение пробитого тиристора при несимметричном внутреннем коротком замыкании. При протекании аварийного тока через неповрежденное плечо предохранители не перегорают.

Параллельно к каждому тиристоры устанавливают RC-цепочку, ограничивают величину коммутационных перенапряжений.

Основной элемент устройства защиты от перенапряжений – конденсаторный фильтр, подключенный к шинам переменного и постоянного тока через вспомогательный выпрямитель. Емкость конденсатора определяют с учетом наиболее неблагоприятного случая возникновения перенапряжений – отключения силового трансформатора на холостом ходу:

$$C = \sqrt{3} U_{2л} I_{\mu} / 2 \pi f (U_0^2 - 2 U_{2л}^2), \quad (14)$$

где  $U_{2л}$  – линейное напряжение вентильной обмотки, В;  $I_{\mu}$  – ток намагничивания, приведенный к вентильной обмотке (в практических расчетах принимают равным току холостого хода), А;  $f$  – частота напряжения сети, Гц;  $U_0$  – максимальный уровень напряжения ограничения, В.

Функциональная схема системы автоматического регулирования тока нагрузки приведена на рис. 9. В схему реверсивного трехфазного выпрямителя (блока) входят: трансформаторы тока, датчик нулевого значения тока, формирователи импульсов; фазосмещающие устройства, регулятор тока, датчик тока, формирователь задания амплитуд импульсов тока, фор-

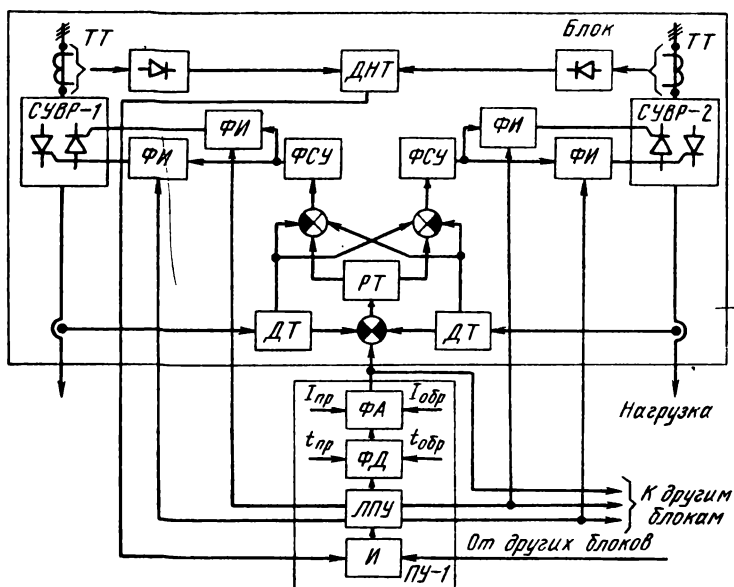


Рис. 9. Функциональная схема системы автоматического регулирования тока нагрузки

мирователь задания длительностей импульсов тока, логическое переключающее устройство.

Задание длительности и амплитуды импульсов тока каждого направления вводит оператор в устройство, формирующее длительности импульсов тока, согласно технологическим требованиям с помощью устройства задания, расположенных в пульте управления ПУ-1. Сформированный по длительности и амплитуде сигнал задания тока поступает на вход регулятора блоков, находящихся в работе. Одновременно логическое переключающее устройство по сигналам устройства, формирующего длительности импульсов тока, формирует сигнал на переключение выпрямительных комплектов. Разрешение на переключение дается датчиком нулевого значения тока блоков, подключенных к логическому переключающему устройству через логическую схему И.

Кроме сигнала задания, на вход регулятора тока подаются сигналы отрицательной обратной связи, пропорциональные величине выпрямленного тока секции управляемых реверсивных выпрямителей.

Сигналы отрицательной обратной связи по току формируются датчиками тока из напряжений, снимаемых с шунтов, установленных в цепи выпрямленного тока. Одновременно датчики тока осуществляют гальвани-

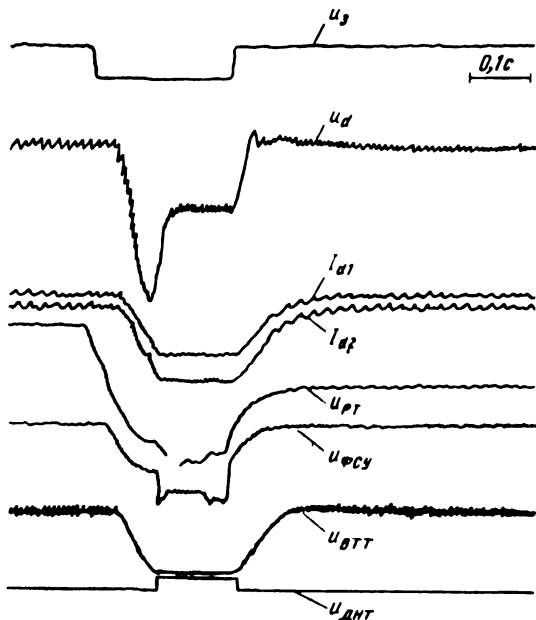


Рис. 10. Осциллограммы, иллюстрирующие работу двухмостового тиристорного агрегата в импульсном режиме работы:

$u_z$  — напряжение задания на входе регулятора тока;  $u_d$  — выпрямленное напряжение;  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  — выпрямленные токи секций управляемых выпрямителей;  $u_{pT}$  — выходное напряжение регулятора тока;  $u_{фсу}$  — напряжение на входе ФСУ;  $u_{втт}$  — напряжение на входе выпрямителя трансформаторов тока, установленных в вентиляционной обмотке;  $u_{днт}$  — выходное напряжение датчика нуля тока

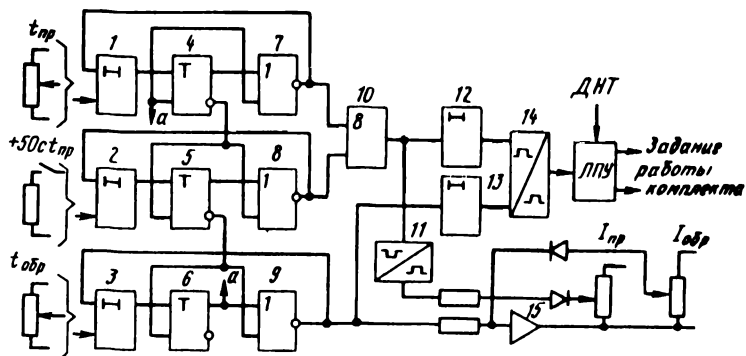


Рис. 11. Функциональная схема узла задания временных интервалов длительности импульсов тока

ческую развязку силовых цепей и цепей управления. Закон регулирования формируется операционными усилителями регулятора тока и определяется параметрами нагрузки. Выравнивание токовой нагрузки блоков обеспечивается идентичностью настройки регуляторов тока.

Выравнивание нагрузок выпрямительных секций достигается путем алгебраического суммирования на входе фазосдвигающего устройства сигнала рассогласования датчиков тока с сигналом управления.

Фазосмещающие устройства преобразуют аналоговый сигнал управления в дискретный импульс, фазовый угол которого пропорционален величине сигнала управления. Формирователи импульсов формируют импульс для одновременного управления двенадцатью параллельно включенными тиристорами. Запирание неработающих комплектов тока прямого или обратного направлений производится путем наложения запрета на соответствующие формирователи импульсов.

Осциллограммы, иллюстрирующие работу двухмостового агрегата в импульсном режиме, приведены на рис. 10. Функциональная схема узла задания временных интервалов длительности импульсов тока показана на рис. 11. Формирователь длительности импульсов тока выполнен на логических элементах. Длительность импульсов прямого тока задается изменением постоянной времени  $RC$ -цепи элемента времени 1. При включении тумблера "+50 С" длительность импульса прямого тока увеличивается на 50 с. Длительность импульсов тока обратного направления задается элементом времени 3. Преобразователь 11 преобразует отрицательные импульсы задания длительности прямого тока в положительные. Таким образом, на вход операционного усилителя 15 подаются разнополярные импульсы задания временных интервалов. Регулирование амплитуд импульсов задания тока производится изменением напряжения ограничения в обратной связи операционного усилителя 15. Элементы времени 12 и 11 создают задержку сигнала задания на переключение комплектов на время спада тока в силовой цепи. Этим повышается надежность работы агрегата в реверсивном режиме. Преобразователь 14 преобразует однополярные инверсные импульсы задания работы комплектов в разнополяр-

ные импульсы, необходимые для управления логического переключающего устройства.

В каждом управляемом мосте (блоке) агрегата предусмотрены защиты, которые аварийно отключают блок при внешнем или внутреннем коротком замыкании и перегрузках, достижении аварийной температуры циркуляционной воды или воздуха в шкафу управления, отсутствии потока циркуляционной воды, перегорании предохранителя задающего тиристора.

Функциональная схема защиты от перегрузок и коротких замыканий приведена на рис. 12. При превышении допустимого значения тока на входе или выходе секции возбуждается заторможенный мультивибратор с магнитной связью. Выходным напряжением мультивибратора открывается тиристор, замыкающий цепь питания дистанционного расцепителя автоматического выключателя В. Одновременно со второго выхода мультивибратора для уменьшения тока нагрузки подается сигнал на ФСУ, сдвигающий управляющие импульсы тиристора выпрямительных секций.

При наладке и эксплуатации первого реверсивного тиристорного агрегата ПТЦ-34-25000-13 [19] было отмечено несрабатывание почти 30 % механических указателей при перегорании быстродействующих предохранителей, установленных последовательно с тиристорами. Для повышения надежности защиты в серии тиристорных систем применен бесконтактный контроль перегорания предохранителей. Основной узел этого устройства защиты – схема бесконтактного контроля числа перегоревших предохранителей (рис. 13). Параллельно каждому из предохранителей П1–П10 подключены тиратроны Л1–Л10. При перегорании предохранителя, например П1, загорается тиратрон Л1, обеспечивая визуальный контроль его перегорания. Стабилизированное по амплитуде напряжение с его анода поступает на вход бесконтактного ключа К1, меняя его состояние таким образом, что напряжение 36 В при частоте 1000 Гц через резистор R1 поступает на резистор R11 и входную обмотку трансформатора.

Напряжение с выхода трансформатора после выпрямления и фильтрации подается через логический элемент ИЛИ в схему ограничения максимально возможного задания тока, остальные входы которой подключены к аналогичным трансформаторам остальных плеч мостов агрегата.

Величина напряжения на резисторе  $R_{11}$ , служащем для подстройки коэффициента трансформации, пропорциональна числу перегоревших предохранителей. Трансформатор осуществляет гальваническую развязку системы управления и силовой части.

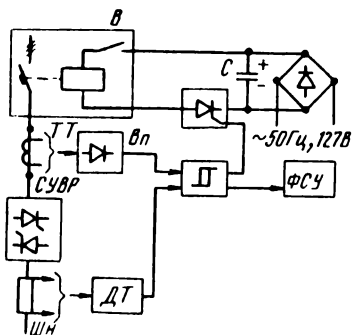


Рис. 12. Функциональная схема защиты от перегрузок и коротких замыканий

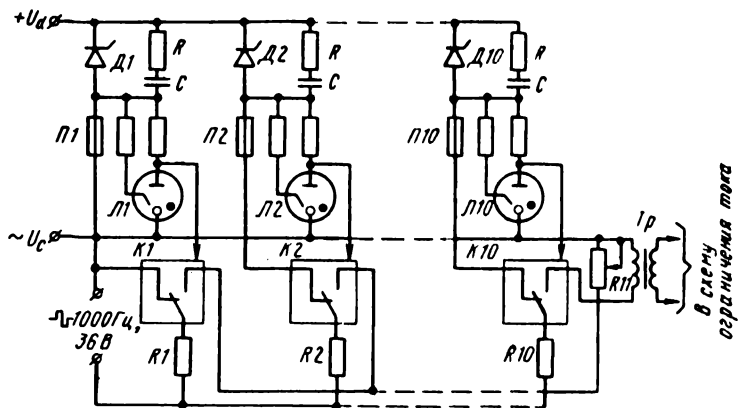


Рис. 13. Принципиальная электрическая схема бесконтактного контроля перегорания предохранителей

Для улучшения коэффициента мощности агрегата в системе управления введено устройство автоматического переключения ступеней напряжения силового трансформатора. Коэффициент мощности агрегата зависит от угла управления тиристорами, который пропорционален напряжению управления. С увеличением угла регулирования коэффициент мощности снижается.

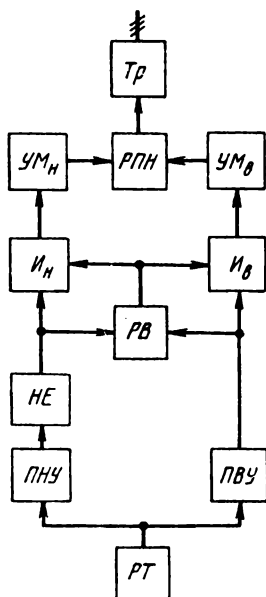
Для обеспечения заданной величины тока агрегата системой автоматического регулирования устанавливается строго определенный угол управления при заданных напряжении силового трансформатора и токе нагрузки. При изменении одной из этих величин происходит изменение угла управления, а следовательно, и коэффициента мощности. Сопротивление цепи нагрузки обусловлено технологическим режимом процесса электролиза, а напряжение силового трансформатора может регулироваться путем переключения отпайек его сетевой обмотки (переключение ступеней напряжения).

Управление приводом переключателя ступеней напряжения осуществляется устройством автоматического переключения ступеней напряжения преобразовательного трансформатора, функциональная схема которого приведена на рис. 14.

С помощью пороговых элементов верхнего и нижнего уровней осуществляется слежение за уровнем напряжения управления, поступающего с регулятора тока. Если напряжение управления превысит порог срабатывания порогового элемента верхнего уровня, соответствующий верхнему уровню оптимальной зоны угла управления, на выходе этого порогового элемента появляется дискретный сигнал. Этот сигнал с выдержкой времени реле времени через схему совпадения  $I_B$  поступает на усилитель мощности  $УМ_B$ . Включается переключатель ответвлений обмоток силового трансформатора под нагрузкой и снижает напряжение трансформатора  $I_p$ , в результате чего угол управления тиристорами смещается в сторону точки естественной коммутации, и коэффициент мощности не снижается.



Если напряжение трансформатора мало и заданный ток нагрузки не может быть обеспечен, то напряжение управления снижается. Когда оно становится меньше порога отпускания порогового элемента нижнего уровня, он отключается. На выходе логической схемы НЕ появляется дискретный сигнал, который с выдержкой времени реле времени приводит к переключению переключателя ответвлений обмоток силового трансформатора под нагрузкой. В результате этого напряжение трансформатора возрастает.



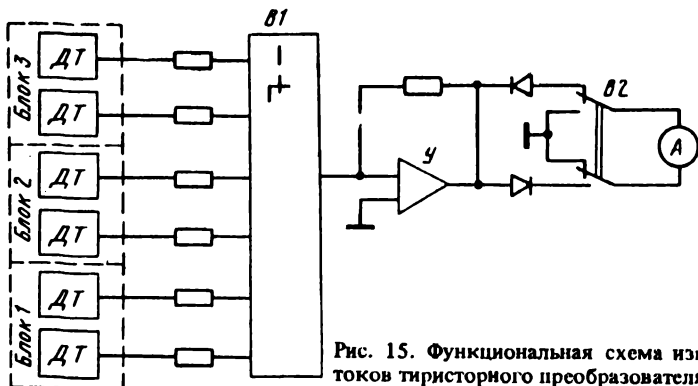
Зона оптимальных углов управления не может устанавливаться уже одной ступени напряжения трансформатора, так как при этом будет непрерывно переключаться переключатель ответвлений обмоток силового трансформатора под нагрузкой, и не должна превышать двух ступеней, так как при этом не полностью используются возможности амплитудного регулирования напряжения. Выбор зоны оптимальных углов шириной в две ступени напряжения трансформатора обеспечивает запас по углу управления для стабилизации заданного тока нагрузки.

Рис. 14. Функциональная схема устройства автоматического переключения ступеней напряжения преобразовательного трансформатора

В соответствии с технологическими требованиями работа агрегата в режиме формирования импульса тока обратного направления может происходить и не в зоне оптимальных углов управления. Для исключения переключения переключателя ответвлений обмоток силового трансформатора под нагрузкой при кратковременном протекании обратного импульса длительность выдержки времени должна несколько превышать наибольшее значение длительности импульса тока нагрузки обратного направления.

Для измерения тока тиристорного агрегата применена специальная схема измерений (рис. 15). Выходы датчиков тока подключены через переключатель В1 к входу суммирующего операционного усилителя. Переключатель В1 позволяет произвести контроль тока каждой секции, блока и всей системы. Переключатель В2 позволяет замерить ток прямого либо обратного направления.

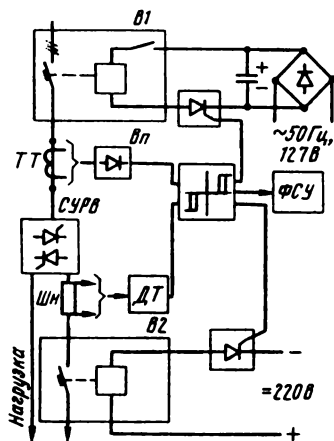
Работа электролизера характеризуется вольтамперной характеристикой. Дальний наклон характеристик в рабочей зоне обуславливает необходимость автоматической стабилизации тока нагрузки, так как даже незначительные колебания напряжения сети приводят к существенному изменению тока. Так, при снижении напряжения на 10 % от номинального значения сила тока электролизера цинка уменьшается на 40 - 50 %.



Особенностью электролизеров как потребителей электрической энергии является наличие обратной э.д.с., которая составляет на электролизерах цинка 75–80 % от номинального напряжения на серии, на электролизерах магния 45 %, алюминия 30 %, никеля 25 %, меди 10 %.

Опыт освоения электролиза цинка нестационарными токами [13] показал, что значительные по величине э.д.с. и энергия, аккумулированная в электролизере, при отсутствии специальной защиты вызывают в тиристорном преобразователе аварии.

При прорывах (однофазных опрощиваниях) инвертора через последовательно включенную пару перешедших в неуправляемый режим плеч выпрямительных мостов агрегата, работающих во время анодного периода, разряжается накоротко закороченный электролизер с током прорыва  $I = E/R$ , где  $R$  — активное сопротивление цепи. В связи с тем, что ток прорыва намного превышает номинальный ток плеча инвертора, предотвратить развитие аварии практически можно лишь разрывом цепи прорыва на стороне постоянного тока. С целью повышения быстродействия защиты при прорывах инвертора и сигнализации характера аварии применяют дифференциальную защиту (рис. 16), реагирующую на разбаланс токов в цепи вентиляльных обмоток силового трансформатора и цепи нагрузки.



При прорыве инвертора сигнал с датчика тока существенно превышает сигнал с трансформаторов тока. Разность этих сигналов отрабатывается знакочувствительным элементом сравнения, и подается команда на дистанционный расцепитель быстродействующего выключателя В1. При внутренних коротких замыканиях сигнал с трансформаторов тока превышает сигнал с датчика тока. Элемент сравнения в этом случае воздействует на сдвиг угла управления фазосмещающих устройств в сторону его максимального значения. В нормальном режиме работы сигналы с датчика тока и трансформаторов тока равны и не воздействуют на исполнительные узлы элементов системы защит. В нереверсивных агрегатах быстродействующие выключатели в цепи нагрузки не устанавливаются.

### 3. Влияние длительности фронтов импульсов тока на технико-экономические показатели работы электролизеров в реверсивном режиме

Основной технико-экономический показатель технологического процесса при электролизе — выход металла по току, определяющий производительность электролизера и удельный расход электроэнергии. Однако до настоящего времени отсутствует единая методика определения этого показателя при реверсивном токе, в связи с чем целесообразно рассмотреть этот вопрос более подробно. В работе [3] выход по току, %, определяется отношением катодного выхода металла к "эффективному току", под которым понимается его среднеалгебраическое значение за период:  $\eta_{\Sigma} = m 100 / g I_{\Sigma} t$  (15), где  $m$  — масса осажденного на катоде металла, г;  $g$  — электрохимический эквивалент металла, г/А·ч;  $t$  — продолжительность электролиза, ч;  $I_{\Sigma} = I_{\text{к}} - I_{\text{а}}$  — "эквивалентный ток", А;  $I_{\text{к}}$  и  $I_{\text{а}}$  — среднее значение катодного и анодного тока за период, А.

Из формулы (15) следует, что величина  $\eta_{\Sigma}$  завышена, так как не учитывается расход количества электричества, зависящий от анодного тока.

В работе [13] выход по току определяется отношением катодного выхода металла к действующему значению тока:  $\eta_{\text{д}} = m 100 / g I_{\text{д}} t$  (16), где  $I_{\text{д}} = K_{\text{ф}} I_{\text{с}}$  — действующее значение тока, А;  $I_{\text{с}}$  — среднее значение тока электролиза за период, А;  $K_{\text{ф}}$  — коэффициент формы.

На основании закона Фарадея действующее значение тока нельзя использовать для расчета количества металла, осажденного за время электролиза. В связи с тем, что  $K_{\text{ф}} > 1$ , действующее значение тока превышает его среднее значение и  $\eta_{\text{д}}$  по формуле (16) занижено.

Возможность интенсификации процесса электролиза путем повышения плотности катодного тока обусловлена деполяризующим и депассивирующим действием анодного тока, т.е. энергия и катодного, и анодного токов выполняет полезную работу. Поэтому расчетное количество металла, которое могло быть осаждено на катоде, должно определяться средним значением общего количества электричества прямого и обратного направлений, потребляемого от источника питания. Выход по среднему значению общего тока:  $\eta_{\text{о}} = m 100 / g I_{\text{о}} t$  (17), где среднее значение общего тока за период  $I_{\text{о}} = I_{\text{к}} + I_{\text{с}}$  (18);  $I_{\text{с}}$  — среднее значение анодного тока за период, потребляемого от источника питания (из питающей сети).

На рис. 17 представлены диаграмма напряжения и нагрузочная токограмма электролизера при питании его от реверсивного тиристорного преобразователя.

Баланс напряжений электролизера на плоских вершинах  $I_{к.м}$  и  $I_{а.м}$  определяют соответственно по формулам:  $U_{к.м} = E + I_{к.м}R$  (19);  $U_{а.м} = -E + I_{а.м}R$  (20), где  $E$  — обратная э.д.с. электролизера, В;  $I_{к.м}$  и  $I_{а.м}$  — амплитудное значение катодного и анодного токов, А;  $R$  — сопротивление электролизера, Ом.

При совпадении полярностей напряжения преобразователя ( $U_{а.м} > > 0$ ) и обратной э.д.с. электролизера из питающей сети потребляется, как следует из формулы (20), лишь часть анодного тока, амплитудное значение которого составляет:  $I_{с.м} = U_{а.м}/R$  (21).

Оставшаяся часть анодного тока  $E/R$  обеспечивается за счет энергии, аккумулированной в электролизере. Емкость его достаточна для создания тока необходимой величины.

При несовпадении полярностей напряжения преобразователя ( $U_{а.м} < < 0$ ) и обратной э.д.с. анодный ток создается за счет энергии, запасенной в электролизере. Часть анодного тока, определяемая формулой (21), рекуперируется в питающую сеть. Из формулы (20) с учетом формулы (21)  $I_{с.м} = \beta I_{а.м}$  (22), где  $\beta = U_{а.м}/(E + U_{а.м})$ .

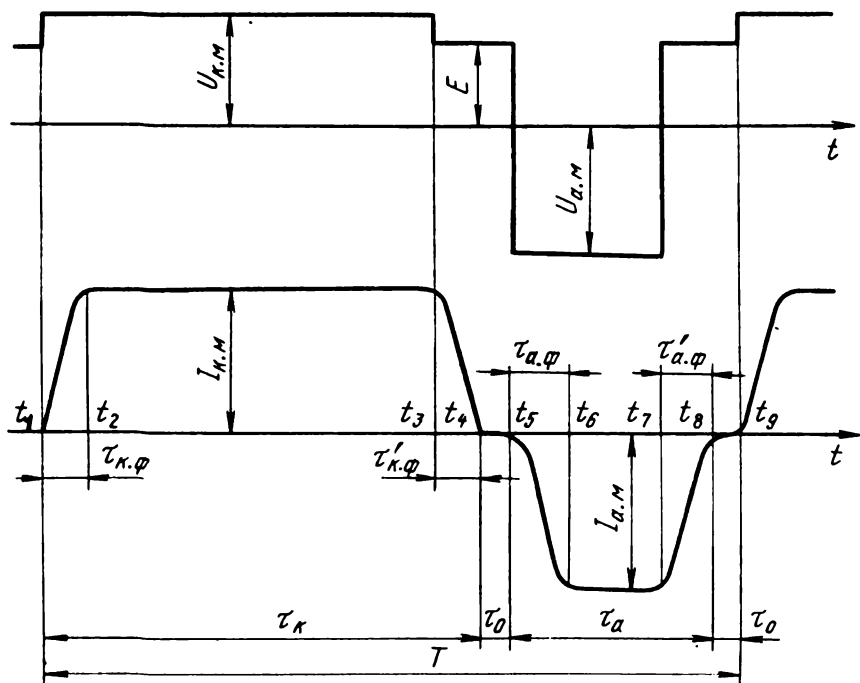


Рис. 17. Диаграмма напряжения и нагрузочная токограмма электролизера в реверсивном режиме

При  $U_{a.m} > 0$  коэффициент  $\beta > 0$ , при  $U_{a.m} < 0$  и  $\beta < 0$ . Обратную э.д.с. можно измерить, как следует из формулы (19), при  $I_{к.м} = 0$  во время бестоковой паузы.

При определении средних значений  $I_k$  и  $I_s$  за период необходим учет длительностей фронтов импульсов тока и бестоковой паузы между ними, величины которых в ряде случаев сравнимы с длительностью импульса тока. Эквивалентный импеданс цепи нагрузки имеет активно-индуктивный характер. Преобладание индуктивного реактанса над емкостным объясняется наличием разветвленной цеховой сети шинопроводов и токоограничивающих реакторов, входящих в состав тиристорного преобразователя.

Среднее значение катодного тока за период

$$I_k = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i_k dt = (\tau_k - \tau_{к.ф})/T, \quad (23)$$

где  $\tau_k, \tau_{к.ф}$  — соответственно длительность импульса и фронта импульса катодного тока, с;  $i_k$  — мгновенное значение катодного тока, А;  $T = \tau_k + \tau_a + 2\tau_0$  — период следования импульсов тока, с;  $\tau_a$  — длительность импульса анодного тока, с;  $\tau_0$  — длительность бестоковой паузы, с.

Среднее за период значение анодного тока, потребляемого из питающей сети:

$$I_s = \frac{1}{T} \int_{t_3}^{t_4} i_s dt = \frac{\tau_a - \tau_{a.ф}}{T} I_{s.m}, \quad (24)$$

где  $\tau_{a.ф}$  — длительность фронта импульсов анодного тока, с;  $i_s$  — мгновенное значение анодного тока, потребляемого из питающей сети, А.

Из формул (22) и (24) имеем:  $I_s = \beta (\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{s.m}/T$ .

Выход по среднему значению общего тока, %:

$$\eta_0 = m T 100/g [I_{к.м} (\tau_k - \tau_{к.ф}) + \beta I_{a.m} (\tau_a - \tau_{a.ф})]. \quad (25)$$

Для частного случая, когда  $-U_{a.m} = -E$ , преобразователь на время  $\tau_a$  заперт и анодный ток равен нулю согласно формуле (20). Через электролизер течет прерывистый ток.

В процессе оптимизации технологических процессов электролиза цинка в нестационарных режимах отмечается тенденция к снижению периода следования импульсов тока (рис. 18). При этом существенную роль начинает играть длительность фронтов импульсов. Фронты импульсов вызывают снижение машинного времени электролизера. Потери машинного времени определяются и тем, что в течение анодного периода  $\tau_a$  катодный осадок растворяется. Необходимое количество электричества для восстановления того же количества металла на катоде в катодном периоде  $\tau_k$  (полагая, что за время бестоковой паузы  $\tau_0$  катодный потенциал не успеет снизиться до начала растворения цинка):  $\tau_B I_{к.м} = (\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{a.m}$ , где  $\tau_B$  — время восстановления на катоде растворенного за анодный период цинка. Время компенсации потерь катодного осадка:  $\tau_B = (\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{a.m}/I_{к.м}$ .

Коэффициент использования машинного времени на реверсивном токе.  
 $M_p = M - \Delta M_p$ , где  $M$  — коэффициент использования машинного времени на постоянном токе;  $\Delta M_p$  — относительная величина потерь использования машинного времени:  
 $\Delta M_p = [(\tau_a - \tau_{a,ф}) (I_{a,м}/I_{к,м}) + \tau_{к,ф} + 2\tau_0] 100/T. \quad (26)$

При технологических режимах работы:  $\tau_k = 10$  с;  $\tau_a = 166$  с;  $\tau_0 = 0,023$  с;  $I_{a,м}/I_{к,м} = 0,85$ ;  $\tau_{a,ф} = 0,046$  с;  $\tau_{к,ф} = 0,14$  с относительная величина потерь использования машинного времени 2,8 %. Этот режим работы поддерживается на Челябинском электролитном цинковом аноде.

Рассмотренные методики определения выхода по току (на основе учета среднего значения тока прямого и обратного направлений и энергии, аккумулированной в электролизере) и потери машинного времени электролизера позволяют более точно определить технико-экономические показатели процесса электроосаждения металлов реверсивным током.

#### 4. Рекомендации по ошиновке тиристорных преобразователей

Тиристорные преобразователи при внедрении на промышленных предприятиях в большинстве случаев монтируют вместо полупроводниковых выпрямительных агрегатов типа ВАКЭЛ, ВАК и др. с максимальным использованием существующего оборудования и ошиновки. При этом системы электроснабжения и переменного, и постоянного тока не анализируют с точки зрения пригодности их для работы в новых условиях (при применении нестационарных режимов работы серий электролизеров). Прежде всего это относится к динамическим параметрам системы питающая сеть — тиристорный преобразователь — серия электролизеров, в частности к длительности фронтов импульсов нестационарного тока, симметричности и протяженности ошиновки трансформатора управляемый выпрямитель.

С целью выработки общих рекомендаций, которые необходимо учитывать при внедрении тиристорных агрегатов питания, обеспечивающих нестационарные режимы работы серий электролизеров, были проведены исследования на Лениногорском электрометаллическом комбинате (на серии электролизеров цинка).

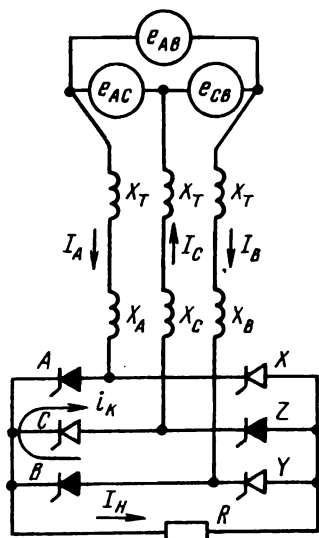


рис. 18 Принципиальная схема цепи коммутации тока управляемого трехфазного выпрямительного моста:

и — индуктивное сопротивление нагрузки;  
 $E_{AB}, E_{AC}$  — э.д.с. вторичных обмоток трехфазного

При  $U_{a.m} > 0$  коэффициент  $\beta > 0$ , при  $U_{a.m} < 0$  и  $\beta < 0$ . Обратную э.д.с. можно замерить, как следует из формулы (19), при  $I_{к.м} = 0$  во время бестоковой паузы.

При определении средних значений  $I_k$  и  $I_s$  за период необходим учет длительностей фронтов импульсов тока и бестоковой паузы между ними, величины которых в ряде случаев сравнимы с длительностью импульса тока. Эквивалентный импеданс цепи нагрузки имеет активно-индуктивный характер. Преобладание индуктивного реактанса над емкостным объясняется наличием разветвленной цеховой сети шинопроводов и токоограничивающих реакторов, входящих в состав тиристорного преобразователя.

Среднее значение катодного тока за период

$$I_k = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i_k dt = (\tau_k - \tau_{к.ф})/T, \quad (23)$$

где  $\tau_k, \tau_{к.ф}$  — соответственно длительность импульса и фронта импульса катодного тока, с;  $i_k$  — мгновенное значение катодного тока, А;  $T = \tau_k + \tau_a + 2\tau_0$  — период следования импульсов тока, с;  $\tau_a$  — длительность импульса анодного тока, с;  $\tau_0$  — длительность бестоковой паузы, с.

Среднее за период значение анодного тока, потребляемого из питающей сети:

$$I_s = \frac{1}{T} \int_{t_3}^{t_4} i_s dt = \frac{\tau_a - \tau_{a.ф}}{T} I_{s.m}, \quad (24)$$

где  $\tau_{a.ф}$  — длительность фронта импульсов анодного тока, с;  $i_s$  — мгновенное значение анодного тока, потребляемого из питающей сети, А.

Из формул (22) и (24) имеем:  $I_s = \beta(\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{s.m}/T$ .

Выход по среднему значению общего тока, %:

$$\eta_0 = m T 100/g [I_{к.м}(\tau_k - \tau_{к.ф}) + \beta I_{a.м}(\tau_a - \tau_{a.ф})]. \quad (25)$$

Для частного случая, когда  $-U_{a.m} = -E$ , преобразователь на время  $\tau_a$  заперт и анодный ток равен нулю согласно формуле (20). Через электролизер течет прерывистый ток.

В процессе оптимизации технологических процессов электролиза цинка в нестационарных режимах отмечается тенденция к снижению периода следования импульсов тока (рис. 18). При этом существенную роль начинает играть длительность фронтов импульсов. Фронты импульсов вызывают снижение машинного времени электролизера. Потери машинного времени определяются и тем, что в течение анодного периода  $\tau_a$  катодный осадок растворяется. Необходимое количество электричества для восстановления того же количества металла на катоде в катодном периоде  $\tau_k$  (полагая, что за время бестоковой паузы  $\tau_0$  катодный потенциал не успеет снизиться до начала растворения цинка):  $\tau_B I_{к.м} = (\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{a.м}$ , где  $\tau_B$  — время восстановления на катоде растворенного за анодный период цинка. Время компенсации потерь катодного осадка:  $\tau_B = (\tau_a - \tau_{a.ф}) I_{a.м}/I_{к.м}$ .

Коэффициент использования машинного времени на реверсивном токе.  
 $M_p = M - \Delta M_p$ , где  $M$  — коэффициент использования машинного времени на постоянном токе;  $\Delta M_p$  — относительная величина потерь использования машинного времени:

$$\Delta M_p = [(\tau_a - \tau_{a.ф}) (I_{a.м}/I_{к.м}) + \tau_{к.ф} + 2\tau_0] 100/T. \quad (26)$$

При технологических режимах работы:  $\tau_k = 10$  с;  $\tau_a = 166$  с;  $\tau_0 = 0,023$  с;  $I_{a.м}/I_{к.м} = 0,85$ ;  $\tau_{a.ф} = 0,046$  с;  $\tau_{к.ф} = 0,14$  с относительная величина потерь использования машинного времени 2,8 %. Этот режим работы поддерживается на Челябинском электролитном цинковом заводе.

Рассмотренные методики определения выхода по току (на основе учета среднего значения тока прямого и обратного направлений и энергии, аккумулированной в электролизере) и потери машинного времени электролизера позволяют более точно определить технико-экономические показатели процесса электроосаждения металлов реверсивным током.

#### 4. Рекомендации по ошиновке тиристорных преобразователей

Тиристорные преобразователи при внедрении на промышленных предприятиях в большинстве случаев монтируют вместо полупроводниковых выпрямительных агрегатов типа ВАКЭЛ, ВАК и др. с максимальным использованием существующего оборудования и ошиновки. При этом системы электроснабжения и переменного, и постоянного тока не анализируют с точки зрения пригодности их для работы в новых условиях (при применении нестационарных режимов работы серий электролизеров). Прежде всего это относится к динамическим параметрам системы питающая сеть — тиристорный преобразователь — серия электролизеров, в частности к длительности фронтов импульсов нестационарного тока, симметричности и протяженности ошиновки трансформатор — управляемый выпрямитель.

С целью выработки общих рекомендаций, которые необходимо учитывать при внедрении тиристорных агрегатов питания, обеспечивающих нестационарные режимы работы серий электролизеров, были проведены исследования на Лениногорском полиметаллическом комбинате (на серии электролизеров цинка).

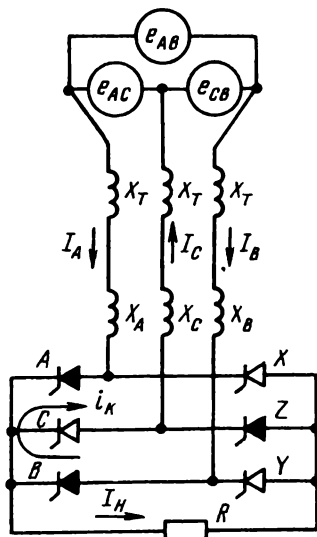


Рис. 18. Принципиальная схема цепи коммутации тока управляемого трехфазного выпрямительного моста:

$R$  — эквивалентное сопротивление нагрузки;  
 $e_{AB}, e_{CB}, e_{AC}$  — э.д.с. вторичных обмоток трансформатора



Влияние параметров ошиновки трансформатор – управляемый выпрямитель на коэффициент мощности тиристорного преобразовательного агрегата. В цепи коммутации тока тиристоров каждого трехфазного выпрямительного моста (рис. 18) можно выделить индуктивные сопротивления обмоток трансформатора  $X_T$  и ошиновки  $X_A, X_B, X_C$ . Практическое влияние при компоновке преобразовательной подстанции в процессе проектирования системы электроснабжения и монтажа можно оказать только на индуктивные сопротивления ошиновки. Поэтому определение степени влияния данных сопротивлений на энергетические показатели работы тиристорного агрегата имеет большое практическое значение.

На осциллограмме (рис. 19) выпрямленного напряжения на выходе двухмостового преобразовательного агрегата  $U_d$  (шины расположены в одной плоскости) показаны углы коммутации  $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$  и углы проводимости  $\lambda_A, \lambda_B$  и  $\lambda_C$ . Наибольшая длительность коммутации наблюдается при переходе с плеча  $B$  на  $A$  (угол коммутации  $\gamma_A$ ) и с  $Y$  на  $X$ , т.е. между тиристорами крайних фаз, имеющих наибольшую индуктивность цепи коммутации. Наименьшая длительность коммутации наблюдается между тиристорами крайних и средней фаз. Начало коммутации определяли по осциллограмме напряжения  $U_{\phi c y}$  в контрольной точке фазосмещающего устройства плеча управляемого выпрямительного моста. Асимметрия углов коммутации составляет около 40 %.

Реактивность цепи короткого замыкания при коммутации тока тиристоров определяют по формуле [14]:  $u_k = (1 - \cos \gamma) / I_{d*} (27)$ , где  $I_{d*} = I_d / I_{dH}$  – ток нагрузки, отн. ед.

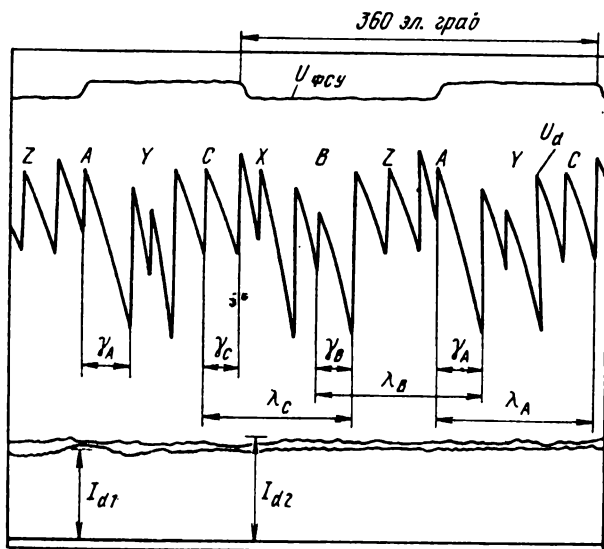


Рис. 19. Осциллограммы выпрямленного напряжения на шинах тиристорного агрегата и токов выпрямительных мостов при номинальной нагрузке:

$I_{d1}, I_{d2}$  соответственно ток нагрузки 1-го и 2-го управляемых выпрямительных мостов

Реактивное сопротивление цепи коммутации:  $X_K = U_{2H} \omega L / I_{2H}$  (28), где  $U_{2H}$  — действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, В;  $I_{2H}$  — номинальное значение тока фазы преобразовательного трансформатора А.

Падение напряжения от коммутационного тока  $i_K$  (см. рис. 19) на участке перекрытия вентилей:  $\Delta U_\gamma = I_d X_K m / 2\pi$  (29), где  $m$  — фазность схемы выпрямления.

Расчеты показывают, что математические ожидания  $\bar{u}_K$  реактивности цепи короткого замыкания при коммутации тока тиристоров равны 0,15 – 0,29, а относительное падение напряжения на участках перекрытия вентилей составляет 17–33 % от номинального значения напряжения обмотки трансформатора.

Для этих предельных значений на рис. 20 по формуле (27) построены кривые зависимости угла коммутации от относительного значения тока нагрузки.

Если выпрямительные мосты совместить с трансформатором (реактивные сопротивления фаз ошиновки  $X_A = X_B = X_C = 0$ ), реактивность цепей коммутации будет равна  $u_K$  трансформатора, которое составляет 0,06 – 0,087. На рис. 21 построена также кривая функции  $\chi = f(I_{d*})$  при  $\bar{u}_K = 0,06$ , которая является для данной установки нижним пределом значений  $\chi$ .

Анализ кривых показывает, что реактивное сопротивление ошиновки увеличивает угол коммутации в 1,7–2,25 раза. Значительные по величине углы коммутации и их асимметрия обуславливают низкий коэффициент мощности преобразовательного агрегата  $\chi$ . На рис. 21 приведены кривые зависимости коэффициента мощности агрегата в стационарных режимах от относительного значения тока нагрузки. Кривая 1 показывает изменение  $\chi$  в режиме прямого тока при  $\bar{u}_K = 0,15 \div 0,29$ , а кривая 1' — при улучшенной ошиновке (математические ожидания реактивности цепи короткого замыкания  $\bar{u}_K = 0,09 \div 0,12$ ). Кривые 2, 2' соответственно отображают изменения  $\chi$  в режиме обратного тока при тех же значениях  $\bar{u}_K$ .

В режиме прямого тока совершенствование ошиновки позволило увеличить  $\chi$  в среднем на 0,14, а в режиме обратного тока на 0,11. В ревер-

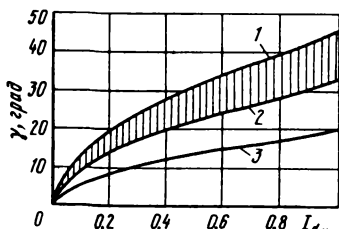


Рис. 20. Зависимость угла коммутации тиристоров от относительного значения тока нагрузки при различных значениях реактивности цепи короткого замыкания  $\bar{u}_K$ :

1 — 0,29; 2 — 0,15; 3 — 0,06

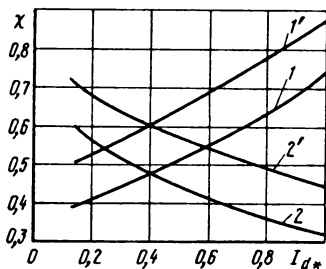


Рис. 21. Зависимость  $\chi = f(I_{d*})$  при различных значениях реактивности цепи коммутации тока в стационарных режимах при прямом (1, 1') и обратном (2, 2') направлениях тока

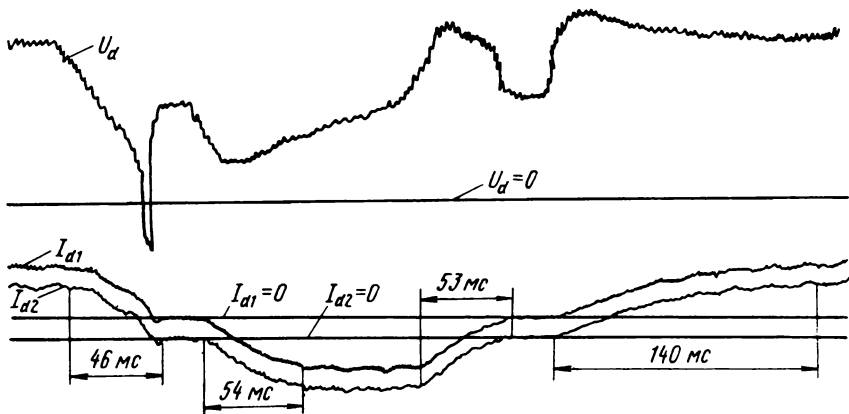


Рис. 22. Осциллограммы напряжения и тока серии электролизеров цинка при реверсе:

$I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  – соответственно ток нагрузки 1-го и 2-го управляемых выпрямительных мостов

сивном режиме при длительности прямого тока 40 с и обратного 0,2 с коэффициент мощности увеличился от 0,78 до 0,89. Коэффициент мощности определяли по показаниям электродинамических счетчиков активной и реактивной энергии [15].

Проведенные исследования показали, что параметры ошиновки трансформатор – управляемый выпрямитель оказывают большое влияние на углы коммутации и коэффициент мощности агрегата. Для улучшения энергетических показателей работы серий электролизеров с нестационарными токами выпрямительные мосты необходимо совмещать с силовым

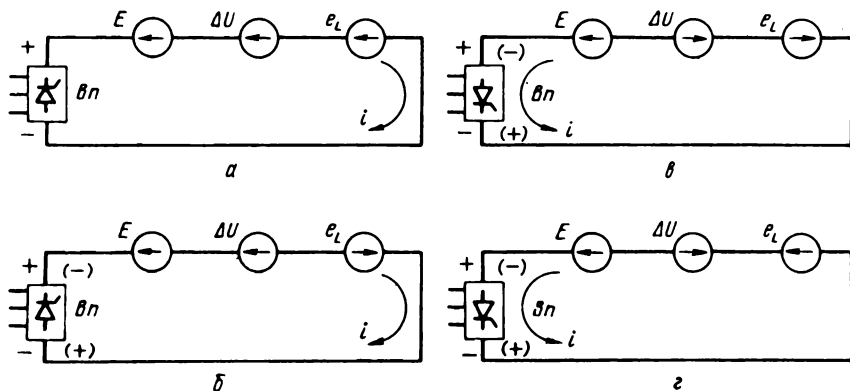


Рис. 23. Эквивалентные схемы замещения серии электролизеров в переходных режимах:

*а* – нарастание импульса прямого тока; *б* – уменьшение импульса прямого тока; *в* – нарастание импульса обратного тока; *г* – уменьшение импульса обратного тока; Вп – управляемый трехфазный выпрямитель;  $\Delta U$  – падение напряжения на эквивалентном активном сопротивлении контура тока

трансформатором. Из обзора зарубежной литературы [16] также видно, что совмещенные преобразовательные агрегаты типа "ректиформер" в настоящее время находят все большее применение при электролизе цветных металлов.

*Влияние параметров цепи постоянного тока на длительность фронтов импульсов тока серии электролизеров.* Из анализа осциллограмм напряжения и тока серии электролизеров цинка (рис. 22) следует, что длительности фронтов импульсов нарастания обратного тока, спадания прямого и обратного тока примерно одинаковы, т.е.  $\tau'_{к.ф} \approx \tau_{а.ф} \approx \tau'_{а.ф}$  (см. рис. 18). Большая длительность фронта импульса прямого тока обусловлена влиянием э.д.с. серии электролизеров. Мгновенное значение тока при нарастании импульса прямого тока (рис. 23, а) определяют по формуле:  $i = (U_d - E - e_L)/R$  (30), где  $U_d$  — выпрямленное напряжение агрегата, В;  $E$  — э.д.с. серии электролизеров, В;  $e_L$  — э.д.с. самоиндукции контура протекания тока, В;  $R$  — эквивалентное активное сопротивление контура тока, Ом.

Так как  $E \approx 0,8 U_d$ , то  $U_d - E - e_L \leq 0,2 U_d$ , что ограничивает скорость нарастания тока. Увеличение напряжения на выходе агрегата в этот период для сокращения длительности нарастания тока нецелесообразно из-за ухудшения коэффициента мощности агрегата. Кроме того, необходимо учитывать, что в ряде случаев приходится специально снижать быстродействие регулятора тока из-за недостаточной динамической прочности ошиновки.

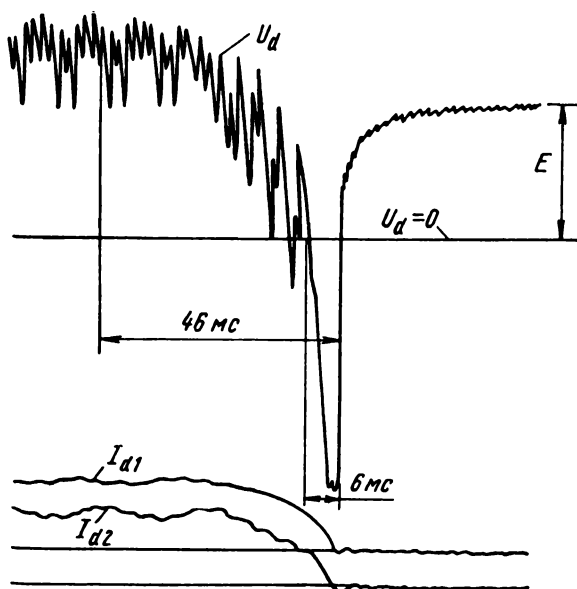


Рис. 24. Осциллограммы выпрямленного напряжения и токов выпрямительных мостов, иллюстрирующие формирование заднего фронта импульса прямого тока

При уменьшении импульса прямого тока за время  $\tau'_{к.ф}$  э.д.с. самоиндукции системы электроснабжения вычитается из противо-э.д.с. электролизеров (рис. 23, б). При этом мгновенное значение напряжения понижается и при  $U_{к.м} \leq E$  меняет знак на противоположный. Происходит инвертирование энергии, запасенной в индуктивности системы электроснабжения в питающую сеть. Мгновенное значение тока определяют по формуле:  $i = (U_{к.м} - E + e_L)/R$  (31).

Ток прекратится, когда  $U_{к.м} - E = -e_L$ . Время заднего фронта импульса прямого тока значительно меньше времени переднего фронта импульса. На рис. 24 показаны осциллограммы напряжений  $U_d$  и токов выпрямительных мостов, иллюстрирующие формирование заднего фронта импульса прямого тока.

При импульсе обратного тока за время  $\tau_{а.ф}$  источником энергии является электролизер, который представляет собой аккумулятор энергии с  $E \approx 0,8 U_d$ . Выпрямительные мосты работают в инверторном режиме.

Мгновенное значение тока (см. рис. 23, в) определяют из выражения:  $i = (E - U_{а.м} - e_L)/R$  (32), где  $U_{а.м}$  — установившееся значение напряжения импульса обратного тока, В.

При уменьшении величины обратного тока за время  $\tau'_{а.ф}$  э.д.с. самоиндукции складывается с э.д.с. электролизеров (см. рис. 23, г), и мгновенное значение тока определяют по формуле:  $i = (E - U_{а.м} + e_L)/R$  (33).

Этот режим является опасным, так как при большой крутизне заднего фронта импульса обратного тока возникает бросок напряжения, равный  $E + e_L$ , который может привести к прорыву инвертора. Уменьшить крутизну заднего фронта импульса обратного тока можно за счет уменьшения  $e_L$ , т.е. индуктивности системы электроснабжения.

Для определения влияния индуктивности системы электроснабжения постоянного тока на длительность фронтов импульсов тока было проведено сравнение их с постоянной времени системы электроснабжения постоянного тока  $T_H$ . Ее определяли по осциллограмме переходных процессов нарастания тока нагрузки при включении напряжения на серии и отключенной отрицательной обратной связи по току в системе автоматического регулирования тока нагрузки [9].

При типовой системе электроснабжения постоянного тока, которую применяют в настоящее время для питания серий электролизеров стационарными токами, имеем:  $\tau_{к.ф} = 5,7 T_H$ ;  $\tau'_{к.ф} = 2 T_H$ ;  $\tau_{а.ф} \approx \tau'_{а.ф} \approx 2,1 T_H$ .

При максимально возможном приближении реверсивного тиристорного агрегата к серии электролизеров цинка постоянная времени уменьшилась примерно в 1,5 раза. Минимальные значения длительности фронтов импульсов тока, выраженные через  $T_H$ , составляют:  $\tau_{к.ф} \approx 3 T_H$ ;  $\tau_{а.ф} \approx \tau'_{а.ф} \approx \tau'_{к.ф} \approx 1,5 T_H$ . Расчеты по формуле (26) показывают, что относительная величина потерь использования машинного времени серии электролизеров цинка при измененной системе электроснабжения снижается почти в 2 раза.

Таким образом, при внедрении нестационарных режимов работы серий электролизеров необходимо стремиться максимально приблизить к

ним реверсивный тиристорный агрегат и обеспечить достаточную динамическую прочность ошиновки.

### 5. Показатели качества электрической энергии в системах электроснабжения действующих предприятий с мощными преобразовательными агрегатами

Приемники электрической энергии имеют наилучшие технико-экономические показатели при определенных показателях качества электрической энергии. Поэтому ГОСТ 13109–67 нормируются: отклонение и колебание частоты, отклонение и колебание напряжения, несимметрия напряжений основной частоты, несинусоидальность формы кривой напряжения.

Преобразовательные агрегаты питания серий электролизеров снижают показатели качества электрической энергии в системе электроснабжения (кроме отклонения и колебания частоты) из-за того, что ток, потребляемый ими, имеет форму, близкую к прямоугольной, и наряду с синусоидой основной частоты содержит гармоники более высоких частот, а также из-за резких изменений потребления активной и реактивной мощности в нестационарных режимах работы серий электролизеров.

*Отклонения и колебания частоты.* Отклонение частоты от номинального значения в нормальном режиме работы ГОСТом допускается в пределах  $+0,1$  Гц, а при временной работе энергетической системы — в пределах  $\pm 0,2$  Гц. Колебания частоты не должны превышать  $0,2$  Гц сверх допустимых отклонений.

Исследования, проведенные на предприятиях Казахстана и Урала, показали, что отклонения частоты в часы максимальных нагрузок энергосистемы с вероятностью  $0,95$  находятся в пределах  $0,07$ – $0,5$  Гц. Наибольшее снижение частоты (до  $0,9$  Гц) наблюдается в некоторых системах электроснабжения в осенне-зимний период при дефиците электрической энергии.

*Отклонение напряжения* в системах электроснабжения зависит от режимов работы полупроводниковых выпрямительных агрегатов, на которые влияет множество случайных факторов [17, 18]:

$$V \approx Q/S_{\text{к.з}}(1 + 0,5 K_{\text{нс}}), \quad (34)$$

где  $Q$  — реактивная мощность, потребляемая преобразовательной подстанцией;  $S_{\text{к.з}}$  — мощность трехфазного короткого замыкания на шинах преобразовательной подстанции;  $K_{\text{нс}}$  — коэффициент несинусоидальности напряжения.

Отклонения напряжения измеряли статистическими анализаторами напряжения типа САН-1 в течение характерного времени и оценивали на основе методов математической статистики и теории вероятностей [2].

Вероятность отклонений напряжения в системах электроснабжения с мощными сериями электролиза составляет:

$$p(-5 \% < V < 5 \%) = 0,67; \quad p(-5 \% < V < 10 \%) = 0,92. \quad (35)$$

В условиях нормальной работы ГОСТом допускаются следующие предельные значения отклонений от номинального напряжения: на зажимах

приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения от  $-2,5$  до  $+5,0$  %; на зажимах электрических двигателей и аппаратов для их пуска и управления от  $-5$  до  $+10$  %; на зажимах остальных приемников электрической энергии  $\pm 5$  % от номинального значения. Указанные значения относятся к величинам, определяемым за период времени порядка месяца с интегральной вероятностью 95 %.

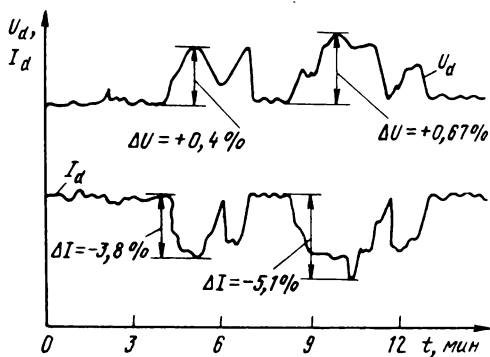


Рис. 25. Диаграммы изменения напряжения и силы тока серии электролизеров алюминия при возникших последовательно анодных эффектах на двух электролизерах

Сравнивая уравнения (35) с требованиями ГОСТа, можно видеть, что отклонения напряжения в общем случае отличаются от нормируемых значений.

**Колебания и посадки напряжения.** Разница между наибольшим и наименьшим значениями напряжения в процессе достаточно быстрого измерения параметров режима системы электроснабжения, когда скорость изменения напряжения не меньше  $1\%/с$ , характеризует колебания напряжения. Такие режимы в системах электроснабжения со стационарными режимами работы серий электролиза меди, цинка, никеля возникают при тяжелых пусках высоковольтных электродвигателей приводов: технологических насосов при наличии противодавления, дробилок и мельниц, забитых сырьем и пр., а также при работе отдельных электрических печей. Кроме этого, при электролизе алюминия в течение  $0,1-0,3$  с увеличивает активное сопротивление электролита в несколько раз (анодный эффект), при этом напряжение на ванне повышается от  $4-5$  до  $30-50$  В, ток уменьшается. На рис. 25 приведены диаграммы изменения напряжения и силы тока серии при анодных эффектах. Показаны два случая анодных эффектов, последовавших один за другим на разных электролизерах серии.

Одновременное протекание анодных эффектов на  $3-5$  электролизерах серии вызывает снижение тока в серии на  $10-15$  % и колебания напряжения на шинах  $10,5$  кВ преобразовательной подстанции до  $1,5$  %.

Внедрение нестационарных режимов работы серий электролизеров меди и цинка изменяет спокойный характер нагрузки преобразовательных подстанций. При скорости изменения выпрямительного тока серии

$$di_d/dt = (10 - 20) I_d/c \quad (36)$$

в течение  $0,05-0,14$  с происходят изменения потребления активной и реактивной мощности и величины напряжения на шинах преобразовательной подстанции.

По данным исследований, проведенных на комбинате "Уралэлектромедь" и Лениногорском цинковом заводе, вероятность нахождения величины отклонений напряжения  $V_t$  в пределах требований ГОСТ 13109 67 (допустимая величина колебания напряжения определяется 1,5 %) составляет:  $p(V_t \leq 1,5 \%) = 0,87$ .

Комитет 19-й Международной конференции по большим энергетическим системам (СИГРЭ) рекомендует внезапные и быстрые изменения напряжения по амплитуде свыше 20 % от номинального значения относительно к посадкам напряжения.

Основная причина, вызывающая посадки напряжения в рассматриваемых системах электроснабжения, — их недостаточная надежность. При несинусоидальном напряжении из-за значительных токов замыкания на землю свыше 60 % всех однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения перерастает в двух- и трехфазные короткие замыкания (см. гл. V). Этому также способствует несоответствие исполнений некоторых электрических двигателей и кабельных сетей условиям окружающей среды, интенсивное загрязнение изоляции открытых токопроводов напря-

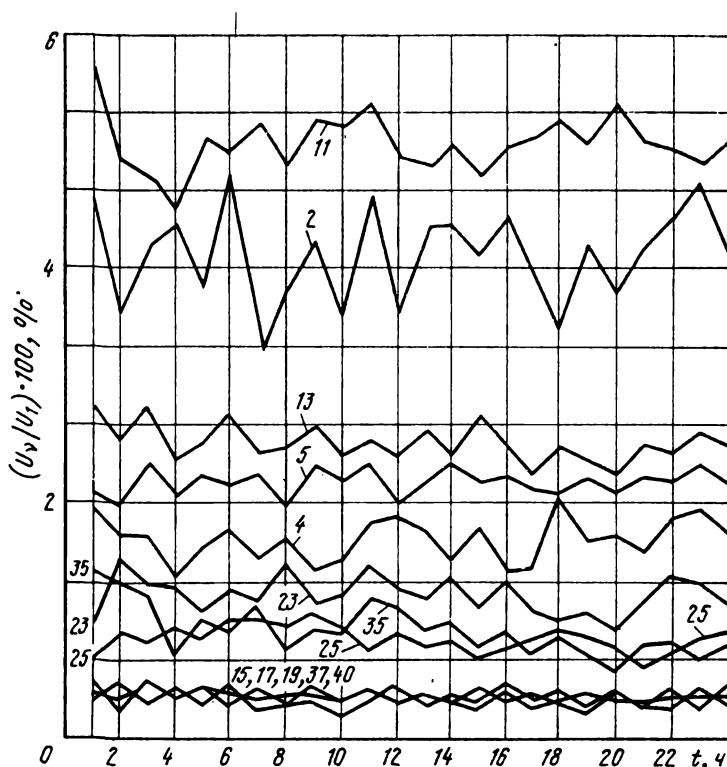


Рис. 26. Суточные графики изменения гармоник напряжения (фаза С) на шинах переменного тока напряжением 10,5 кВ преобразовательной подстанции серии электролизеров магния



жением 6–35 кВ и ОРУ 110–220 кВ, расположенных на территориях предприятий.

Математическое ожидание посадок напряжения, обусловленное короткими замыканиями на фидерах систем электроснабжения алюминиевых заводов, составляет:  $M V_f \approx 0,07 \text{ год}^{-1}$ .

*Несимметрия напряжения основной частоты.* Несимметрия трехфазной системы напряжений характеризуется величиной напряжения обратной последовательности основной частоты, выраженной в процентах от номинального напряжения. Напряжение обратной последовательности не должно превышать 2 %.

Несимметрия напряжения возникает из-за неравномерной нагрузки по фазам, которую создают однофазные приемники электрической энергии и несимметричные многофазные. В системах электроснабжения электролизных производств значительное влияние на коэффициент несимметрии напряжения оказывает конструктивная несимметрия ошиновки (шины переменного тока от вторичных обмоток преобразовательного трансформатора до трехфазных выпрямительных мостов расположены в одной плоскости). Индуктивность контура коммутации вентилей обеих крайних фаз превышает индуктивность контура коммутации вентилей крайней и средней фаз в 1,5–2 раза. В результате этого происходит неравномерная (несимметричная) нагрузка трансформатора по фазам.

Несимметрия напряжения обнаружена практически во всех системах электроснабжения электролизных производств. С вероятностью 0,95 коэффициент несимметрии напряжения в системах электроснабжения предприятий отрасли находится в пределах 0,2–1,8 %.

*Несинусоидальность кривой напряжения* в системе электроснабжения характеризуется коэффициентом несинусоидальности напряжения, который определяют по формуле

$$K_{\text{НС}} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^{\infty} U_{\nu}^2 / U_1} \approx \sqrt{\sum_{\nu=2}^n U_{\nu}^2 / U_{\text{Н}}}, \quad (37)$$

где  $U_1$ ,  $U_{\nu}$  — соответственно действующие значения 1-й и  $\nu$ -той гармоник напряжения, В;  $n$  — номер последней из учитываемых гармоник;  $U_{\text{Н}}$  — номинальное напряжение, В.

Коэффициент несинусоидальности напряжения в системах электроснабжения не должен превышать 5 %.

Для определения влияния на форму напряжения в системе электроснабжения преобразовательных агрегатов были проведены специальные исследования на предприятиях. Коэффициент несинусоидальности напряжения измеряли с помощью анализатора несинусоидальности типа АН-У4-1Р41 и измерителя нелинейных искажений типа С6-5. Исследование состава высших гармоник напряжения проводили с помощью анализатора спектра частотных характеристик типа АСЧХ-26, а также анализатора спектра типа С4-48.

Несинусоидальность напряжения обнаружена во всех системах электроснабжения серии электролизеров цветных металлов.

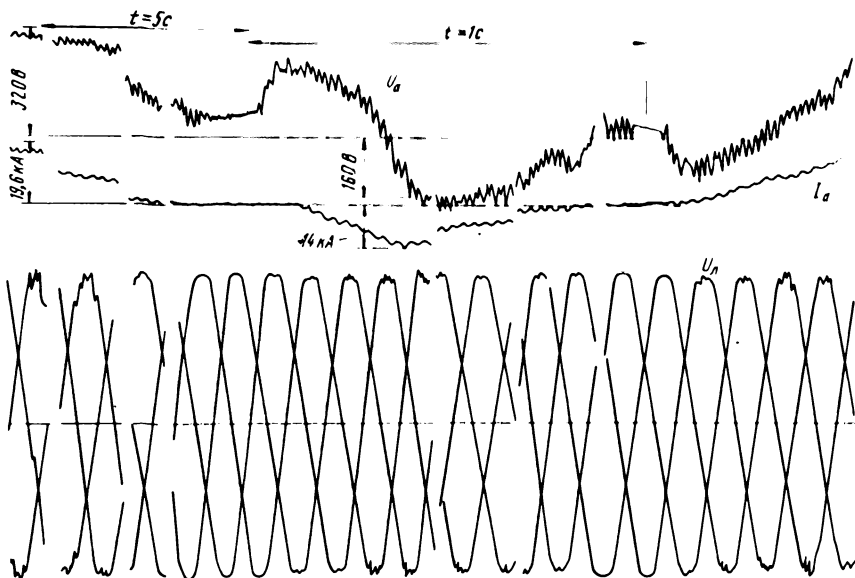


Рис. 27. Осциллограммы тока и напряжения серии электролизеров меди на шинах переменного тока напряжением 6,3 кВ преобразовательной подстанции

На рис. 26 показаны суточные графики изменения гармоник напряжения (цифры на кривых) на шинах 10,5 кВ преобразовательной подстанции серии электролизеров магния, укомплектованной полупроводниковыми выпрямительными агрегатами. На рис. 27 даны осциллограммы тока нагрузки  $I_d$ , напряжения на серии  $U_d$  и линейного напряжения  $U_n$  на шинах 6,3 кВ преобразовательной подстанции серии электролизеров меди комбината "Уралэлектромедь" при нестационарном режиме работы. Осциллограмма и спектрограмма напряжения при прямом токе серии электролизеров представлены на рис. 28, а и б.

Исследования показали, что коэффициент несинусоидальности напряжения на предприятиях отрасли составляет 3,7–12,7 %. Причем на предприятиях с мощными сериями электролизеров  $K_{НС} > 5$  %, т.е. превышает допустимые ГОСТом значения.

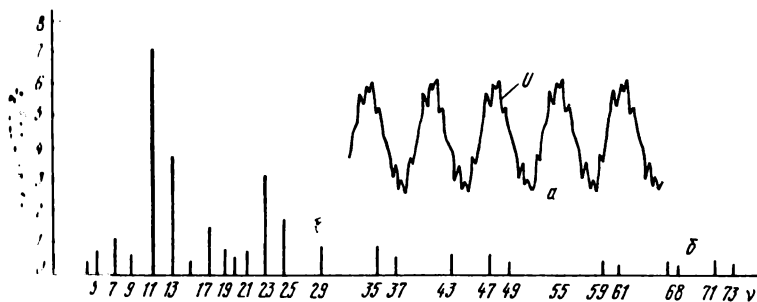


Рис. 28. Осциллограмма (а) и спектрограмма напряжения (б) на шинах преобразовательной подстанции серии электролизеров меди при прямом токе

## 6. О резонансе тока в системах электроснабжения переменного тока серий электролизеров цветных металлов

В системах электроснабжения серий электролизеров магния, цинка, меди и никеля для компенсации реактивной мощности применяют конденсаторы типов КС 2, КСК, КСБП и др. Для серий электролизеров алюминия такая компенсация не предусматривается.

Особенности допустимых условий работы конденсаторов при несинусоидальном напряжении и вопросы проектирования установки батарей конденсаторов в системах электроснабжения с тиристорными преобразовательными установками описаны достаточно подробно [17—19]. Однако анализ совместимости систем электроснабжения серий электролизеров цветных металлов и конденсаторных батарей в литературе отсутствует.

Между тем на предприятиях отрасли из-за резонансных явлений в системах электроснабжения при подключенных конденсаторных батареях наблюдается массовый выход их из строя. Например, на Березниковском титано-магнелийском комбинате выходит из строя за один год 1/6 часть установленных конденсаторов, на Усть-Каменогорском титано-магнелийском комбинате 1/9 часть.

В связи с изложенным, прежде чем принимать техническое решение о способе компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения, необходимо выяснить, можно ли избежать резонанса тока в системе электроснабжения серии электролизеров путем изменения мощности конденсаторной батареи и параметров системы электроснабжения.

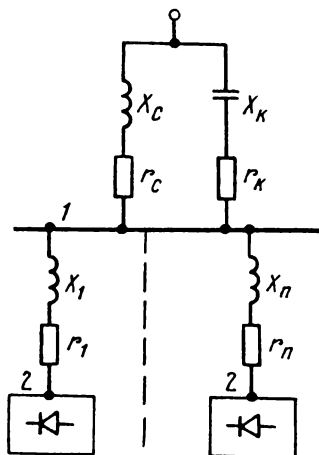


Рис. 29. Схема замещения системы электроснабжения серии электролизеров магния

Рассмотрим частотные характеристики системы электроснабжения серии электролизеров магния, схема замещения которой приведена на рис. 29. Здесь  $X_1$  и  $X_n$  — соответственно индуктивное сопротивление цепи преобразователя 1 и n;  $r_1$  и  $r_n$  — соответственно активное сопротивление цепи преобразователя 1 и n;  $X_c$  — эквивалентное индуктивное сопротивление питающей сети на основной частоте;  $X_K$  — емкостное сопротивление конденсаторной батареи на основной частоте;  $r_K$  — номинальное реактивное сопротивление цепи батареи конденсаторов на основной частоте;  $r_c$  — суммарное активное сопротивление питающей сети на основной частоте.

Комплексное сопротивление резонансного  $L-C$  контура для  $\nu$ -й гармоники определяют по формуле

$$Z_\nu = (r_c + j X_{c\nu}) (r_K - j X_{K\nu}) / (r_c + r_K) + j (X_{c\nu} - X_{K\nu}), \quad (38)$$

где  $X_{C\nu}$  — эквивалентное индуктивное сопротивление питающей сети для  $\nu$ -той гармоники;  $X_{K\nu}$  — емкостное сопротивление конденсаторной батареи для  $\nu$ -й гармоники.

Учитывая, что  $X_{C\nu} = X_C \nu$ ,  $X_{K\nu} = X_K / \nu$ , и преобразовывая выражение (38), получаем выражение для определения модуля комплексного импеданса резонансного  $L$ — $C$  контура в точке 1 (рис. 29):

$$Z_\nu = \sqrt{\left[ \frac{(r_c + r_k) r_c r_k + \nu^2 X_c^2 r_k + X_k^2 r_c / \nu^2}{(r_c + r_k)^2 + (\nu X_c - X_k / \nu)^2} \right]^2 + \left[ \frac{X_c X_k (X_k / \nu - \nu X_c) + \nu r_k^2 X_c - r_c^2 X_k / \nu^2}{(r_c + r_k)^2 + (\nu X_c - X_k / \nu)^2} \right]^2}. \quad (39)$$

Для мощных преобразовательных подстанций отношение  $X_c / r_c$  составляет в нормальном режиме 25—50, при аварийных ситуациях или при введении ограничения электропотребления оно может уменьшаться.

По уравнению (39) на рис. 30 построены частотные характеристики системы электроснабжения титано-магниевого комбината при включенной конденсаторной батарее мощностью 2181 квар для номинальной схемы электроснабжения ( $X_c = 1,28 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $r_c = 0,001$  Ом) и аварийной ( $X_c = 3,18 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $r_c = 0,017$  Ом). Сравнивая частотные характеристики, следует отметить, что при изменении схемы электроснабжения резонансные явления в системе электроснабжения не исчезают, изменяется только резонансная частота с 950 на 550 Гц. Импеданс параллельного контура на резонансной частоте резко увеличивается: при  $f_p = 950$  Гц,  $Z_\nu / Z_1 = 6310$ , при  $f_p = 550$  Гц  $Z_\nu / Z_1 = 244,7$ .

На рис. 31 показана зависимость резонансной частоты от мощности конденсаторной батареи при номинальной схеме системы электроснабжения. Видно, что с увеличением мощности конденсаторной батареи резонансная частота снижается.

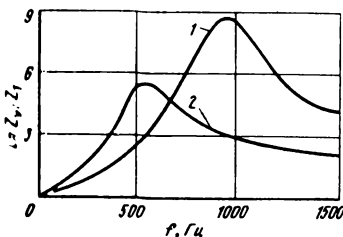


Рис. 30. Частотные характеристики системы электроснабжения серии электролизеров магния: 1 — номинальная схема электроснабжения; 2 — аварийная

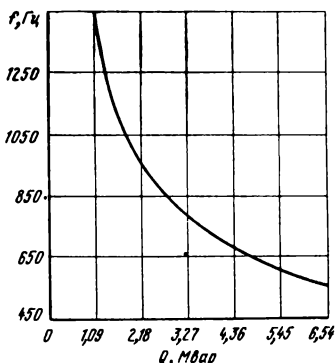


Рис. 31. Зависимость резонансной частоты  $f$  от мощности конденсаторной батареи  $Q$  в системе электроснабжения титано-магниевого комбината

Напряжения гармоник резонансных частот в точке 1 (см. рис. 29) при резонансе тока увеличиваются, так как падения напряжений на сопротивлении преобразовательного трансформатора от токов резонансных частот, генерируемых полупроводниковыми преобразовательными агрегатами, уменьшаются. Напряжения гармоник резонансных частот в точке 2 (см. рис. 29) почти полностью приложены к батарее конденсаторов.

Конденсаторы — неремонтируемое оборудование, которое эксплуатируется до первого отказа, поэтому одной из наиболее важных характеристик надежности является долговечность.

В настоящее время не существует теоретических моделей отказов конденсаторов, достаточных для определения интенсивности отказов  $\lambda$  конденсаторов и интегральной функции плотности распределения долговечности  $F(t)$  для различных условий эксплуатации [20]. Единственно верное средство определения этих функций — экспериментальная оценка их в реальных условиях.

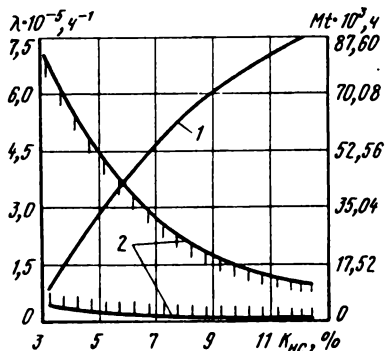


Рис. 32. Зависимости интенсивности отказов (кривая 1) и границ доверительного интервала математического ожидания продолжительности работы конденсатора при доверительной вероятности 0,9 (кривые 2) от коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_{НС}$

В связи с этим испытанию подвергали батарею конденсаторов типа КС 2 на преобразовательной подстанции серии электролизеров магния. Наблюдение за работой при определенном коэффициенте несинусоидальности продолжали до первых двух-трех случаев повреждения конденсаторов. Это небольшое число фиксированных отказов связано с трудностями поддержания более длительное время заданного значения  $K_{НС}$ .

В силу случайности процессов старения и причин отказов конденсаторов при несинусоидальном напряжении функция  $\lambda$  является случайной. Статистический анализ отказов конденсаторов при несинусоидальном напряжении показывает, что  $\lambda$  — постоянная величина, а интегральная функция плотности распределения долговечности  $F(t)$  подчиняется экспоненциальному закону [20].

Математическое ожидание безотказной работы конденсатора определяют по формуле:  $Mt = 1/\lambda$  (40).

Вероятность безотказной работы конденсатора за период  $t$  равна

$$p(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda dt \right\}. \quad (41)$$

Плотность распределения долговечности конденсатора:  $f(t) = p(t)\lambda$  (42).

Интегральная функция распределения долговечности:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - p(t). \quad (43)$$

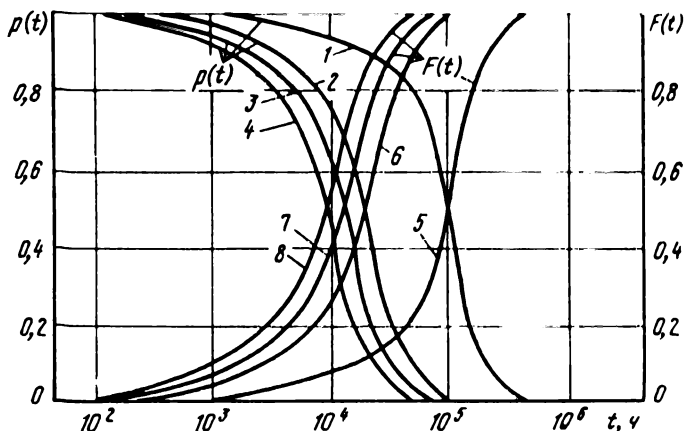


Рис. 33. Зависимость вероятностей безотказной работы конденсаторов и их интегральных функций распределения от коэффициента несинусоидальности  $K_{Hc}$ , %:

1, 5 – 3,2; 2, 6 – 5,7; 3, 7 – 8,85; 4, 8 – 12,4

Данные испытаний и расчетов по формулам (40)–(43) приведены на рис. 32 и 33.

На рис. 32 показаны изменения интенсивности отказов (кривая 1) и границ доверительного интервала математического ожидания продолжительности работы конденсаторов при доверительной вероятности 0,9 (кривые 2) в зависимости от  $K_{Hc}$ .

На рис. 33 представлена зависимость вероятностей безотказной работы конденсаторов  $p(t)$  и их интегральных функций распределения  $F(t)$  от  $K_{Hc}$ . Кривые 2–4 функции  $p(t)$  и 6–8 –  $F(t)$  располагаются близко друг к другу. Вероятности безотказной работы конденсатора при 12,4 %  $\geq K_{Hc} \geq 5,7$  % мало отличаются. Это свидетельствует о том, что токи высших гармоник, проходящие через конденсатор при 12,4 %  $\geq K_{Hc} \geq 5,7$  %, почти одинаково пагубно влияют на долговечность конденсатора. Вероятность безотказной работы конденсатора за 10 лет при этих значениях  $K_{Hc}$  равна нулю, а при  $K_{Hc} = 3,2$  % она составляет 0,67.

При дефектации поврежденных конденсаторов обнаружено их вспучивание, шелушение окраски на боковых стенках, что указывает на возникновение высокой температуры внутри конденсаторов. Причиной повышения температуры внутри конденсатора являются тепловыделение в активном сопротивлении диэлектрика, корпусной изоляции, токоведущих и цетоконвдущих металлических частях конденсатора, находящегося в магнитном поле рабочего тока, а также вибрация обкладок, электрострикционные явления.

Мощность тепловыделения при несинусоидальном напряжении можно определить по формуле

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} (I_{\nu}^2 \operatorname{tg} \delta(\omega) / \nu 2 \pi f C(\omega)), \quad (44)$$

где  $\operatorname{tg} \delta(\omega)$  и  $C(\omega)$  — соответственно тангенс угла диэлектрических потерь и емкость конденсатора при частоте  $\nu f$ .

Для бумажных конденсаторов с обкладками из фольги, пропиткой хлорированными дефинилами наблюдается слабая зависимость  $\operatorname{tg} \delta(\omega)$  и  $C(\omega)$  от температуры. Поэтому их изменения при расчетах учитывать нецелесообразно.

Расчеты, выполненные по формуле (44), показали, что мощность тепловыделения при  $5,7\% \leq K_{\text{НС}} \leq 12,4\%$  превышает мощность тепловыделения при  $K_{\text{НС}} = 0$  на 47–171 %.

В результате исследований установлено, что в системе электроснабжения серий электролизеров магния при реальных изменениях параметров схемы системы электроснабжения  $40 \geq X_c / r_c \geq 7$  и значениях мощности конденсаторной батареи 0–10000 квар всегда должен быть резонанс токов на одной из высших гармоник; при  $K_{\text{НС}} \geq 3,2\%$  долговечность конденсаторов резко сокращается и устанавливать их для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения серий электролизеров магния без защиты нецелесообразно.

### **Г л а в а III. ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

#### **1. Автоматизированные тиристорные преобразовательные системы для модернизации электроприводов прокатного оборудования цветной металлургии**

На предприятиях цветной металлургии эксплуатируется большое число четырехвалковых реверсивных станов холодной прокатки с мощностью электроприводов от 200 до 1500 кВт и другое прокатное оборудование. Электропривод моталок и клеток этих станов, как правило, выполнен по системе Г–Д с использованием электромашиной системы управления. Присущие системам Г–Д недостатки сдерживают увеличение производительности станов и не дают возможности осуществить мероприятия по улучшению качества проката.

Анализ результатов исследования электроприводов станов холодной прокатки на заводах по обработке цветных металлов показал целесообразность разработки типовых систем регулирования скорости прокатки и натяжения полосы. Перевод электроприводов этих станов на питание по системе ТП–Д с применением быстродействующей полупроводниковой системы управления позволяет получить значительный технико-экономический эффект (см. гл. I).

Действующие станы, отличаясь мощностью двигателей электроприводов моталок и клеток, имеют практически одинаковую технологию прокатки. Эта особенность определяет структуру преобразователей.

Комплектный тиристорный преобразователь электроприводов клетки и моталок состоит из силовой части и регулятора натяжения или регулятора скорости. Практически для всех станов регуляторы одинаковы, а **меняется** лишь силовая часть. Силовая часть и регуляторы конструктивно выполнены в отдельных шкафах.

Для электроприводов моталок применена комбинированная (двухдиапазонная) система регулирования натяжения полосы с зависимым управлением потоком возбуждения и косвенным измерением натяжения по параметрам электропривода. Регулирование натяжения полосы основано на поддержании постоянства мощности электропривода при изменении диаметра рулона.

Без учета механических потерь электромагнитная мощность движения моталки равна мощности натяжения полосы:  $EI = Fv_{\Pi}$  (45), где  $E$  — э.д.с. двигателя моталки, В;  $I$  — ток якоря двигателя моталки, А;  $F$  — заданное натяжение полосы, Н;  $v_{\Pi}$  — скорость прокатки, м/с.

Натяжение полосы

$$F = EI / v_{\Pi} = \omega C_m \Phi I / v_{\Pi}, \quad (46)$$

где  $\omega$  — угловая частота вращения барабана моталки;  $\Phi$  — магнитный поток возбуждения двигателя;  $C_m$  — постоянный коэффициент.

При постоянной скорости прокатки по мере намотки рулона скорость двигателя уменьшается.

Согласно формуле (46) постоянство натяжения полосы при скорости двигателя моталки **выше** основной осуществляется изменением потока **возбуждения** при поддержании постоянного тока якоря. После достижения основной скорости двигателя  $\omega_H$  дальнейшее регулирование производится понижением напряжения двигателя, а для поддержания натяжения неизменным увеличивается ток двигателя. Поток возбуждения двигателя при этом остается неизменным.

Основные соотношения, характеризующие работу электропривода, приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Технические параметры режима работы электропривода

Параметр	Регулирование полем	Регулирование напряжением
Частота вращения, рад/с . . . . .	$\omega > \omega_H$	$\omega < \omega_H$
Радиус рулона, м . . . . .	$r = v / \omega < r_H$	$r = v / \omega > r_H$
Натяжение полосы, Н . . . . .	$F = \text{const}$	$F = \text{const}$
Мощность, Вт . . . . .	$P = EI = \text{const}$	$P = EI = \text{const}$
Ток двигателя, А . . . . .	$I_{\text{нач}} = \text{const}$	$I_{\text{нач}} = I_{\text{нач}} r / r_H = I_{\text{нач}} \omega_H / \omega$
Магнитный поток двигателя, Вб	$\Phi = \Phi_H r / r_H = \Phi_H \omega_H / \omega$	$\Phi = \text{const}$
Напряжение на двигателе, В	$U = \text{const}$	$U = \text{var}$
Кратность регулирования скорости:		
потоком возбуждения . . .	$K_{\Phi} = \omega_{\text{max}} / \omega_H = r / r_{\text{min}}$	—
напряжением на якоре . . .	—	$K_U = \omega_H / \omega_{\text{min}} = r_{\text{max}} / r$
общая кратность регулирования скорости . . . . .	$K = \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{min}} = r_{\text{max}} / r_{\text{min}} =$	$K_{\Phi} K_U$



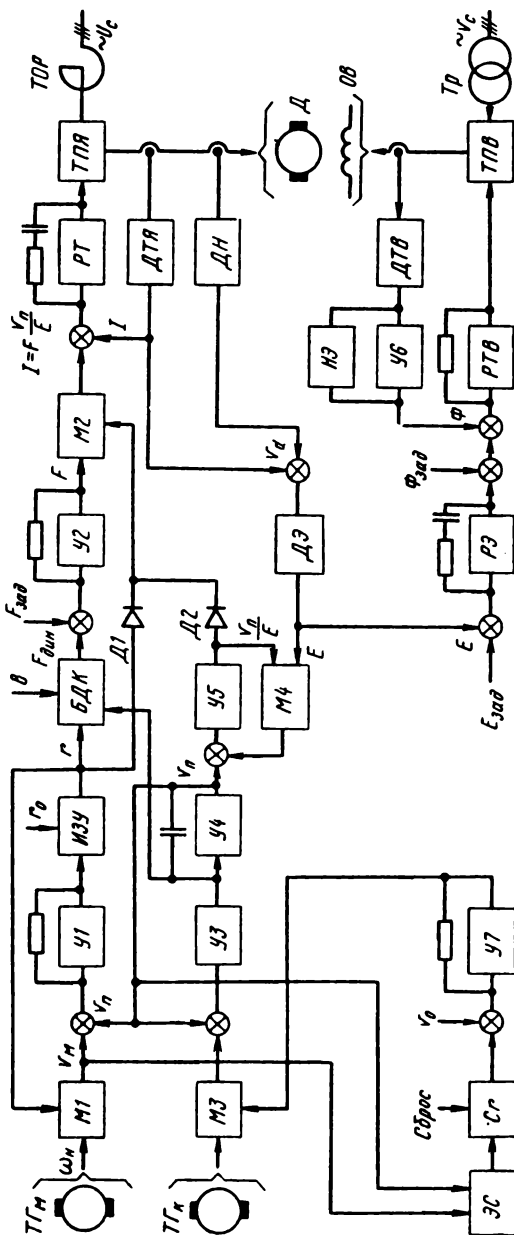


Рис. 34. Функциональная схема САР натяжения полюсов:  
 ТГ<sub>м</sub>, ТГ<sub>к</sub> — соответственно тахогенераторы моталки и клетки; М1 — М3 — множительные устройства; У1 — У7 — операционные усилители

Система автоматического регулирования (САР) натяжения полосы (рис. 34) представляет собой систему подчиненного регулирования, выполненную на элементах УБСР, и состоит из двух отдельных регуляторов: регулятора тока двигателя и регулятора э.д.с.

Соответствие натяжения  $F$  заданному оператором значению достигается вычислением уставки тока:  $I = Fv_{\Pi}/E = KFr/\Phi$  (47).

Умножение натяжения  $F$  на требуемое в зависимости от режима работы стана отношение  $v_{\Pi}/E$  или  $r/\Phi$  производится множительным устройством МЗ.

Для повышения точности делительных устройств при малых значениях делимого и делителя операция деления  $v_{\Pi}/E$  выполняется включением множительного устройства М4 в цепь обратной связи операционного усилителя У5. Выходное напряжение усилителя У5:  $U_{\text{вых}} = (v_{\Pi} - E v_{\text{вых}})A$  (48), где  $A$  — коэффициент усиления усилителя в разомкнутом состоянии.

Так как коэффициент усиления операционного усилителя достаточно велик, то  $U_{\text{вых}} = v_{\Pi}/E$ .

В режиме останова стана ( $v_{\Pi} = 0, E = 0$ )  $\Phi = \Phi_{\Pi}$  и установка тока  $I = Fr$ .

Выбор множителя на МЗ осуществляется автоматически аналоговой схемой ИЛИ на диодах Д1, Д2.

В пуско-тормозных режимах компенсация динамической составляющей натяжения полосы  $F_{\text{дин}}$  производится блоком динамической компенсации, на один из входов которого подается текущее значение радиуса рулона  $r$ , на второй — производная скорости прокатки. Выходной сигнал блока динамической компенсации определяют по формуле

$$F_{\text{дин}} = (J_0/r^2 + Kbr^2)dv_{\Pi}/dt, \quad (49)$$

где  $J_0$  — момент инерции барабана моталки;  $b$  — ширина прокатываемой полосы, мм.

$F_{\text{дин}}$  суммируется с  $F_{\text{зад}}$  на входе У2. Уставку по ширине полосы задает оператор.

С учетом знака  $F_{\text{дин}}$  компенсируется динамическая составляющая тока двигателя.

Измерение радиуса рулона основано на компенсационном методе. На входе усилителя У1 сравниваются сигналы, пропорциональные скорости прокатки  $v_{\Pi}$  и линейной скорости моталки  $v_M = \omega r$ . В начале намотки  $\Delta v = v_{\Pi} - \omega r_0$  (50), где  $r_0$  — радиус барабана моталки.

По мере намотки рулона  $\omega$  уменьшается, в связи с чем  $\Delta U$  увеличивается. Сигнал рассогласования усиливается У1 и подается на интегро-запоминающее устройство, выходное напряжение которого умножается множительным устройством М1 на текущее значение  $\omega$ . Сигнал рассогласования компенсируется и с достаточной степенью точности  $r = v_{\Pi}/\omega$ . При остановке стана интегро-запоминающее устройство переходит в режим запоминания и запоминает радиус рулона.

Производная от скорости прокатки находится компенсационным методом, так как дифференцирующий усилитель с входным операционным импедансом  $Z(p) = 1/pC$  склонен к усилению помех и самовозбуждению.

В обратную связь операционного усилителя с коэффициентом усиления  $A$  включен интегратор У4.

Выходное напряжение обратной связи операционного усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = (v_{\text{П}} - \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt) A \quad (51).$$

При достаточно большом  $A$   $v_{\text{П}} = \int_0^t U_{\text{ВЫХ}} dt$  (52) или  $U_{\text{ВЫХ}} = dv_{\text{П}}/dt$  (53).

Из формулы (52) следует, что на выходе интегратора У4 имеется сглаженный сигнал, пропорциональный скорости прокатки. Этот сигнал используется в САР натяжения полосы.

Скорость прокатки, т.е. скорость полосы, при работе моталки в режиме намотки и размотки различна. Если при намотке скорость наматываемой на барабан моталки полосы  $v_{\text{П}} = v_{\text{Н}}$  практически равна окружной скорости валков клетки, то при размотке скорость разматываемой с барабана моталки полосы  $v_{\text{П}} = v_{\text{Р}}$  меньше окружной скорости валков клетки.

Так как ширина полосы в стане практически неизменна в процессе прокатки, то при равенстве секундного объема металла на входе и выходе из клетки скорость размотки

$$v_{\text{Р}} = h_{\text{Н}} v_{\text{Н}} / h_{\text{Р}} = (1 - \Delta h / h_{\text{Р}}) v_{\text{Н}}, \quad (54)$$

где  $h_{\text{Р}}$ ,  $h_{\text{Н}}$  — соответственно толщина полосы на входе и выходе из клетки, мм.

Измерение  $v_{\text{Р}}$  производится путем компенсации величины относительного обжатия  $\Delta h / h_{\text{Р}}$ . На элемент сравнения генераторного типа ЭС узла компенсации отжатия подаются сигналы  $v_{\text{М}}$  и  $v_{\text{Р}}$ . В начале разгона стана  $v_{\text{М}}$  соответствует действительной скорости полосы, так как  $r$  соответствует действительному радиусу рулона  $v_{\text{Р}} > v_{\text{М}}$  и сигнал рассогласования вызывает генерацию элемента сравнения. Счетчик заполняется, вызывая уменьшение выходного сигнала усилителя У7. Коэффициент передачи множителя уменьшается, что вызывает уменьшение  $v_{\text{Р}}$ . Когда  $v_{\text{М}}$  и  $v_{\text{Р}}$  станут равными, срывается генерация элемента сравнения. Компенсация обжатия производится за время разгона стана и запоминается на весь пропуск. В режиме намотки счетчик сбрасывается.

В отличие от известных схем компенсации обжатия, в которых масштабирование скорости прокатки осуществляется изменением возбуждения тахогенератора клети, в рассмотренной схеме масштабирование производится изменением коэффициента передачи специального множителя. Это обстоятельство позволяет использовать тахогенератор клети в качестве датчика скорости прокатки для системы управления станом в целом, причем может быть применен тахогенератор любого типа.

В зоне регулирования скорости двигателя потоком э.д.с. двигателя поддерживается постоянной подчиненным контуром регулятора э.д.с. Последний является контуром регулирования тока возбуждения, на который обратная связь по току подается через усилитель У6 и нелинейный элемент.

В регуляторе тока возбуждения осуществляется изменение коэффициента передачи от регулятора э.д.с. к цепи возбуждения с целью поддер-

жения коэффициента усиления регулятора э.д.с. постоянным. Нарушение постоянства коэффициента передачи возникает вследствие нелинейной зависимости потока возбуждения от тока возбуждения при насыщении магнитной системы двигателя.

Силовая часть тиристорного преобразователя якорной цепи выполнена по полностью управляемой трехфазной мостовой схеме. Управление реверсивными вентильными комплектами — раздельное с запирающим неработающего комплекта. В сеть переменного тока тиристорный преобразователь якорной цепи включается через токоограничивающие реакторы.

Система импульсно-фазового управления обеспечивает управление вентильными комплектами сдвоенными импульсами, сдвинутыми на 60 эл. град.

Трехпозиционное логическое переключающее устройство обеспечивает надежное переключение вентильных комплектов с бестоковой паузой 4–5 с. Силовая часть тиристорного преобразователя цепи возбуждения выполнена в виде полностью управляемой трехфазной мостовой схемы. В сеть переменного тока он включается через согласующий трехфазный трансформатор.

Форсировка возбуждения при нарастании тока возбуждения обеспечивается выбором соответствующего номинального напряжения трансформатора. Форсировка возбуждения при спадании тока возбуждения обеспечивается переводом вентильного комплекта в инверторный режим.

Помимо рассмотренных узлов (см. рис. 34) САР натяжения включает узел толчков режимов, регулятор обрыва полосы и задания натяжения, устройства контроля, защиты и сигнализации и др.

Рассмотренная САР натяжения полосы позволяет использовать двигатели нормального исполнения (кратность регулирования скорости двигателя изменением потока возбуждения 1:2) при кратности отношения максимального диаметра рулона к диаметру барабана моталки не менее 1:5, повышает динамичность электропривода, так как разгон производится при номинальном потоке возбуждения, уменьшает время пуска-тормозных режимов.

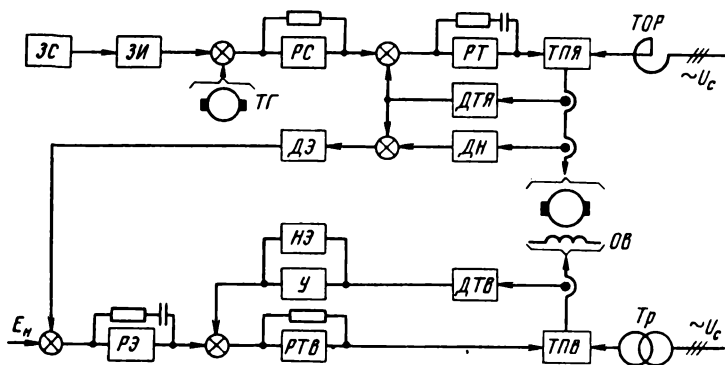


Рис. 35. Функциональная схема САР прокатки:

ЗС, ЗИ — соответственно задатчики скорости и интенсивности

САР скорости прокатки (рис. 35) выполнена по принципу подчиненного регулирования с зависимым управлением потоком возбуждения двигателя. Основной регулятор в системе — регулятор скорости, на вход которого подается сигнал от задатчика интенсивности и обратная связь по скорости от тахогенератора клетки. Регулятор тока — подчиненный.

Регулятор э.д.с., тиристорные преобразователи якорной цепи и цепи возбуждения клетки по построению и выполняемым функциям аналогичны соответствующим узлам моталки.

В связи с отсутствием резко переменных нагрузок на станах холодной прокатки и работой САР от задатчиков интенсивности оптимизация систем регулирования произведена по методу эквивалентных синусоид.

Т а б л и ц а 5. Технические данные преобразователей серии ПТЦ для электроприводов постоянного тока (1200×600×1900 мм)

Типоисполнение	Ток, А	Напряжение, В	Масса, кг
ПТЦ-3-50/230	50	0—230	490
100/230	100		557
200/230	200		710
320/230	320		994
ПТЦ-3-50/460	50	0—460	338
100/460	100		427
200/460	200		520
320/460	320		591
ПТРЦ-3-50/230	50	230—0—230	517
100/230	100		584
200/230	100		737
320/230	300		1036

Технические характеристики тиристорных преобразователей для модернизации технологического оборудования приведены в табл. 5.

## 2. Тиристорный электропривод экскаваторов

Электрооборудование экскаваторов эксплуатируется в тяжелых условиях тряски, вибрации, ударов, большой запыленности. Электроприводы рабочих механизмов экскаватора работают в интенсивных повторно-кратковременных режимах с большой частотой включений, при изменяющейся в широких пределах нагрузке на валу двигателя. Главные механизмы экскаватора содержат упругие механические связи, обусловленные ограниченной жесткостью канатов, рабочего оборудования и валов передач, имеют значительные зазоры в передачах.

Поэтому к электрооборудованию экскаваторов предъявляются повышенные требования в отношении устойчивости к тряске, вибрациям, запыленности, надежности конструкций и схемных решений.

Важнейшее требование к электроприводу рабочих механизмов экскаватора — необходимость ограничения момента электропривода до допустимой величины при механических перегрузках и резких стопорениях. Основное средство ограничения момента — формирование системой регулирования электропривода "экскаваторной" механической характе-

ристики. Работы по созданию тиристорных электроприводов для механизмов экскаваторов ведут по двум основным направлениям:

- 1) тиристорное возбуждение генераторов и двигателей в системах Г-Д;
- 2) замена электромашинной преобразовательной системы комплектным тиристорным преобразователем.

В настоящее время выпускают комплектные тиристорные преобразователи типа КТП-Э для карьерных экскаваторов. Эти преобразователи предназначены для питания якорных цепей, цепей возбуждения электродвигателей основных механизмов, двигателя открывания днища ковша и цепей постоянного тока аппаратуры управления карьерных экскаваторов ЭКГ-4, 6Б, ЭКГ-8 и др. Преобразователи устанавливают на экскаваторах взамен электромашинных преобразовательных агрегатов. Изготавливают их в климатическом исполнении V, категории размещения 2, по ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70, по воздействию механических факторов внешней среды — по группе М18 ГОСТ 17516-72; КТП-Э соответствуют ТУ 48-1903-35-78. Напряжение системы электроснабжения экскаваторов составляет 6/3 кВ при частоте 50 Гц, напряжение питания системы управления 380/220 В при частоте 50 Гц. Технические данные преобразователей приведены в табл. 6.

Тиристорный преобразователь КТП-Э состоит из трех независимых тиристорных преобразователей приводов механизмов (подъема, напора и поворота — хода), устройства стабилизированного напряжения для питания цепей возбуждения постоянного тока и сухого многообмоточного согласующего трансформатора типа ТСЗП-630-100 м. Для экскаватора ЭКГ-8 применяют два трансформатора типа ТСЗП-630/10М. Для пояснения принципа работы комплектного тиристорного преобразователя КТП-Э на рис. 36 приведена структурная схема.

Т а б л и ц а 6. Технические данные преобразователей электроприводов рабочих механизмов экскаваторов ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8

Параметр	Подъем		Напор		Поворот — ход		Возбуждение	
	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-8	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-8	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-8	ЭКГ-4,6Б	ЭКГ-8
Номинальное выпрямлен- ное напряже- ние, В . . .	480	600	400	330	700	660	110	110
Номинальный выпрямлен- ный ток, А	450	800	150	400	250	400	165	165
Коэффициент перегрузки по току . . .	2,5	2,5	3	2,5	2,5	2,5	—	—
Диапазон ре- гулирования выпрямлен- ного напря- жения, В . . .	±480	±600	±400	±330	±700	±660	±105	±135



Тиристорные преобразователи приводов подъема, напора и поворота хода представляют собой реверсивные управляемые мостовые выпрямители с системами управления, питающие регулируемым постоянным напряжением соответственно двигателя подъема, напора и поворота — хода.

Преобразователь привода поворота — хода обеспечивает питанием двигателя поворота или хода, поочередно подключаемые к преобразователю с помощью контакторов КВ и КХ. Коммутация контакторов и изменение параметров системы регулирования осуществляется с помощью переключателя режима работ.

Функциональная схема преобразователя электропривода механизма приведена на рис. 37.

Управление вентильными комплектами Вп1, Вп2 — раздельное с запирающим неработающего комплекта. Функции раздельного управления комплектами выполняет логическое переключающее устройство, осуществляющее поиск проводящей группы тириستоров ("сканирующая логика").

Каждый преобразователь электропривода механизма имеет свою систему управления, состоящую из системы импульсно-фазового управления, автоматического регулирования, защиты, сигнализации и блокировок. Силовая часть преобразователей набирается из силовых секций управляемых выпрямителей. Основой силовой секции является блок-тиристор, в состав которого входят тиристор Т630 соответствующего класса, быстродействующий предохранитель ПП57, реактор, входные цепи управляющего перехода и цепи защиты тиристора от коммутационных перенапряжений. Секция состоит из 12 блок-тириستоров и в зависимости от схемы их включения может быть реверсивной с одним тиристором в плече или нереверсивной с двумя тиристорами в плече. Система управления преобразователя электропривода механизма сосредоточена в шкафу управления. Функциональные узлы системы управления скомпонованы в модулях, которые посредством разъемов установлены и закреплены на поворотных панелях устройства управления. В системе управления наряду с транзисторными схемами применяют узлы на интегральных микросхемах. Защиту от коротких замыканий и прорыва инвертора производят автоматические выключатели В1, В2 на стороне переменного и постоянного тока.

Управление электроприводами осуществляется сельсинными командо-аппаратами типа СКАР и СКАП, установленными в кабине машиниста. Комплектные тиристорные преобразователи помещают в кузове экскаватора на месте демонтируемых электромашинных преобразовательных агрегатов, силовых магнитных усилителей и станций управления.

### **3. Тиристорный электропривод станков шарошечного бурения**

Электропривод вращателя бурового инструмента станков шарошечного бурения взрывных скважин для высокопроизводительной работы должен обеспечивать: высокую интенсивность переходных процессов; плавное регулирование скорости по всему диапазону; жесткость механических характеристик в рабочей зоне в пределах 5 %; ограничение момента (тока)



при перегрузках (иметь "экскаваторную" характеристику); реверс двигателя для свинчивания буровых штанг.

Эти качества наиболее полно обеспечиваются тиристорным электроприводом постоянного тока. В настоящее время буровые станки типа СБШ-250 и СБШ-320 мм оснащают приводом вращателя с электродвигателем постоянного тока с тиристорными агрегатами ТЕЗ-160/460Р-42 и ТЕЗ-250/460Р-У2, выпускаемыми электротехнической промышленностью. Агрегаты могут осуществлять двухзонное регулирование скорости. Реверс вращения двигателя — неоперативный (для свинчивания штанг бурового стана) с помощью контактного переключения тока возбуждения.

Для модернизации электроприводов станков шарошечного бурения типа СБШ-250, 2СБШ-200, БАШ-250, БАШ-320 производственное объединение "Уралэнергоцветмет" выпускает преобразователи типа ТП-ЗБС. Преобразователь ТП-ЗБС выполнен по нереверсивной трехфазной симметричной мостовой схеме. Охлаждение тиристоров воздушное естественное. Защита тиристоров при коротких замыканиях осуществляется автоматическим выключателем АЗ700 с электронной защитой.

Тиристорный преобразователь ТП-ЗБС представляет собой управляемый выпрямитель Вп1 для питания якорной цепи и неуправляемый выпрямитель Вп2 для питания цепи возбуждения и аппаратуры управления. На рис. 38 представлена схема тиристорного преобразователя ТП-ЗБС.

На вход суммирующего магнитного усилителя поступает задающий сигнал в виде напряжения с выходов задающего устройства и датчика напряжения, пропорциональный выходному напряжению преобразователя. На вход ячейки управления сигнал поступает с выходов суммирующего магнитного усилителя ячейки токовой отсечки. С выхода ячейки управления сигнал поступает на вход системы импульсно-фазового управления.

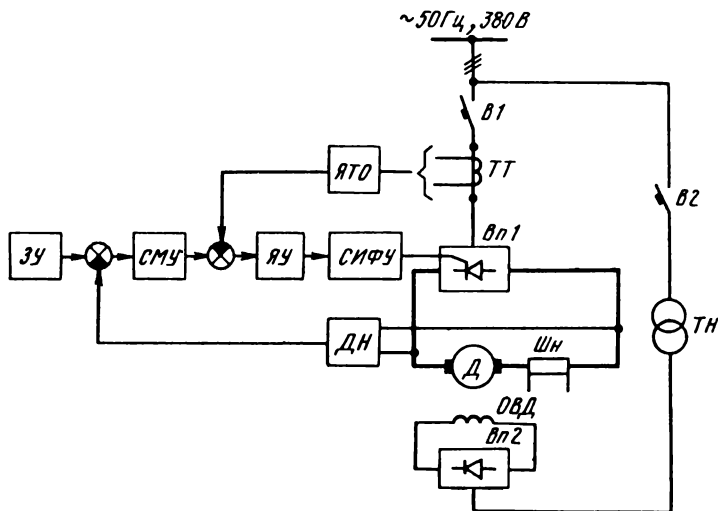


Рис. 38. Функциональная схема тиристорного преобразователя типа ТП-ЗБС

Ячейками последней формируются импульсы и сдвигаются по фазе и функции сигнала с выхода ячейки управления. Эти импульсы через отдельные трансформаторы импульсных ячеек силовой панели подаются на управляющие переходы тиристоров.

В момент отпирания тиристоров к якору двигателя прикладывается питающее напряжение. При превышении тока отсечки преобразователя ячейка токовой отсечки выдает сигнал отрицательной полярности, вследствие чего угол отпирания тиристоров  $\alpha$  увеличивается и, таким образом, уменьшается выходное напряжение (ток) преобразователя.

Реверс приводного двигателя осуществляется изменением полярности тока возбуждения.

Преобразователь ТП-ЗБС представляет собой шкаф каркасной конструкции, переднего обслуживания, в котором установлены тиристоры ТЗ20 на силовой панели, блок управления, коммутационная аппаратура, устройства защиты и сигнализации, неуправляемый выпрямитель цепей возбуждения с трансформатором. Тиристорный преобразователь обеспечивает пуск двигателя с ограничением величины пускового момента, плавное регулирование скорости, нетехнологический реверс двигателя.

Ниже приведены технические данные трех тиристорных преобразователей:

	ТЕЗ-1600/460Р-У2	ТЕЗ-260/460Р-У2	ТП-ЗБС
Напряжение питающей сети, В . . .	$380^{+10}_{-15}$	$380^{+10}_{-15}$	$380 \pm 10$
Частота питающей сети, Гц . . .	50	50	50
Номинальное выпрямленное напряжение, В . . . . .	460	460	400
Номинальный выпрямленный ток, А . . . . .	160	250	180
Диапазон регулирования выпрямленного напряжения, % . . .	0–100	0–100	0–100
Номинальное выпрямленное напряжение возбудителя, В . . .	115	230	95
Номинальный выпрямленный ток возбудителя, А . . . . .	15	15	15
Диапазон регулирования выпрямленного напряжения возбудителя . . . . .	$(0-1,5) U_H$	$(0-1,5) U_H$	—
К.п.д., % . . . . .	87	94	95

#### 4. Модернизация электроприводов карусельных разливочных машин

Электроприводами карусельных разливочных машин являются двигатели постоянного тока, питание которых осуществляется по системе Г—Д. Модернизация существующих электроприводов этих машин вызвана необходимостью повышения производительности за счет сокращения цикла работы при сохранении качества выпускаемой продукции. Это достигается заменой генераторов постоянного тока тиристорными преобразователями серии ПТЦ (см. табл. 5). Более высокие показатели динамики электропривода по системе тиристорный преобразователь — двигатель постоянного тока позволили увеличить среднюю скорость передвижения карусели и тем самым сократить время одного цикла.

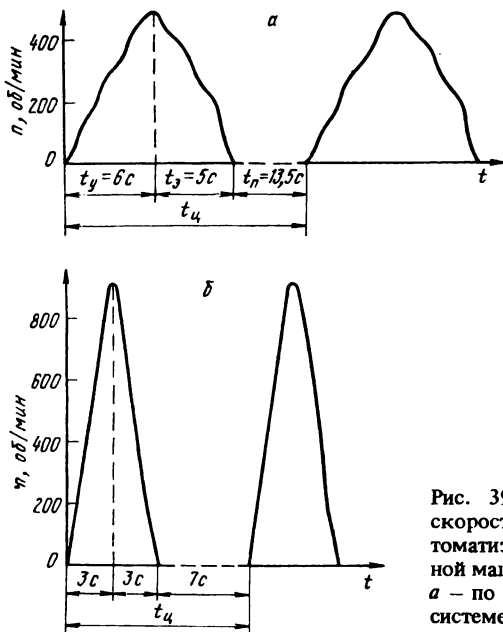


Рис. 39. Кривые изменения скорости электропривода автоматизированной разливочной машины:  
а — по системе Г — Д; б — по системе ТП — Д

На рис. 39 показаны кривые изменения скорости электропривода карусельной разливочной машины на Балхашском горно-металлургическом комбинате до и после реконструкции, где  $t_y$ ,  $t_z$ ,  $t_n$  и  $t_u$  — соответственно время ускорения электропривода, замедления, паузы и цикла. После мо-

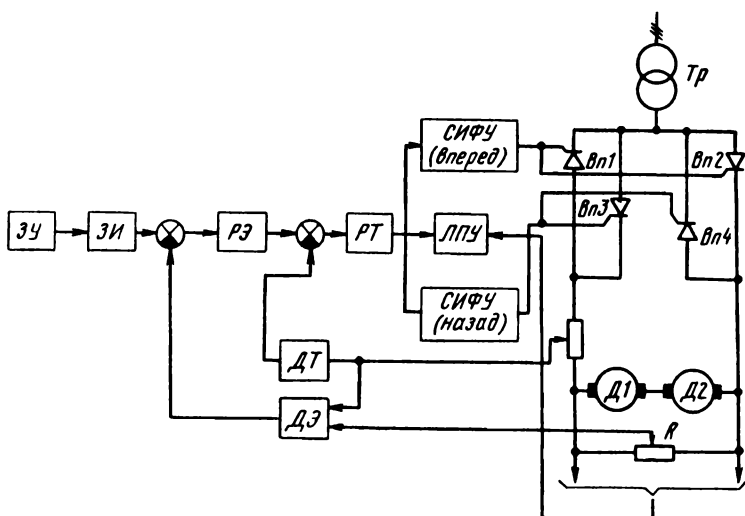


Рис. 40. Функциональная схема тиристорного электропривода постоянного тока

дернизации электропривода время цикла сократилось на 47 %, производительность увеличилась на 97 %.

На рис. 40 приведена функциональная схема автоматизированного тиристорного электропривода постоянного тока. В системе электропривода используются существующие двигатели постоянного тока типа ДП-31 мощностью 12 кВт каждый. Питание двигателей осуществляется от реверсивного тиристорного преобразователя Вп1--Вп4, собранного по трехфазной мостовой схеме. Комплекты преобразователя управляются по принципу раздельного управления с запирающим неработающего комплекта.

Система автоматического регулирования скорости двигателей выполнена по принципу подчиненного регулирования и содержит два замкнутых контура регулирования: контур э.д.с. и контур тока. Сигналом задания скорости служит сигнал задатчика скорости, сигналом задания тока — выходное напряжение с регулятора э.д.с. Темп разгона и торможения определяется задатчиком интенсивности.

## Г л а в а IV. ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕХАНИЗМАМИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

### 1. Асинхронный электропривод с частотным управлением для технологических механизмов

*Структура частотно-управляемого электропривода.* Тиристорные преобразователи частоты предназначены для управления асинхронными коротко-замкнутыми двигателями.

Электропромышленность выпускает преобразователи частоты серии ТПЧ, выполненные со звеном постоянного тока на базе автономного инвертора напряжения, и комплектные тиристорные частотно-управляемые электроприводы ЭКТ и ЭКТР.

На рис. 41 показана функциональная схема асинхронного электропривода с частотным управлением технологическим механизмом. В состав схемы входят: тиристорный преобразователь ТПЧ, асинхронный коротко-замкнутый двигатель АД, технологический механизм ТМ, датчик технологического параметра Д, преобразователь сигналов датчика ПУ, регулятор Р [4].

Датчик технологического параметра Д и преобразователь включаются во внешнюю обратную связь электропривода. Выход с преобразователя позволяет непосредственно или косвенно (в зависимости от типа датчика) судить о контролируемом параметре механизма ( $U_{0.c}$  — напряжение обратной связи) и сравнить его с заданной величиной данного параметра ( $U_z$  — напряжение задания). Напряжение управления  $U_y$ , получаемое в результате сравнения, поступит на вход регулятора Р, а с выхода регулятора — на вход управления ТПЧ.

Для получения различной скорости вращения механизма необходимо соответственно изменять скорость асинхронного двигателя. Это достигается путем изменения частоты и напряжения тока статора двигателя. В зависимости от требований, предъявляемых к электроприводу, система управления преобразователем частоты реализует необходимый закон управления, определяющий соотношение напряжения и час-



Регулятор Р предназначен для формирования требуемого закона управления электроприводом. Вид передаточной функции регулятора и оптимальные параметры его настройки определяют в каждом конкретном случае, исходя из характеристик технологического механизма.

Применяют также асинхронные электроприводы с ТПЧ и без внешней обратной связи. Такие системы целесообразны для механизмов, которые требуют регулирования скорости, но работа механизмов с одной скоростью происходит длительное время, а изменение скорости вследствие увеличения или уменьшения нагрузки незначительно влияет на режим работы промышленных установок.

*Частотный электропривод с управляемым торможением.* В цветной металлургии имеется большая группа механизмов, для которых необходима точная динамика электропривода и управляемое торможение. К таким механизмам относятся намоточные устройства прессов, прокатные станы, механизмы подачи электродов дуговых печей и др.

Поэтому были разработаны устройства введения тормозного сопротивления и система управления, которые позволили без значительных дополнительных затрат обеспечить управляемое торможение асинхронного частотного электропривода [4].

На рис. 42 приведена функциональная схема асинхронного частотного электропривода на базе ТПЧ с блоком введения сопротивления без внешней обратной связи. Эта схема отличается от показанной на рис. 41 тем, что позволяет получить управляемое торможение, необходимый тормозной момент и малое время торможения.

Торможение привода осуществляется путем снижения частоты. Асинхронный двигатель при этом работает в генераторном режиме на автономный инвертор напряжения. Для получения требуемого тормозного момента необходимо регулировать величину напряжения на статоре в соответствии с изменением частоты. Это возможно двумя путями: использованием инвертора, который позволяет рекуперировать энергию, запасенную в маховых массах привода, или импульсным введением тормозного сопротивления в звено постоянного тока. Первый способ позволяет повысить к.п.д. привода, но для приводов небольшой мощности величина рекуперированной энергии незначительна. Кроме того, усложняются силовая схема преобразователя, система управления и снижается коэффициент мощности привода. Сложным является также согласование работы управляемого выпрямителя и ведомого инвертора.

При втором способе не происходит рекуперация энергии торможения в питающую сеть, но он наиболее перспективен, так как силовая схема и система управления в этом случае сравнительно просты, переход из двигательного режима в тормозной и обратно осуществляется автоматически. Момент перехода из одного режима в другой определяется релейным элементом РЭ, на вход которого поступает напряжение управления с регулятора напряжения после сравнения заданного напряжения  $U_3$  с действительным. Если действительное напряжение больше необходимого, релейный элемент РЭ вырабатывает сигнал на вход системы управления блока введения сопротивления и параллельно емкости фильтра  $C_f$  в звено постоянного тока вводится тормозное сопротивление  $R_T$ . При этом происходит ограничение напряжения двигателя, а управляемый выпрямитель запирается. После снижения напряжения двигателя до заданного система управления блоком введения сопротивления выводит тормозное сопротивление  $R_T$ . Таким образом, необходимый тормозной момент поддерживается при любой скорости вращения привода.

В рассматриваемом тормозном режиме реактивная энергия поступает от инвертора к двигателю в соответствии с потребностью без каких-либо ограничений. Таким образом, инвертор и фильтровая емкость  $C_f$  являются элементами, без которых невозможно торможение, названное по этой причине инверторным. В работах [4, 21] показано, что инверторное торможение асинхронного двигателя номинальной мощностью до 30 кВт наиболее целесообразно.

Расчет параметров схемы блока введения сопротивления осуществляют на основе анализа физических процессов, происходящих в нем. С этой целью рассматривают поочередно, на каждом интервале, переходные процессы в элементах главных цепей

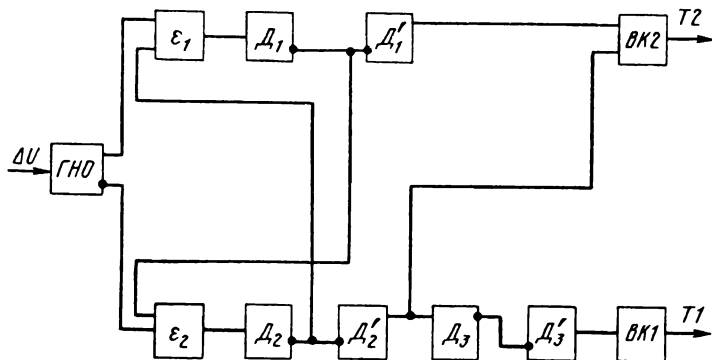


Рис. 44. Функциональная схема системы введения тормозного сопротивления

Последний случай благоприятнее для работы блока введения сопротивления, поскольку во всех интервалах напряжение на коммутирующем конденсаторе будет больше, а это удлиняет время, предоставленное для восстановления запирающих свойств, и облегчает закрывание тиристоров.

Энергия, рассеиваемая в тормозном сопротивлении за цикл, определяется величинами тормозного сопротивления  $R_1$ , емкости  $C_1$ , напряжения на фильтровой емкости  $U_d$  и длительностью второго и третьего интервалов.

Управление блоком введения сопротивления осуществляется системой введения сопротивления, которая может вводить тормозное сопротивление при заданном изменении величины входного сигнала или при изменении знака входного сигнала  $\Delta U$  (рис. 44). Сигнал на вход системы введения сопротивления поступает в этом случае также после сравнения заданного и действительного напряжений асинхронного двигателя ( $\Delta U = U_d - U_3$ ).

Система введения сопротивления включает следующие элементы: ГНО — гистерезисный нуль-орган (элемент типа двухпозиционного реле с гистерезисом);  $\epsilon$  — схема сопротивления сигнала (элемент И); Д — элемент задержки; ВК — выходной каскад (формирует управляющий импульс на тиристор).

Гистерезисный нуль-орган имеет два выхода, один из которых инверсный и срабатывает при превышении сигнала на входе  $\Delta U$  заданной величины. Величину  $\Delta U$  можно изменять в зависимости от требований к системе управления.

Назначение остальных элементов в схеме СВС следующее:  $D_1$  и  $D_2$  определяют минимальную паузу между подачей импульсов на тиристоры Т2 и Т1;  $D'_1$  и  $D'_2$  определяют длительность импульсов на открывание тиристоров Т2 и Т1.  $D_3$  задает время, необходимое для заряда коммутирующего конденсатора  $C_1$  обратной полярности.

Система введения сопротивления при  $\Delta U < 0$  запускает один раз элемент задержки  $D_1$ ; открывается тиристор Т2 и начинает заряжаться конденсатор  $C_1$  по цепи  $R_1, C_1, T_2$ . При изменении знака  $\Delta U$  ( $U_d > U_3$ ), т.е., когда необходимо введение тормозного сопротивления  $R_1$ , вначале срабатывает элемент задержки  $D_2$  и открывается тиристор Т2. При этом перезаряжается или дозаряжается конденсатор  $C_1$ . После введения сопротивления К1 напряжение АД уменьшается до заданной величины, полярность  $\Delta U$  изменяется и система вырабатывает импульс на открывание тиристора Т2, к тиристор Т1 прикладывается обратное напряжение и он закрывается. Элементы задержки  $D_1$  и  $D_2$  позволяют переключение не чаще, чем через 800 мкс.

СВС обеспечивает включение тиристора Т2 перед включением тиристора Т1 для дозаряда конденсатора  $C_1$  и последующей надежной коммутации тиристора Т1.

Схема системы введения тормозного сопротивления легко реализуется на стандартных логических элементах

*Специальный блок регулирования частотным электроприводом и системах автоматического регулирования технологическими механизмами* Возможности регулируемого электропривода технологических механизмов могут наиболее полно реализовываться лишь при работе в системе, замкнутой по какому-либо технологическому параметру. Поэтому возникает необходимость в регуляторе, реализующем требуемый закон управления приводом. Выпускаемые промышленностью регуляторы технологических процессов, например РП2, РПИК, имеют на выходе управляющий сигнал в виде серии импульсов, что в значительной степени усложняет увязку регуляторов с системой управления тиристорного преобразователя, а также наладку системы автоматического регулирования в целом. Это вызвало необходимость разработать регулятор, предназначенный для систем автоматизированного электропривода переменного тока с использованием преобразователей частоты типа ТПЧ. Технические данные блока регулирования приведены ниже:

Напряжение питания, В . . . . .	380
Число независимых входов . . . . .	4
Входной сигнал переменного тока, В . . . . .	0-12
Входной сигнал постоянного тока:	
сила тока, мА . . . . .	0-5
напряжение, В . . . . .	0-10
Выходное напряжение, В . . . . .	0-12
Закон регулирования . . . . .	Пропорциональный, пропорционально-интегральный, интегральный

Схема пропорционально-интегрального регулятора показана на рис. 45. В состав блока регулирования входят ячейка измерительная, два усилителя постоянного тока УИТ-1 и УИТ-2, ячейка управления, ячейка связи, ячейка питания 24 В, генератор прямоугольных импульсов, силовой трансформатор и трансформатор питания датчиков. На вход измерительной ячейки (на рис. 45 показано только два входа) подаются сигналы с датчиков и задатчиков. Измерительная ячейка производит алгебраическое суммирование входных сигналов. Формирование требуемого закона управления производится с помощью УИТ-1 и УИТ-2, из которых первый работает в режиме интегрирования, а второй — в режиме масштабного преобразования. Настраивка регулятора осуществляется резисторами связи  $R1-R4$ . Ячейка управления согласует выход усилителя УИТ-2 со входом системы управления преобразователя частоты.

Измерительная ячейка представляет собой двухтактный магнитный усилитель и имеет четыре независимых входа для подключения сигнала задатчика  $U_z$  и сигналов обратных связей. Два фазочувствительных выпрямителя на транзисторных компенсированных ключах предназначены для преобразования входных сигналов переменного тока.

Расчет оптимальных настроек регулятора может производиться различными методами в зависимости от особенностей технологического агрегата и требуемого закона автоматического регулирования. Передаточная функция большинства механизмов, для которых предназначается регулятор (конвейеры, питатели, сгустители, насосы и т.д.), с достаточной точностью аппроксимируется звеном первого или второго порядка с транспортным запаздыванием. При случайном характере возмущений

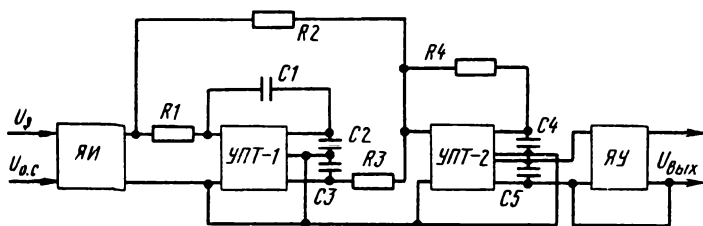


Рис. 45. Функциональная схема пропорционально-интегрального регулятора



задачей автоматического регулирования является уменьшение дисперсии выходной величины. Инженерные методы расчета подобных систем изложены в работе [12].

Рассмотрим расчет элементов пропорционально-интегрального регулятора. Передаточная функция регулятора имеет вид:  $W_p(p) = K_y(1 + 1/T_{из})$  (58), где  $K_y = R4/R2$  – коэффициент усиления;  $T_{из} = C1 \cdot R1 \cdot R3/R2$  – время изотропа.

Пусть передаточная функция регулятора, В/мА, равна  $W_p(p) = 10(1 + 1/4 p)$ . Принимая коэффициент усиления измерительной ячейки  $K_{у.яч} = 5$  В/мА, выбирая  $R2$  равным 5 кОм, получим  $R4 = 10$  кОм. При  $R1 = 100$  кОм и  $C1 = 10$  мкФ  $R3 = 20$  кОм.

Конструктивно блок регулирования выполнен в виде навесного шкафа одностроннего обслуживания. Модули и силовой трансформатор питания датчиков расположены на поворотной панели блока. Для внешних соединений используются две блочные вставки типа ШРГ.

*Системы автоматического регулирования технологическими механизмами.* На основе применения асинхронного электропривода с частотным управлением на предприятиях отрасли успешно автоматизированы многие технологические процессы: на Башкирском медно-серном комбинате – процесс сгущения на обогатительной фабрике, на Иртышском химико-металлургическом заводе – механизм подачи электронно-лучевой печи типа ЕМО-200 и т.д.

Наиболее значительная эффективность достигается при автоматизации загрузки мельниц рудой на обогатительных фабриках. Учитывая это, рассмотрим подробнее данную систему автоматического регулирования.

Дозирование загрузки мельниц рудой на обогатительных фабриках производится конвейерами, тарельчатыми питателями, вибропитателями и др. Существенные преимущества перед другими типами питателей имеют конвейерные: простота конструкции, возможность получения больших загрузочных отверстий бункеров, что особенно важно для плохосыпучих материалов, хорошее усреднение руды.

Система автоматического регулирования (рис. 46) обеспечивает стабилизацию загрузки мельниц рудой с минимальной дисперсией регулируемой величины, что оптимизирует процессы измельчения и флотации, увеличивает производительность цикла обогащения и повышает процент извлечения металла из руды.

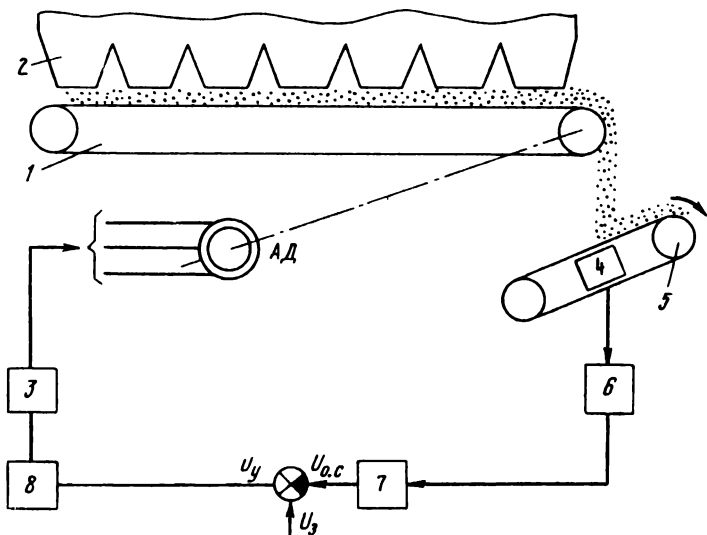


Рис. 46. Функциональная схема системы автоматического регулирования загрузки мельницы рудой

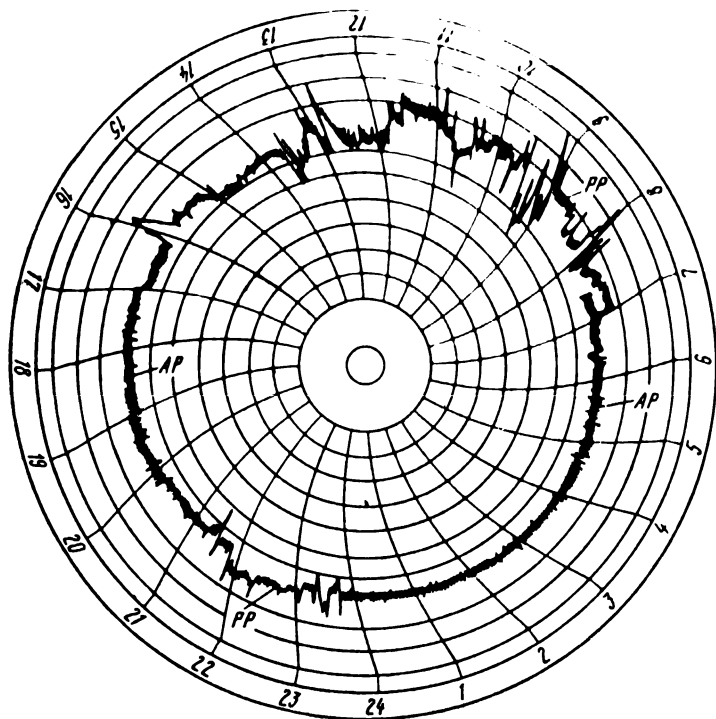


Рис. 47. Диаграмма загрузки мельницы рудой при ручном (РР) и автоматическом (АР) режимах управления

Конвейерный питатель 1, установленный непосредственно под разгрузочными отверстиями бункера 2, приводится в движение асинхронным короткозамкнутым двигателем АД, который управляется тиристорным преобразователем частоты 3.

Система автоматического регулирования замкнута по массе и осуществляет стабилизацию производительности конвейера. Сигнал обратной связи снимается с массоизмерителя 4, установленного на сборном конвейере 5. Массоизмеритель работает в комплекте со вторичным прибором 6. Выходной сигнал со вторичного прибора через нормирующий преобразователь 7 подается на элементы сравнения напряжения задания  $U_z$  и обратной связи  $U_{o.c.}$  Наличие нормирующего преобразователя обусловлено необходимостью размножения сигналов массоизмерителя для подачи на вход регулятора соотношения руда — вода и на регулирующий прибор на пульте оператора.

Напряжение управления, которое получается после сравнения напряжений задания и обратной связи, поступает на вход регулятора 8. Регулятор позволяет осуществлять требуемое управление конвейерным питателем, т.е. реализовать необходимый по условиям технологии закон управления.

Важным при автоматизации является определение теплового режима двигателя. Рассматривая конвейерный питатель как механизм с постоянным моментом сопротивления при всех возможных скоростях, были проведены исследования теплового режима двигателя при частоте тока статора 10 Гц. Испытания вели на двигателе АО2-72-4 при управлении от преобразователя частоты ТПЧ-40. Оказалось, что для получения нормального теплового режима при частоте 10 Гц необходимо снижать нагрузочный момент на 26 % по отношению к номинальному. Следовательно, мощность конвейерных питателей с регулируемым асинхронным двигателем с самовентиляцией должна быть завышена на 25–30 % по сравнению с нерегулируемым [4].

Схемы управления электроприводами конвейерных питателей допускают и ручное управление, а также обеспечивают контроль работы сборного конвейера.

На рис. 47 показана диаграмма загрузки мельницы рудой при ручном и автоматическом режимах управления питателем загрузки на Гайском горно-обогатительном комбинате. Дисперсия производительности конвейера в автоматическом режиме уменьшается в 14 раз по сравнению с ручным режимом. Экономическая эффективность составила 10,11 тыс. руб. в год на один конвейерный питатель в основном за счет увеличения объема перерабатываемой руды. Капиталовложения окупались за 0,7 года.

## 2. Асинхронный электропривод по схеме вентильного каскада

*Функциональная схема и технические данные тиристорных преобразователей серии ПТ-АВК.* Тиристорные преобразователи серии ПТ-АВК предназначены для плавного пуска и бесступенчатого регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором по схеме асинхронно-вентильного каскада со звеном постоянного тока.

Напряжение ротора двигателя выпрямляется с помощью мостового выпрямителя (рис. 48) и в цепь выпрямленного напряжения вводится противо-э.д.с. В качестве источника противо-э.д.с. используется мостовой тиристорный преобразователь, работающий в режиме инвертора, ведомого сетью. Регулируя величину э.д.с. инвертора, можно плавно изменять ток ротора двигателя. Момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален току ротора. Следовательно, регулирование последнего путем изменения противо-э.д.с. инвертора позволяет регулировать величину момента и скорость вращения двигателя [6].

В схеме с промежуточным звеном постоянного тока неуправляемый роторный выпрямитель и инвертор образуют замкнутый контур. Мгновенные напряжения инвертора при определенных значениях угла управления имеют положительный знак, поэтому в некоторые моменты по указанному контуру протекает уравнивающий ток, минуя обмотки ротора двигателя. Для ограничения уравнивающего тока в промежуточной цепи постоянного тока установлен дроссель. Методика выбора индуктивности сглаживающего дросселя с учетом условия ограничения уравнивающего тока в технически допустимых пределах приведена в работе [5].

Величина противо-э.д.с. инвертора регулируется изменением угла открывания тиристорov. Для изменения угла регулирования по заданному закону служит устрой-

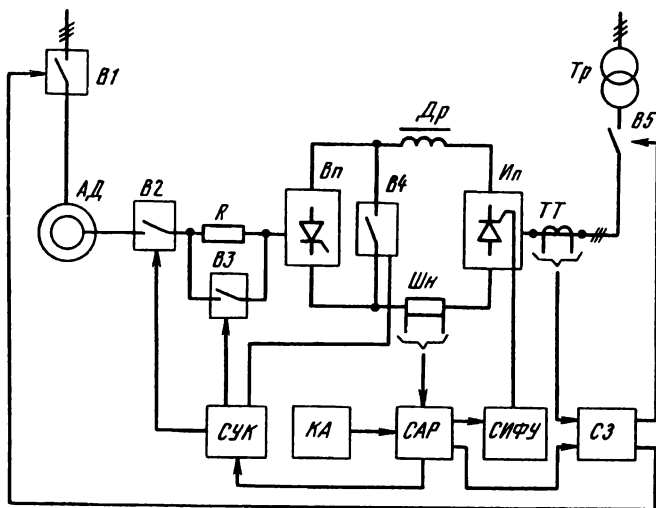


Рис. 48. Функциональная схема ПТ-АВК

**Т а б л и ц а 7. Технические данные тиристорных преобразователей  
типа ПТ-АВК**

Тип преобразователя	Номиналь- ный ток ро- тора, А	Напряже- ние рото- ра, В	Габаритные размеры комплекта, мм	Масса комплект- та, кг
ПТ-АВК-320/320	220	220	3450х525х2050	1070
ПТ-АВК-320/380	320	380		1220
ПТ-АВК-320/500	320	500	4600х525х2050	1070
ПТ-АВК-630/380	630	380		1120
ПТ-АВК-630/500	630	500		1270

ство управления. Функционально в устройстве управления можно выделить следующие системы: защиты, сигнализации и блокировок; управления силовой коммутационной аппаратурой; авторегулирования; импульсно-фазового управления тиристорами.

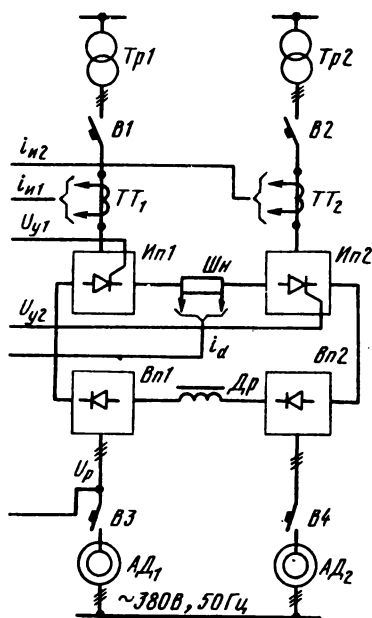
Задание на изменение угла управления поступает от сельсинного командоаппарата. Функциональные связи всех систем представлены на рис. 48.

Питание преобразователя осуществляется от трехфазной сети напряжением 380 В. В преобразователях в зависимости от типоразмера установлены таблеточные тиристоры Т-500 или Т-630 с естественным воздушным охлаждением. Преобразователи рассчитаны на эксплуатацию в закрытых помещениях. Технические данные тиристорных преобразователей типа ПТ-АВК приведены в табл. 7.

Применение преобразователя ПТ-АВК обеспечивает коэффициент использования двигателя в пределах 0,92–0,95, наибольший уравнивающий ток составляет 10–15 % от номинального выпрямленного тока преобразователя. Граничный угол пропускания уравнивающего тока  $\beta_{гп}$  составляет 78–84 эл.град.

В цветной металлургии широко распространены многодвигательные асинхронные электроприводы. Например, в качестве электроприводов мощных печей спекания глиноземных заводов применяется асинхронный двухдвигательный привод [6]. Приводными двигателями являются асинхронные с фазными роторами мощностью 160–320 кВт. Они работают на одну венцовую шестерню через соответствующие редукторы. Регулирование скорости осуществляется подключением добавочных сопротивлений в цепях роторов с помощью контакторов. Такое регулирование имеет ряд недостатков: низкие надежность и к.п.д., невозможность оптимизировать технологический процесс.

Этих недостатков лишен электропривод печи спекания по схеме АВК, который имеет ряд существенных отличий от приводов с использованием преобразователей серии ТП-АД.



**Рис. 49. Принципиальная схема двухдвигательного электропривода печи спекания по схеме АВК**

Силовая схема двухдвигательного электропривода печи спекания показана на рис. 49. Неуправляемые выпрямители Вп1, Вп2 и ведомые сетью инверторы Ип1, Ип2 выполнены по трехфазной мостовой схеме.

С целью равномерного распределения нагрузки, создаваемой печью на приводные двигатели АД<sub>1</sub> и АД<sub>2</sub>, выпрямители и инверторы преобразователей соединены последовательно. Сглаживающий дроссель Др, установленный в звене постоянного тока, состоит из двух дросселей типа ФРОС-100, также включенных последовательно.

В состав силовой части преобразователя входят трансформаторы Тр1 и Тр2 (типа ТСЗП-250) и типа ТС-100; последний работает в режиме вольтдобавочного). Величины вторичных напряжений трансформаторов Тр1 и Тр2 позволяют обеспечить глубину регулирования скорости печи 12:1.

По результатам исследований, проведенных ВАМИ на Павлодарском алюминиевом заводе, необходимая глубина регулирования скорости для получения специальных режимов разогрева печи должна составлять 10:1.

Последовательное включение ведомых сетью инверторов позволяет повысить коэффициент мощности преобразователя путем применения несимметричного фазоимпульсного управления. Данный способ управления существенно снижает потребление инверторами реактивной мощности [5] по сравнению с симметричным способом, причем затраты на его реализацию практически не возрастают.

Для защиты преобразователя при аварийных режимах от токов выше допустимых установлены автоматические выключатели В1 и В2. Они отключают преобразователь

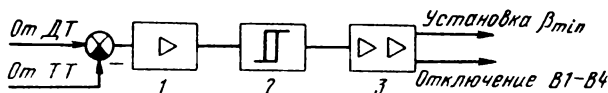


Рис. 50. Структурная схема датчика однофазного опрокидывания прорыва инвертора: 1 – усилитель; 2 – пороговый элемент; 3 – усилитель мощности

от источников электрической энергии (питающая сеть и асинхронные двигатели). Энергия, запасенная в сглаживающем дросселе, рассеивается устройством защиты от перенапряжений.

В качестве датчиков аварийного режима применяют трансформаторы тока ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub> и датчик тока в цепи постоянного тока. При прорыве инвертора в некоторых случаях аварийные токи могут незначительно превышать пусковые токи в нормальном режиме. Для повышения чувствительности защиты при прорыве инверторов применяется схема, приведенная на рис. 50.

На суммирующий усилитель поданы в противофазе напряжение с датчика тока и выпрямленное напряжение, снимаемое с датчиков тока трансформаторов ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub>. Разность сигналов усиливается и подается на релейный элемент, который формирует сигналы на отключение автоматов В1–В4 и уменьшение угла управления инверторами до минимального значения  $\beta_{\min}$ . Эти сигналы формируются при прорыве инвертора, когда происходит превышение выпрямленного тока роторов в звене постоянного тока  $i_d$  над током, снимаемым с датчиков трансформаторов ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub> (см. рис. 49).

Для тиристорных электроприводов наибольшее распространение получили системы с подчиненным регулированием. Они наиболее просты, содержат меньше элементов и более удобны при настройке электропривода [6]. На рис. 51 представлена схема системы с подчиненным регулированием электропривода печи спекания.

Внешнему контуру регулирования э.д.с. подчинен внутренний контур регулирования выпрямленного тока роторов. Такое построение системы регулирования позволяет оптимизировать протекание переходных процессов, снизить динамические нагрузки в механических звеньях, повысить жесткость механических характеристик электропривода. Как показали промышленные испытания, жесткость механических характеристик асинхронного вентильного каскада при разомкнутой системе регулирования в зоне больших скольжений недостаточна для мощных вращающихся печей.

Это объясняется значительными изменениями момента сопротивления в течение одного оборота печи.

Уравнение механического и электрического равновесия асинхронного вентильного каскада имеет вид:

$$K_1 E_p S - E_{dH} = L_3 di/dt + R_3 i_d, \quad (59)$$

где  $E_{dH}$  — выпрямленная э.д.с. инвертора, В;  $L_3$  и  $R_3$  — соответственно эквивалентные индуктивность и активное сопротивление цепи выпрямленного тока ротора, Гн и Ом;  $i_d$  — выпрямленный ток ротора, А;  $K_1$  — коэффициент схемы выпрямления э.д.с. ротора;  $E_p$  — э.д.с. неподвижного ротора, В;  $S$  — скольжение двигателя.

Сходство структурной схемы линеаризованной модели асинхронного вентильного каскада со структурой ТП-Д позволяет применять к этой модели все разработанные способы коррекции тиристорных электроприводов постоянного тока.

В системах с обратной связью по выпрямленной э.д.с. ротора основная проблема связана с точным безынерционным выделением этой э.д.с. [6].

В регулятор э.д.с. (см. рис. 51), кроме положительной обратной связи по току с фиксированным коэффициентом передачи, введена дополнительная обратная связь, коэффициент передачи которой меняется пропорционально напряжению на роторе с помощью множительного устройства. Выход системы регулирования (регулятор тока) согласуется с входом системы импульсно-фазового управления с помощью ячейки управления, представляющей собой эмиттерный повторитель.

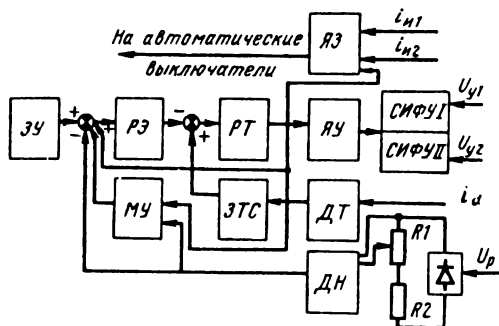


Рис. 51. Функциональная схема системы управления двухдвигательным электроприводом по схеме АВК

Темп разгона определяется задающим устройством. Выходное напряжение задающего устройства изменяется по двум законам и характеризуется различной интенсивностью. На первом участке с меньшим темпом изменения напряжения обеспечивается плавный выбор зазоров в механических звеньях, после чего на втором участке обеспечивается необходимый темп разгона привода.

При достижении двигателем максимальной скорости, близкой к номинальной, схема логики выдает команду на включение контактора, который своими контактами закорачивает кольца ротора. После срабатывания контактора углы управления инверторами автоматически устанавливаются до значения  $\beta_{\min}$ ; перед размыканием контакторов инверторы переводятся в режим работы с углом  $\beta_{\max}$ , что обеспечивает бестоковую коммутацию контактора.

Силовая часть преобразователя выполнена на основе таблеточных тириستоров Т-500 и вентилей В-800 с улучшенными динамическими параметрами и размещена в двух шкафах одностороннего обслуживания размером 2100х900х450 мм. В каждом силовом шкафу каркасной конструкции размещены шесть тириستоров и шесть вентилей, образующих соответственно ведомый инвертор и неуправляемый выпрямитель, собранные по трехфазной мостовой схеме. Тиристор или вентиль, защитная RC-цепь, быстродействующий предохранитель и цепи управления и сигнализации конструктивно объединены в легкоъемный блок. Охлаждение тиристоров и вентилей воздушное естественное.

Система управления преобразователем размещена в шкафу, имеющем размеры силовой секции. Свободный доступ к элементам схемы обеспечивается размещением модулей на поворотной панели.

Силовые шкафы и шкаф управления при монтаже скрепляются и образуют единую жесткую конструкцию. Одностороннее обслуживание шкафов позволяет сократить занимаемую преобразователем площадь.

*Тепловые режимы асинхронных двигателей и энергетические показатели электропривода.* При введении регулируемых асинхронных электроприводов по схеме вентильного каскада, работающих длительно на скоростях, меньших номинальной, необходимо обеспечить нормальный тепловой режим двигателей. Габаритную мощность двигателя выбирают, исходя из особенностей способа регулирования скорости, времени работы на пониженной скорости, способа вентиляции двигателя, чтобы максимальная температура обмоток двигателя не превышала допустимого значения.

Наличие выпрямителя в роторной цепи приводит к тому, что ток ротора имеет не синусоидальную форму, а близкую к прямоугольной. Из-за наличия индуктивности рассеяния коммутация вентилей выпрямителя происходит в течение некоторого времени, что обуславливает потребление дополнительной реактивной мощности из сети. Это так называемая коммутационная реактивная мощность. Увеличение частоты напряжения ротора при глубоком регулировании скорости двигателя является причиной увеличения потерь на гистерезис и от вихревых токов в магнитопроводе ротора. Одновременно уменьшаются добавочные потери в магнитопроводе: поверхностные и пульсационные. Благодаря этому общие потери в магнитопроводе практически остаются постоянными во всем диапазоне регулирования скорости. Электрические потери в обмотках ротора увеличиваются вследствие поверхностного эффекта, обусловленного наличием высших гармоник в кривой тока ротора. Влияние высших гармоник на потери в статоре учитывают при расчете путем увеличения электрических и магнитных потерь на 10 %.

Широкое применение асинхронно-вентильный каскад получил для механизмов с квадратичной зависимостью момента статического сопротивления от скорости вращения (механизмы с вентиляторным моментом, например насосы, газозаводов, вентиляторы и пр.) с диапазоном регулирования скорости 2:1. Такой диапазон вполне достаточен для данных механизмов. В этом случае дополнительных мер при выборе двигателя, кроме учета снижения использования его по максимальному моменту на 7–10 %, не требуется, так как по мере снижения скорости и ухудшения теплоотдачи резко уменьшаются потери в обмотках двигателя [4].

Особенности работы асинхронного двигателя в схеме АВК вызывают необходимость разработки двигателя со специальным выполнением обмоток.

Степень завышения мощности асинхронного двигателя при использовании в схеме АВК удобно оценивать по коэффициенту завышения мощности<sup>1</sup>:  $\lambda_p = P_H / P_{\max}$  (60), где  $P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  $P_{\max}$  – максимальная мощность на валу двигателя, кВт,  $P_{\max} = M_{\text{м.с}} \omega_H$ ;  $M_{\text{м.с}}$  – максимальный статический момент сопротивления, кН·м;  $\omega_H$  – номинальная частота вращения двигателя, рад/с.

Коэффициент  $\lambda_p$  – величина, обратная коэффициенту использования двигателя по моменту, который показывает, во сколько раз следует снизить момент статического сопротивления двигателя при работе на пониженной скорости.

При работе с постоянным статическим моментом сопротивления  $\lambda_p = M_H / M_{\text{с}}$ .

Коэффициент  $\lambda_p$  зависит от диапазона регулирования скорости двигателя, характера изменения нагрузки в функции скорости и режима работы электропривода.

Ухудшение теплоотдачи учитывается коэффициентом теплоотдачи  $\beta$ , который является нелинейной функцией скорости. Так как относительный коэффициент теплоотдачи изменяется от наименьшего значения при неподвижном роторе до  $\beta = 1,0$  при номинальной скорости, то [22]:

$$\beta = (D\beta_0 + 1 - \beta_0) / D, \quad (61)$$

где  $D = \omega_H / \omega_{\min}$ ;  $\omega_{\min}$  – минимальная круговая частота вращения, рад/с.

<sup>1</sup> Кирпичников Ю.П. Разработка и исследование совместного тиристорного управления асинхронными двигателями с фазным ротором. Автореф. канд. дис. Свердловск, 1975.

Условие выбора мощности двигателя:  $\Delta P_{\text{ср}} < \Delta P_{\text{н}} \epsilon_{\text{кат}}$  (62), где  $\Delta P_{\text{ср}}$  – средние потери за время работы привода, кВт;  $\epsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент включения для заданного графика;  $\Delta P_{\text{н}}$  – номинальные потери в двигателе, кВт;  $\epsilon_{\text{кат}}$  – приведенный каталожный коэффициент включения двигателя, соответствующий номинальным потерям  $\Delta P_{\text{н}}$  и учитывающий влияние ухудшения условий охлаждения во время паузы;  $\epsilon_{\text{кат}} = \epsilon_{\text{кат}} / [\epsilon_{\text{кат}} + \beta_0 (1 - \epsilon_{\text{кат}})]$ .

Для повторно-кратковременного режима

$$\lambda_p > \sqrt{\frac{K_{\text{п}}^2 \epsilon (1 - A)}{\epsilon'_{\text{кат}} [\epsilon \epsilon_{\text{пр}} \beta_{\text{в}} + \epsilon (1 + \epsilon_{\text{пр}}) + \beta_0 (1 - \epsilon) - K_{\text{п}}^2 \epsilon A]}}, \quad (63)$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий наличие высших гармонических составляющих в токе;  $A$  – постоянная, определяемая по каталогу для конкретного двигателя;  $A = (I_0 / I_{\text{н}})^2$ ;  $I_0$  – ток статора двигателя на холостом ходу, А;  $I_{\text{н}}$  – номинальный ток статора двигателя, А;  $\epsilon$  – относительная продолжительность включения привода.

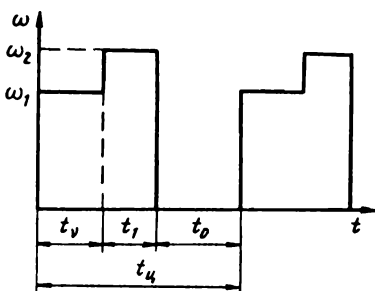


Рис. 52. Тахограмма работы электропривода для повторно-кратковременного режима

При двухступенчатом графике работы электропривода в повторно-кратковременном режиме (рис. 52) относительную продолжительность включения определяют по формуле

$$\epsilon = t_{\text{в}} / t_{\text{ц}} = (t_1 + t_{\text{в}}) / t_{\text{ц}}. \quad (64)$$

Выражая время  $t_{\text{в}}$  в долях от всего времени работы в цикле  $\epsilon_{\text{пр}} = t_{\text{в}} / (t_1 + t_{\text{в}})$ , получим  $t_{\text{в}} = t_{\text{пр}} \epsilon_{\text{пр}} = \epsilon \epsilon_{\text{пр}} t_{\text{ц}}$ ;  $t_1 = t_{\text{пр}} (1 - \epsilon_{\text{пр}}) = t_{\text{ц}} (1 - \epsilon_{\text{пр}})$ ;  $t_0 = t_{\text{ц}} (1 - \epsilon)$ .

Для длительного режима работы, когда время работы на пониженной скорости  $t_{\text{в}}$  невелико по сравнению с постоянной времени нагрева  $T_{\text{н}}$  ( $t_{\text{в}} < T_{\text{н}}$ );  $\epsilon = 1,0$ ;  $\epsilon_{\text{кат}} = 1,0$ , имеем:

для двигателей серии АК

$$\lambda_p > \sqrt{K_{\text{п}}^2 (1 - A) / [\epsilon_{\text{пр}} \beta_{\text{в}} + (1 - \epsilon_{\text{пр}}) - K_{\text{п}}^2 A]}; \quad (65)$$

для двигателей серии МТ

$$\lambda_p > \sqrt{K_{\text{п}}^2 (1 - A) / \epsilon'_{\text{кат}} [\epsilon_{\text{пр}} \beta_{\text{в}} + (1 - \epsilon_{\text{пр}}) - K_{\text{п}}^2 A]}. \quad (66)$$

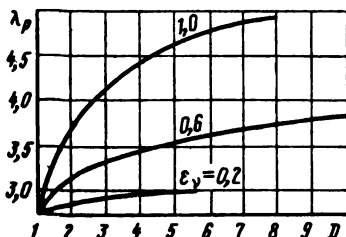


Рис. 53. Зависимость  $\lambda_p = f(D)$  при  $M_{\text{с}} = \text{const}$  и повторно-кратковременном режиме работы двигателей серии МТ и МТВ

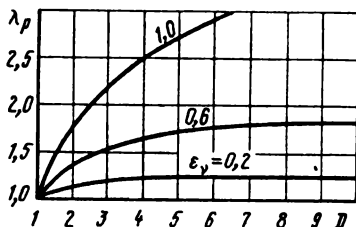


Рис. 54. Зависимость  $\lambda_p = f(D)$  при  $M_{\text{с}} = \text{const}$  и длительном режиме работы двигателей серии АК



Расчетные значения  $\lambda_0$  в зависимости от диапазона регулирования двигателя приведены на рис. 53 и 54. Расчет производили при постоянном моменте сопротивления  $M_c$  и следующих значениях коэффициентов:  $\epsilon = 0,25$ ;  $\beta = 0,5$  – для двигателей серии МТ и МТВ и  $\beta_0 = 0,25$  – для двигателей серии АК;  $A = 0,4$  для МТ и МТВ и  $A = 0,1$  для АК.

Из рисунков видно, что для электроприводов, длительно работающих на пониженной скорости, необходимо применять асинхронные двигатели с независимой вентилиацией. Применение двигателей с самовентилиацией ведет к завышению их габаритной мощности в 2–3 раза, что при значительной мощности электропривода резко увеличивает стоимость двигателя. Кроме того, в переходных режимах двигатель может развивать моменты, превышающие допустимый для редуктора и механизма.

*Применение асинхронного электропривода по схеме вентильного каскада в системах автоматического регулирования технологическими процессами.* На основе применения асинхронного электропривода по схеме вентильного каскада стабилизирована плотность пульпы в смесителях гидрометаллургического производства на Уральском алюминиевом заводе, автоматизирован процесс разрежения газов в конвертере с боковым отсосом на Красноуральском медеплавильном заводе и т.д.

Значительный экономический эффект, в основном за счет сокращения расхода топлива, достигается при автоматизации трубчатых вращающихся печей: обжиговых, спекания и кальцинации глиноземного производства. Рассмотрим для примера систему автоматического регулирования оптимальными параметрами печей кальцинации Павлодарского алюминиевого завода.

В качестве критерия оптимальности принят суммарный минимальный расход мазута всеми печами при заданной производительности цеха кальцинации. Функцию цели определяют по выражению [6]

$$\min_{\{G_i, D_i\}} \sum_{i=1}^m Q_i = \min_{i=1}^m \sum f(G_i, D_i), \quad (67)$$

где  $Q_i$  – расход мазута, кг;  $G_i$  – производительность печи, т/ч;  $D_i$  – коэффициент продольного перемешивания материала в печи;  $m$  – количество работающих печей;  $i$  – номер печи.

Коэффициент продольного перемешивания  $D_i$  пропорционален производительности  $G_i$ , умноженной на частоту вращения печи  $n_i$ . На рис. 55 показана зависимость расхода мазута и температуры отходящих газов  $T_{0,г}$  от величины  $D_i$ . Хотя при уменьшении коэффициента продольного перемешивания материала увеличивается температура отходящих газов, расход мазута остается прежним (он прямо пропорционален  $D_i$ ) [23].

Следовательно, экономически целесообразно уменьшить  $D_i$ , т.е. скорость вращения печи, при заданном количестве гидрата. Но поскольку с уменьшением  $D_i$  возрастает температура отходящих газов, которая по условиям работы электрофильтров не может быть выше  $400^\circ\text{C}$ ,  $D_i$  уменьшают до тех пор, пока  $T_{0,г}$  не превышает эту величину. Зависимость производительности печи, при которой расход мазута минимальный, от  $D_i$  также показана на рис. 55.

Для определения производительности частоты вращения печей при заданном количестве гидрата получен следующий алгоритм расчета.

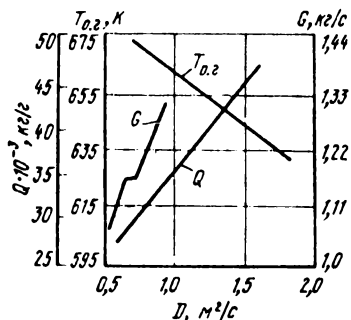


Рис. 55. Зависимость расхода мазута  $Q$ , температуры отходящих газов  $T_{0,г}$  и производительности  $G$  от коэффициента продольного перемешивания материала  $D$  в печи кальцинации

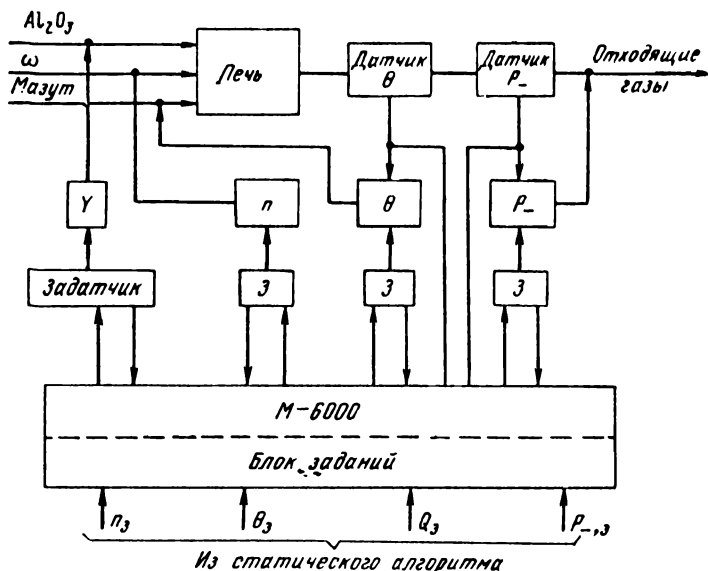


Рис. 56. Принципиальная схема управления печью калыцинации при заданной производительности:

$Q_3, \theta_3, P_{-3}, n_3$  — соответственно расчетные значения расхода гидрата окиси алюминия, количества тепла в печи, при котором качество глинозема будет заданным, разрежения в печи, частоты вращения печи;  $Y, n, \theta, P_{-}$  — соответственно регуляторы качества глинозема, частоты вращения печи, сгорания мазута, стабилизации тягового режима печи

Выявляются оптимальная производительность каждой печи и пределы изменения ее при непостоянстве режима работы печи:  $G_H < G_{\text{опт}} < G_B$ , т.е. печь не может работать с производительностью  $G_i < G_H$  и  $G_i > G_B$ .

Пусть задана суммарная производительность печей  $B$  согласно наличию гидрата. При  $m G_H \leq B \leq m G_{\text{опт}}$  имеем  $G_i = B/m$ ;  $n_i = D_i / G_i$ , т.е., если производительность каждой печи может быть меньше оптимальной, заданная суммарная производительность распределяется поровну между печами.

При  $m G_{\text{опт}} \leq B \leq m G_B$  имеем  $G_i = (B - m G_{\text{опт}}) G_{\text{опт}} / N$ ;  $n_i = D_i / G_i$ . Отсюда  $B = G_{\text{опт}} (m - N) + G_i N$ , где  $N = (B - m G_{\text{опт}}) / (G_i - G_{\text{опт}})$  — число печей, производительность которых должна быть выше оптимальной.

Для обеспечения производительности  $m - N$  печей должны работать с оптимальной производительностью, а  $N$  печей — с более высокой.

Приведенный алгоритм расчета легко реализуется на УВМ.

После расчета  $G_i$  и  $n_i$  необходимо определить, при каком количестве тепла в печи  $\theta_3$  качество глинозема будет заданным. Эту величину можно найти на основе данных материально-теплого баланса, если известны конструктивные параметры печи.

Для каждой печи определяют пределы регулирования подачи мазута:  $Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}$ . Величину  $Q_i$  рассчитывают по уравнению:  $Q_i = Q_{\min} + K_i (G_i) + \Delta y$  (68), где  $K_i (G_i)$  — коэффициент  $i$ -той печи;  $\Delta y$  — постоянное отклонение величины показателя качества глинозема от заданной.

Приведенные алгоритмы расчетов реализуются на АСВТ модели М-6000. На рис. 56 показана принципиальная схема управления печью посредством АСВТ при недостатке гидрата. ЭВМ управляет задатчиками регуляторов.

### 3. Тиристорные возбудители синхронных двигателей технологических установок

Экономичные режимы работы синхронных двигателей достигаются при автоматическом регулировании возбуждения по оптимальному закону регулирования. От режима возбуждения синхронных двигателей непосредственно зависят потери в самих двигателях и системе электроснабжения, напряжение в системе электроснабжения [24, 25].

Тиристорные возбудители серии ВТЦ обеспечивают автоматическое регулирование возбуждением и обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами подобных возбудителей, выпускаемых в СССР: меньшей массой и незначительными габаритными размерами; упрощенной компоновкой элементов силовой части и систем управления и регулирования, обеспечивающей более свободный доступ ко всем элементам установки при обслуживании; улучшенной технологичностью при изготовлении, что позволило снизить их себестоимость [7].

Питание тиристорных возбудителей осуществляется от сети напряжением 0,4 кВ, частотой 50 Гц. Схема выпрямления принята трехфазная, нулевая. К.п.д. составляет 0,92. Остальные технические данные возбудителей приведены в табл. 8.

Состав возбудителей очевиден из структурной схемы, приведенной на рис. 57.

Т а б л и ц а 8. Основные параметры тиристорных возбудителей серии ВТЦ (1200×600×1900 мм)

Тип возбудителя	Ток номинальный выпрямленный, А	Напряжение выпрямленное, В		Трансформатор		Масса, кг
		номинальное	максимальное	тип	вторичное напряжение, В	
ВТЦ-160/36	160	36	68	ТСВ-16/0,5	100	425
ВТЦ-200/60	200	60	110	ТСВ-25/0,5	160	465
ВТЦ-250/60	250	60	110	ТСЗВ-40/0,5	160	615
ВТЦ-320/75	320	75	155	ТСЗВ-63/0,5	230	740
ВТЦ-320/115	320	115	235	ТСЗВ-100/0,5	350	865
ВТЦ-400/75	400	75	155	ТСЗВ-100/0,5	230	880

Схема содержит силовую часть, включающую: автоматический выключатель с дистанционным расцепителем В1; силовой трансформатор; выпрямитель; разрядное сопротивление; тиристорный ключ управления разрядным сопротивлением Д1, Д2; систему импульсно-фазового управления; ячейку пуска и управления; систему авторегулирования ячейкой регулирования; системы измерения тока ротора, тока статора и тока напряжения; задатчик; ячейку защиты. По сигналам последней одновременно отключаются автомат В и масляный выключатель в статорной обмотке синхронного двигателя. Системы управления регулирования и защиты ВТЦ обеспечивают: формирование управляющих импульсов тириستоров выпрямителя; сдвиг управляющих импульсов в соответствии с сигналами системы управления; автоматическую подачу возбуждения в процессе пуска синхронного двигателя; бесконтактное включение и отключение разрядного сопротивления и его защиту от перегрева; режим инвертирования тока возбуждения при нормальных и аварийных отключениях синхронного двигателя; автоматическое и ручное регулирование возбуждения последнего; форсировку возбуждения синхронного двигателя при глубоких (ниже 0,8  $U_N$ ) посадках напряжения сети; защиту от перегрузок и коротких замыканий; защиту от протекания тока в цепи разрядного сопротивления во всех режимах возбудителя, за исключением режима пуска; защиту от затянувшегося пуска и длительного асинхронного хода двигателя; защиту от перенапряжений со стороны сети и нагрузки; сигнализацию включенного состояния возбудителя; сигнализацию наличия напряжения в шкафу возбудителя; сигнализацию срабатывания защит (протека-

ния тока в цепи разрядного сопротивления во всех режимах работы возбудителя, за исключением режима пуска, затянувшегося пуска, длительного асинхронного хода).

При пуске, во избежание перенапряжений со стороны обмотки ротора и создания необходимого входного момента на валу при подсинхронной частоте вращения, обмотка ротора включается на разрядное сопротивление. Включение и отключение последнего осуществляется автоматически бесконтактной схемой, которая подключает разрядное сопротивление при пуске параллельно обмотке ротора и отключает его после вхождения двигателя в синхронизм.

Во время синхронной работы двигателя регулирование тока возбуждения может осуществляться в ручном и автоматическом режимах, а также в режиме стабилизации выпрямленного тока. Задаёт ток возбудителя во всех режимах потенциометр, а выбор режима работы — переключатель. При снижении напряжения сети до  $(0,8-0,85) U_H$  система регулирования осуществляет форсировку возбуждения. Продолжительность форсировки контролируется электронным реле времени, которое по истечении заданной выдержки подает команду на ее отключение.

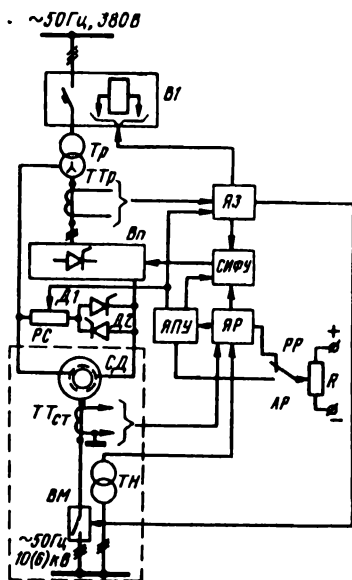


Рис. 57. Структурная схема тиристорного возбудителя типа ВТЦ

Ячейка пуска и управления осуществляет подачу выпрямленного тока возбудителя в функции частоты тока ротора двигателя. Одновременно ячейка пуска и управления осуществляет управление углом отпирания тириستоров силового моста преобразователя.

Напряжение управления, поступающее на ячейку пуска и управления, снимается в ручном режиме с потенциометра, а в автоматическом — с ячейки регулирования. С ячейки пуска и управления управляющее напряжение поступает на ячейку системы импульсно-фазового управления, где происходит формирование управляющих импульсов, необходимых для открывания тиристоров силового моста преобразователя.

Предприятия, на которых наблюдаются частые случаи отклонения напряжения, ставили под сомнение работоспособность синхронного двигателя с возбудителями типа ВТЦ. Для проверки устойчивости синхронного двигателя со статическими возбудителями на Балхашском ГМК были проведены испытания. Электропривод шаровой мельницы синхронного двигателя типа ДС-1807-24 (445 кВт, 3 кВ, 153 А) запитывался через трансферную систему шин обогатительной фабрики от отдельного генератора мощностью 20 МВт, установленного на ТЭЦ. От этой же системы шин через понизительный трансформатор записывалась установка типа ВТЦ.

Изменением напряжения генератора имитировали понижения напряжения до  $0,62 U_H$ . Было произведено пять опытов длительностью 20 с каждый. Автоматический регулятор возбуждения был настроен на поддержание постоянства напряжения на шинах 3 кВ, ток возбуждения в стационарных режимах ограничивался:  $0,8 I_{в.н} < I_B < 1,2 I_{в.н}$ . Скорость падения напряжения составляла 170 В/с.

Зависимости относительного значения тока возбуждения  $I_B/I_{в.н}$  (кривая 1), относительного значения активной мощности  $P/P_H$  (кривая 2) и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  (кривая 3) от относительного значения напряжения в системе электро-

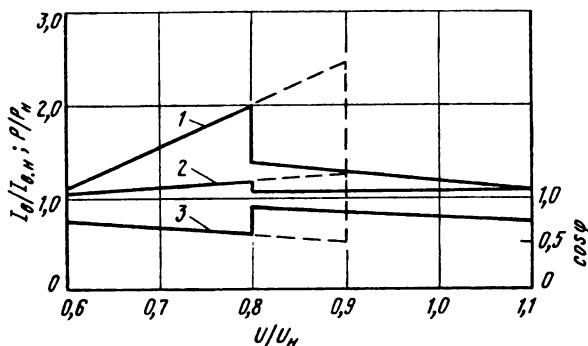


Рис. 58. Зависимость параметров СД типа ДС-1807-24 с возбудителем типа ВТЦ от напряжения в системе электро-снабжения

снабжения приведены на рис. 58. При напряжении  $0,8 U_n$  срабатывало устройство форсировки тока возбуждения. При восстановлении напряжения весь процесс повторялся в обратном порядке (пунктирные линии на рис. 58). Снятие форсировки возбуждения происходило при напряжении  $0,9 U_n$ .

Испытания показали, что синхронный двигатель с возбудителем типа ВТЦ сохраняет работоспособность при понижении напряжения до  $0,62 U_n$ , колебаний тока статора не наблюдается.

Форсировочную способность возбудителей типа ВТЦ, которая определяется скоростью нарастания тока возбуждения, проверяли также на Павлодарском алюминиевом заводе при глубоких посадках напряжения в системе электроснабжения  $10 \text{ кВ}$ . Синхронный двигатель типа СТМ-6000-2А ( $4000 \text{ кВт}$ ,  $3000 \text{ об/мин}$ ,  $10 \text{ кВ}$ ), привод турбокомпрессора типа К-500 испытывали с электромашиным возбудителем типа ВТ-50-3000 и возбудителем типа ВТЦ [2].

При работе с электромашиным возбудителем скорость нарастания напряжения возбуждения в форсировочном режиме составляет  $234 \text{ В/с}$ . При работе с тиристорным возбудителем напряжение возбуждения достигает максимального значения мгновенно.

Максимальное значение напряжения возбуждения электромашиного возбудителя на  $40 \%$  больше максимального значения напряжения тиристорного возбудителя. Однако из-за меньшей постоянной времени ток возбуждения при работе синхронного двигателя с тиристорным возбудителем в течение  $0,5 \text{ с}$  выше тока возбуждения при работе с электромашиным возбудителем (рис. 59). Из этого следует, что форсировочная способность возбудителей типа ВТЦ не уступает электромашиным [25].

**Алгоритм регулирования тока возбуждения СД с помощью возбудителя типа ВТЦ.** Большинство синхронных приводов на предприятиях цветной металлургии имеет постоянную, плавно меняющуюся или пульсирующую нагрузку, поэтому выбрана следующая зависимость тока возбуждения двигателя от напряжения сети и коэффициента мощности:  $I_B = K_1 I_{B,n} - K_2 V - K_3 \cos \varphi$  (69), где  $K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты усиления;  $I_{B,n}$  – номинальная величина тока возбуждения,  $A$ ;  $V$  – отклонения напряжения,  $B$ ;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности двигателя.

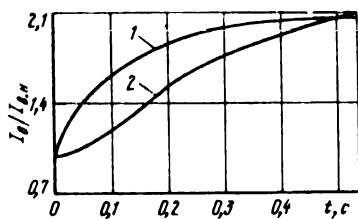


Рис. 59. Диаграммы нарастания форсировочного тока возбуждения СД типа СТМ-6000-2А с тиристорным (1) и электромашиным (2) возбудителями при глубоких посадках напряжения

Неизменную и медленно меняющуюся нагрузку создают насосные, вентиляторные установки, газо- и воздуходувки, различного рода компрессорные турбомашин, шаровые мельницы и другие технологические агрегаты. Пульсирующие нагрузки – поршневые насосы.

Ниже приведены характеристики наиболее распространенных типов синхронных двигателей:

Тип СД. . . . .	СТМ, СМ*	СДМ*	ДС, ДСТ* и др.	ДСК, ДСКП, ДСКЗ, СДК, МС**
$P_H$ , кВт . . . . .	800–1200	320–6300	300 5000	250 800
$n$ , об/мин . . . . .	3000	167–1000	167–1500	167–187

\* Постоянная и медленно меняющаяся нагрузка. \*\* Пульсирующая нагрузка.

Ток возбуждения синхронного двигателя в регуляторе ограничивается по максимальному и минимальному значениям.

Минимально допустимое значение тока возбуждения синхронного двигателя определяется, исходя из следующих условий [26]:

а) втягивания синхронного двигателя в синхронизм:

$$I_{в \min} > 4 \cdot 10^{-2} I_{в.н} n_0^2 f G D^2 / K_U K_H P_H \quad (70)$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц;  $n_0$  – синхронная частота вращения синхронного двигателя, об/мин;  $G D^2$  – суммарный приведенный маховой момент электропривода, кг·м<sup>2</sup>;  $K_U$  – относительное значение максимально возможного уровня напряжения в системе электроснабжения;  $K_H$  – перегрузочная способность синхронного двигателя;  $P_H$  – номинальная мощность синхронного двигателя, кВт;

б) статической устойчивости:  $I_{в \min} > I_{в.н} \beta_{\max} / K_U K_H$  (71), где  $\beta_{\max}$  – максимальное относительное значение статической нагрузки.

Для синхронного двигателя с плавно-меняющейся нагрузкой на валу минимально допустимое значение тока возбуждения достаточно определять только по выражению (70).

Максимально допустимый ток возбуждения определяют по величине предельного значения реактивной мощности синхронного двигателя [26], которая зависит от двух условий:

а) нагрева статора:

$$|\alpha| \leq \sqrt{(1 - \beta^2 \cos^2 \varphi_H) / (1 - \cos^2 \varphi_H)}, \quad (72)$$

где  $\cos \varphi_H$  – номинальный коэффициент мощности синхронного двигателя;  $\alpha = Q_{с \max} / Q_H$  – относительное значение реактивной мощности синхронного двигателя;

б) нагрева ротора:

$$\alpha \leq \sqrt{\epsilon^2 (I_{в \max} / I_{в.н})^2 - \beta^2 X_d^2 \cos^2 \varphi_H / X_d \sin \varphi_H}, \quad (73)$$

где  $\epsilon^2 = \cos^2 \varphi_H + (X_d + \sin \varphi_H)^2$ ;  $X_d$  – относительное реактивное сопротивление синхронного двигателя по продольной оси.

Максимальная величина располагаемой реактивной мощности (квар), которую может генерировать синхронный двигатель:

$$Q_{с \max} = \alpha_m P_H \operatorname{tg} \varphi_H / \eta_H \quad (74)$$

где  $\alpha_m$  – наибольшая допустимая перегрузка синхронного двигателя по реактивной мощности, зависящая от типа двигателя, величины напряжения в системе электроснабжения и загрузки двигателя по активной мощности.

Максимально допустимое значение тока возбуждения выбирают (учитывая тепловую устойчивость обмотки ротора в длительном режиме работы синхронного двигателя) по формуле (72). Обычно  $I_{в \max} \leq 1,2 I_{в.н}$ .

Процессы, происходящие в синхронном двигателе при изменении тока возбуждения, удобно рассмотреть на векторной диаграмме, представленной на рис. 60.

Вектор напряжения сети  $U_c$  откладывают по вертикали. Если момент нагрузки равен нулю, то активную составляющую тока статора также можно принять равной

нулю. В этом случае э.д.с. двигателя будет равна и противоположно направлена напряжению сети  $U_c$ . Магнитный поток, создающий э.д.с., выражается вектором  $\Phi$ . Если увеличивать момент нагрузки, одновременно поддерживая  $\cos \varphi = 1$ , до тех пор, пока ток статора не достигнет величины  $I_{\text{я}}$ , то результирующий магнитный поток двигателя возрастет до значения, определяемого вектором  $\Phi_1$ . С увеличением возбуждения двигателя при неизменном моменте нагрузки повышается реактивная составляющая тока статора, который постепенно растет до значения  $I_1$ , а магнитный поток — до величины  $\Phi_2$ . Синхронный двигатель работает с опережающим значением  $\cos \varphi_1$  [21].

При снижении напряжения  $U_2$  на зажимах синхронного двигателя и номинальном токе возбуждения U-образная характеристика сдвигается влево, что свидетельствует

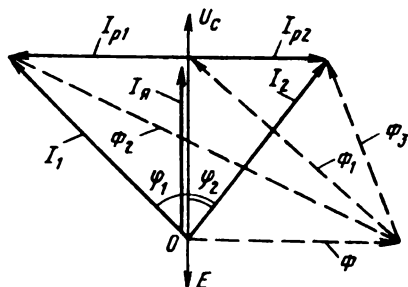


Рис. 60. Векторная диаграмма СД

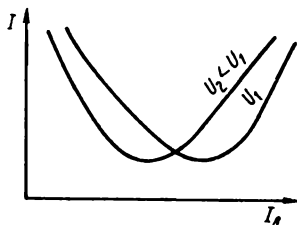


Рис. 61. U-образные характеристики СД

об увеличении компенсирующего эффекта двигателя. При увеличении напряжения  $U_1$  на зажимах двигателя U-образная характеристика сдвигается вправо. На рис. 61 приведены U-образные характеристики синхронного двигателя при различных напряжениях на зажимах статора.

Выбирая соответствующие величины коэффициентов усиления в выражении (69), можно обеспечить работу синхронного двигателя с постоянным значением коэффициента мощности ( $\cos \varphi < 1$ ), с коррекцией по величине напряжения сети, с  $\cos \varphi = 1$  и постоянным напряжением в сети.

При использовании синхронного двигателя для регулирования напряжения необходимо иметь в виду, что при работе в режиме перевозбуждения потери активной мощности в двигателе увеличиваются по сравнению с потерями при работе в номинальном режиме. Это обстоятельство ухудшает экономические показатели двигателя при выработке реактивной мощности. Однако проведенные расчеты показали, что использование двигателя мощностью 1000 кВт и выше при частоте вращения 600 об/мин и более экономичнее, чем применение конденсаторов. Синхронный двигатель меньшей мощности со средней частотой вращения в ряде случаев менее выгоден. Реактивную мощность двигателей средней мощности на напряжении до 1 кВ необходимо использовать полностью, так как стоимость их на 20–30 %, а аппаратура в 3–4 раза ниже стоимости двигателей на напряжении 6 кВ, а к.п.д. выше на 1–2 %. При этом не требуется увеличение мощности распределительных трансформаторов, питающих узлы нагрузок. Использование компенсирующей способности тихоходных синхронных двигателей (частота вращения 250 об/мин и меньше) мощностью 600 кВт и менее при номинальном напряжении неэкономично. Рекомендуется эксплуатировать эти двигатели при коэффициенте мощности, равном единице [28].

При решении вопроса об использовании компенсирующей способности двигателей для регулирования напряжения следует иметь в виду, что поддержание напряжения в узле нагрузки возможно при соблюдении следующих условий:

$$+\Delta U_{\text{max}} < (X/U_n) (Q_{c \text{ max}} - Q_{c.o}); \quad (75)$$

$$-\Delta U_{\text{max}} > X/U_n (Q_{c \text{ min}} - Q_{c.o}), \quad (76)$$

где  $+\Delta U_{\text{max}}$  и  $-\Delta U_{\text{max}}$  — соответственно максимально возможные снижения и превышения напряжения в узле нагрузки по отношению к зоне технически допустимых

уровней, В;  $X$  – индуктивное сопротивление сети от центра питания до синхронного двигателя, Ом;  $Q_{с\max}$  и  $Q_{с\min}$  – соответственно максимальные и минимальные располагаемые значения суммарной реактивной мощности синхронного двигателя, квар;  $Q_{с.о}$  – суммарная реактивная мощность синхронного двигателя в расчетном режиме, квар. За расчетный следует принимать режим возбуждения синхронного двигателя, обеспечивающий минимум потерь электроэнергии.

Если условия формул (75) и (76) не выполняются, необходимо предусматривать другие регулирующие средства для поддержания напряжения, например трансформаторы с регулированием под нагрузкой.

Как видно из приведенных условий, регулирующая способность синхронного двигателя в общем случае тем выше, чем дальше узел нагрузки от центра питания. Однако, если напряжение в центре питания постоянно и изменение активной мощности узла нагрузки не вызывает заметных изменений уровней напряжения  $X \gg r$ , то регулирующая способность синхронного двигателя не будет зависеть от удаленности узла нагрузки. В этом случае техническая возможность применения компенсирующей способности двигателя для поддержания напряжения может быть выявлена из условия:

$$Q_{a\max} - Q_{с\min} > Q_{a\min} - (Q_{ф.доп} - Q'_{ф.доп}). \quad (77)$$

где  $Q_{a\max}$  и  $Q_{a\min}$  – максимальное и минимальное значения суммарной реактивной мощности в узле нагрузки без учета синхронного двигателя, квар;  $Q_{ф.доп}$  и  $Q'_{ф.доп}$  – значения реактивной мощности узла, соответствующие нижнему и верхнему допустимым пределам уровней напряжения, квар.

При соблюдении условий (76) или (77) надлежит проверить экономическую целесообразность использования компенсирующей способности синхронного двигателя для поддержания напряжения, сравнив затраты на этот и другие виды регулирования.

*Использование синхронных двигателей для повышения качества напряжения в системах электроснабжения.* Новые перспективы в повышении качества напряжения и коэффициента мощности на крупных глиноземных заводах и других предприятиях цветной металлургии открывает оснащение всех синхронных двигателей статическими полупроводниковыми управляемыми возбудителями типа ВТЦ. На этих предприятиях, имеющих значительное число синхронных двигателей и системы электроснабжения с магистральными токопроводами напряжением 10 кВ, к которым подключены 5–7 распределительных подстанций, расположенных на расстоянии 30–120 м друг от друга, при проектировании имеется возможность полное использовать располагаемую реактивную мощность синхронных двигателей в узлах нагрузки для повышения качества напряжения, потому что можно варьировать число двигателей, подключаемых к одной распределительной подстанции. В свя-

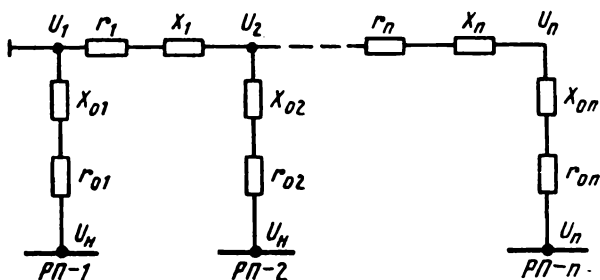


Рис. 62. Схема замещения токопровода напряжением 6–10 кВ с  $n$  ответвлениями



На величину напряжения на шинах распределительных подстанций (рис. 62) влияют параметры токопроводов, а также активные и реактивные нагрузки этих подстанций [24]. Узловые напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_n$  должны удовлетворять двум условиям: оптимальному напряжению на концах соответствующего участка токопровода и номинальному напряжению  $U_N$  на шинах подстанций РП-1, РП-2, ..., РП- $n$  [1].

$$\left. \begin{aligned} U_1^2 &= (U_H + \Delta U_1)^2 + (\delta U_1)^2; \\ U_2^2 &= (U_H + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2; \\ U_n^2 &= (U_H + \Delta U_n)^2 + (\delta U_n)^2, \end{aligned} \right\} \quad (78)$$

По данным работы [18]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_n &= (P_n r_{on} + Q_n X_{on}) / U_n; \\ \delta U_n &= (P_n X_{on} - Q_n r_{on}) / U_n \end{aligned} \right\} \quad (79)$$

Учитывая, что длина воздушных вводов от токопровода до шин распределительной подстанции составляет 10–20 м, активные сопротивления реакторов  $r_p$  на несколько порядков меньше реактивных  $X_p$ , пренебрегаем значениями активных и реактивных сопротивлений воздушных вводов и активными сопротивлениями реакторов. Выражения (79) упрощаются:

$$\Delta U_n = Q_n X_{n \text{ в } n} / U_n; \quad \delta U_n = \dot{P}_n X_{n \text{ в } n} / U_n \quad (80)$$

Решая системы уравнений (78) с учетом выражения (80), получаем:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &< U_H(\sqrt{U_1^2 - P_1^2 X_{p1}^2} - U_H)/X_{p1}; \\ Q_n &< U_H(\sqrt{U_n^2 - P_n^2 X_{pn}^2} - U_H)/X_{pn}. \end{aligned} \right\} \quad (81)$$

При регулировании напряжения на шинах распределительной подстанции путем изменения реактивной мощности необходимо иметь определенную величину располагаемой реактивной мощности синхронного двигателя при номинальном напряжении, обусловленную допустимым соотношением суммарных номинальных мощностей синхронных двигателей к суммарным номинальным мощностям асинхронных двигателей (электротехнологические установки в узле нагрузки отсутствуют). Пусть в узле нагрузки (рис. 63) в наиболее загруженную смену при номинальной частоте поддерживается определенное отношение реактивной мощности к активной. Математическое ожидание коэффициента реактивной мощности определяем по формуле

$$\overline{\operatorname{tg}} \varphi = (\overline{Q}_a - \overline{Q}_c + \overline{Q}_T + \overline{Q}_\Sigma) / (\overline{P}_a + \overline{P}_c + \Delta \overline{P}_T), \quad (82)$$

где  $\overline{P}_a$  и  $\overline{Q}_a$  — соответственно математическое ожидание активной и реактивной мощности, потребляемой группой асинхронных двигателей, кВт и квар;  $\overline{P}_c$  и  $\overline{Q}_c$  — соответственно математическое ожидание активной и реактивной мощности, потребляемой группой синхронных двигателей, и реактивной мощности, генерируемой синхронными двигателями, кВт и квар;  $\overline{Q}_T$  и  $\Delta \overline{P}_T$  — соответственно математические ожидания реактивной мощности, потребляемой группой трансформаторов, и активные потери в них, квар и кВт;  $\overline{Q}_\Sigma$  — математическое ожидание потерь реактивной мощности в узле нагрузки, квар.

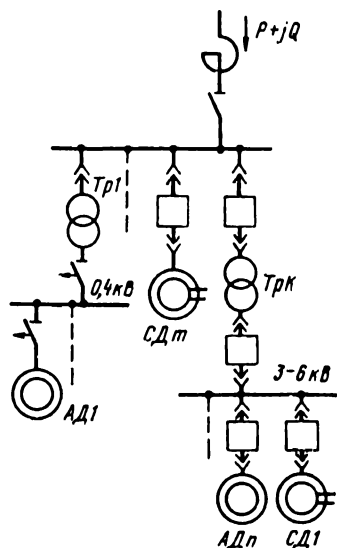


Рис. 63. Принципиальная электрическая схема узла нагрузки

Пренебрегая потерями активной мощности в трансформаторах и принимая  $\overline{P}_a = \overline{K}_{3.a} \sum_{i=1}^n P_{a.n}$ ,  $\overline{P}_c = \overline{K}_{3.c} \sum_{i=1}^n P_{c.n}$ , после преобразования формулы (82) получаем выражение для определения предельного значения математического ожидания отношения суммарной номинальной мощности синхронных двигателей к суммарной номинальной мощности асинхронных двигателей, при котором обеспечивается необходимая для регулирования напряжения располагаемая реактивная мощность:

$$M \left[ \sum_{i=1}^m P_{c.n} / \sum_{i=1}^n P_{a.n} \right] > \frac{\overline{K}_{3.a} (\overline{\operatorname{tg}} \varphi_{ж} - \overline{\operatorname{tg}} \varphi)}{\overline{\operatorname{tg}} \varphi_c (\overline{\alpha}_H \overline{\eta}_c) + \overline{K}_{3.c} \overline{\operatorname{tg}} \varphi}, \quad (83)$$

где  $\overline{\operatorname{tg}} \varphi$  — математическое ожидание коэффициента реактивной мощности в узле нагрузки до подключения к нему синхронного двигателя;  $\sum_{i=1}^n P_{a.n}$  и  $\sum_{i=1}^m P_{c.n}$  — соответственно суммарная номинальная мощность  $n$  асинхронных двигателей и  $m$  синхронных в узле нагрузки, кВт;  $\overline{\operatorname{tg}} \varphi_{ж}$  — математическое ожидание желаемого коэффициента реактивной мощности;  $\overline{K}_{3.a}$  и  $\overline{K}_{3.c}$  — соответственно математические ожидания средневзвешенного коэффициента загрузки по активной мощности асинхронных и синхронных двигателей;  $\overline{\operatorname{tg}} \varphi_c$  — математическое ожидание средневзвешенного коэффициента реактивной мощности группы синхронных двигателей;  $\overline{\eta}_c$  — математическое ожидание средневзвешенного к.п.д. группы синхронных двигателей;  $\overline{\alpha}_H$  — математическое ожидание средневзвешенного наивыгоднейшего коэффициента использования компенсирующей способности группы синхронных двигателей [2].

Средневзвешенный коэффициент загрузки по активной мощности группы асинхронных двигателей

$$\overline{K}_{3.a} = \sum_{i=1}^n k_{3.a} P_{a.n} / \sum_{i=1}^n P_{a.n}, \quad (84)$$

где  $P_{a.n i}$  – номинальная мощность  $i$ -того асинхронного двигателя, кВт;  $k_{з.а i}$  – коэффициент загрузки по активной мощности  $i$ -того асинхронного двигателя.

Средневзвешенный коэффициент загрузки по активной мощности группы синхронных двигателей:

$$K_{з.с} = \frac{\sum_{i=1}^m k_{з.с i} P_{с.н i}}{\sum_{i=1}^n P_{с.н i}}, \quad (85)$$

где  $P_{с.н i}$  – номинальная мощность  $i$ -того СД, кВт;  $k_{з.с i}$  – коэффициент загрузки по активной мощности  $i$ -того СД.

Средневзвешенный к.п.д. группы синхронных двигателей:

$$1/\eta_c = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{с.н i} / \eta_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{\sum_{i=1}^m P_{с.н i} \operatorname{tg} \varphi_i}, \quad (86)$$

где  $\eta_i$  – к.п.д.  $i$ -того синхронного двигателя;  $\operatorname{tg} \varphi_i$  – коэффициент реактивной мощности  $i$ -того синхронного двигателя.

Средневзвешенный коэффициент реактивной мощности группы синхронных двигателей:

$$\operatorname{tg} \varphi_c = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{с.н i} / \eta_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{\sum_{i=1}^m P_{с.н i} / \eta_i}. \quad (87)$$

Средневзвешенный наимыгоднейший коэффициент использования компенсирующей способности группы синхронных двигателей:

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{н i} Q_{н i}}{\sum_{i=1}^m Q_{н i}}, \quad (88)$$

где  $\alpha_{н i}$  – наимыгоднейшее значение относительной загрузки статора по реактивной мощности  $i$ -того синхронного двигателя;  $Q_{н i}$  – номинальная реактивная мощность  $i$ -того синхронного двигателя.

Синхронные двигатели типа СДН, СД, СТМ и др. при номинальных параметрах имеют  $\cos \varphi = 0,9$  (опережающий), к.п.д. равны 0,85–0,97. При работе синхронных двигателей с номинальными нагрузками и токами возбуждения  $\alpha_n = 1$ . Для этого режима работы синхронных двигателей по формуле (83) на рис. 64 построены зависимости математического ожидания отношения суммарной номинальной мощности синхронных двигателей к суммарной номинальной мощности асинхронных двигателей от математического ожидания средневзвешенного коэффициента загрузки по активной мощности группы асинхронных двигателей при  $\bar{\eta}_c = 0,96$ ,  $\bar{\operatorname{tg}} \varphi_{ж} = 0,33$ . Кривые 1–4 построены при значениях  $\bar{\operatorname{tg}} \varphi$  соответственно: 1,32; 1,02; 0,75; 0,48. Видно, что чем выше математическое ожидание средневзвешенного коэффициента загрузки по активной мощности группы асинхронных двигателей и ниже математическое ожидание коэффициента реактивной мощности в узле нагрузки до подклю-

чения синхронных двигателей, тем больше должно быть математическое ожидание отношения суммарной номинальной мощности синхронных двигателей к суммарной номинальной мощности асинхронных двигателей.

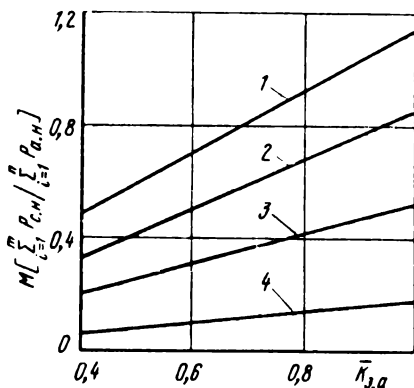


Рис. 64. Зависимость  $M[\sum_{i=1}^m P_{с.н i} / \sum_{i=1}^n P_{а.н i}] = f(\bar{K}_{з.а})$  при различных значениях коэффициента мощности в узле нагрузки



# **Глава V. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ И ЭКОНОМИЧНОЙ РАБОТЫ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ДРУГИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

## **1. Особенности систем электроснабжения преобразовательных подстанций**

Цветная металлургия как отрасль народного хозяйства является крупным потребителем электрической энергии. Электроэнергия в основном расходуется электротехнологическими установками. Дальнейший рост электропотребления связан с заменой процессов, основанных на прямом использовании топлива, электротехнологическими, дальнейшей электрификацией и автоматизацией производственных процессов.

Электроснабжение предприятий цветной металлургии осуществляется от энергетических систем и от собственных ТЭЦ, построенных для покрытия тепловых нагрузок предприятия и резервирования наиболее ответственных потребителей электрической энергии. Как потребители электрической энергии они характеризуются: значительными нагрузками, которые достигают на крупных алюминиевых заводах 2000 МВт; наличием приемников электрической энергии на напряжение 3–10 кВ; непрерывным ростом электропотребления за счет резкого повышения производственных мощностей; наличием загрязненных зон, предъявляющих дополнительные требования к системам электроснабжения и электрооборудованию; наличием агрессивных сред в цехах и участках, в которых работают электрические двигатели, кабели и др.; наличием значительного числа синхронных двигателей, приемников электроэнергии I-й категории, особой группы I-й категории [29].

Современные системы электроснабжения предприятий с электролизными производствами имеют две ступени трансформации высокого напряжения. На рис. 66, а–в показана схема системы электроснабжения преобразовательных подстанций серий электролизеров алюминия, меди и магния.

Широкое распространение в системах электроснабжения получили магистральные токопроводы напряжением 6–10 кВ, способные передать 20–80 МВ·А для питания нескольких, чаще всего 3–5 распределительных подстанций, и глубокие вводы, которые позволяют максимально приближать высшее напряжение 35–220 кВ к приемникам электроэнергии. На ответвлениях токопроводов к распределительной подстанции устанавливают реакторы для ограничения мощностей короткого замыкания примерно до величины отключаемой мощности выключателей типа ВМГ или ВМП. Применяют секционирование всех звеньев системы электроснабжения — от источников питания до сборных шин низкого напряжения выключателя секций напряжением 3–10 кВ выполняют схемы автоматического включения резерва.

Все элементы схемы (линии, трансформаторы) работают раздельно, постоянно находятся под нагрузкой. "Холодный" резерв не применяется.

Современные системы электроснабжения не обеспечивают допустимое ГОСТ 13109-67 содержание высших гармонических составляющих в кривой напряжения, достаточную надежность систем электроснабжения из-за частых случаев замыканий на землю и перехода их в двух- и трехфазные короткие замыкания (см. разд. 3 наст. гл.).

Кроме этого, внедрение нестационарных режимов работы серий электролиза меди и цинка, применение АСУ ТП электролиза алюминия, магния и других цветных металлов, а также частые глубокие посадки напряжения в системе электроснабжения и ограничения потребления электролизными сериями электрической энергии в часы максимальных нагрузок энергосистем изменили режимы работы этих электротехнологических установок. Сейчас к системам электроснабжения предъявляются возросшие требования, которые вытекают из необходимости обеспечивать оптимальные характеристики переходных режимов преобразовательных подстанций

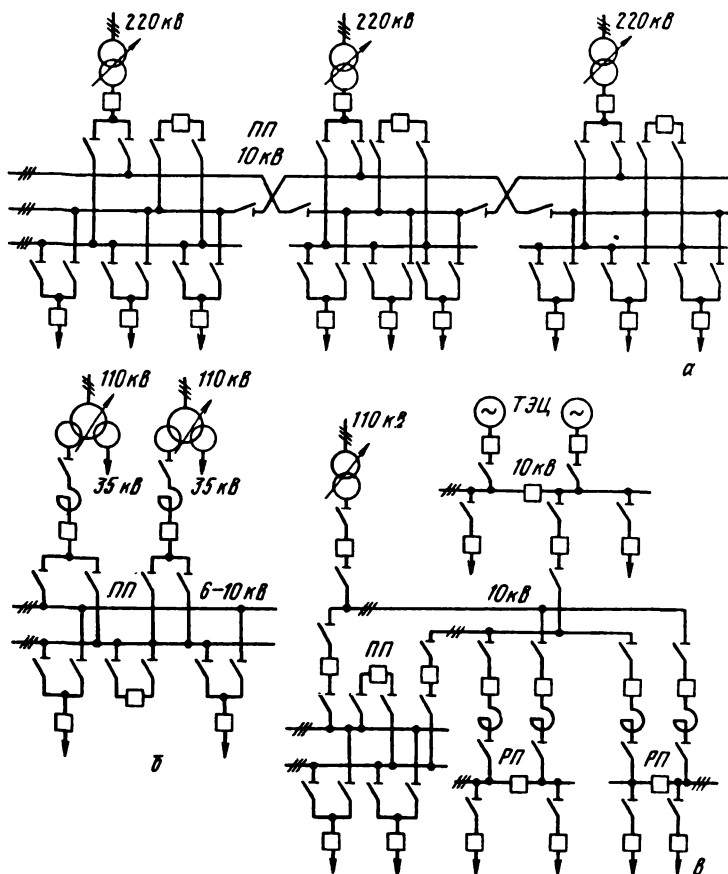


Рис. 66. Схемы электроснабжения преобразовательных подстанций серий электролизеров алюминия (а), меди (б) и магния (в)

как потребителей электрической энергии. Эти процессы изучены недостаточно, в литературе отсутствуют данные о параметрах переходных режимов преобразовательных подстанций и самих серий электролизеров цветных металлов. Поэтому ниже приведены результаты специальных исследований.

Осциллографировали напряжение  $U$  на шинах напряжением 6–10 кВ преобразовательных подстанций, выпрямленное напряжение на сериях электролиза  $U_d$  и ток серий  $I_d$  при включении серий в работу, введении режимов ограничения и восстановления электропотребления. По этим осциллограммам определяли кратность пусковых токов серий электролиза различных цветных металлов  $K_c = I_{d\text{ п}} / I_{d\text{ у}}$ , длительность протекания переходных процессов  $\tau_{\text{п}}$  при включении в работу серий, отклонения

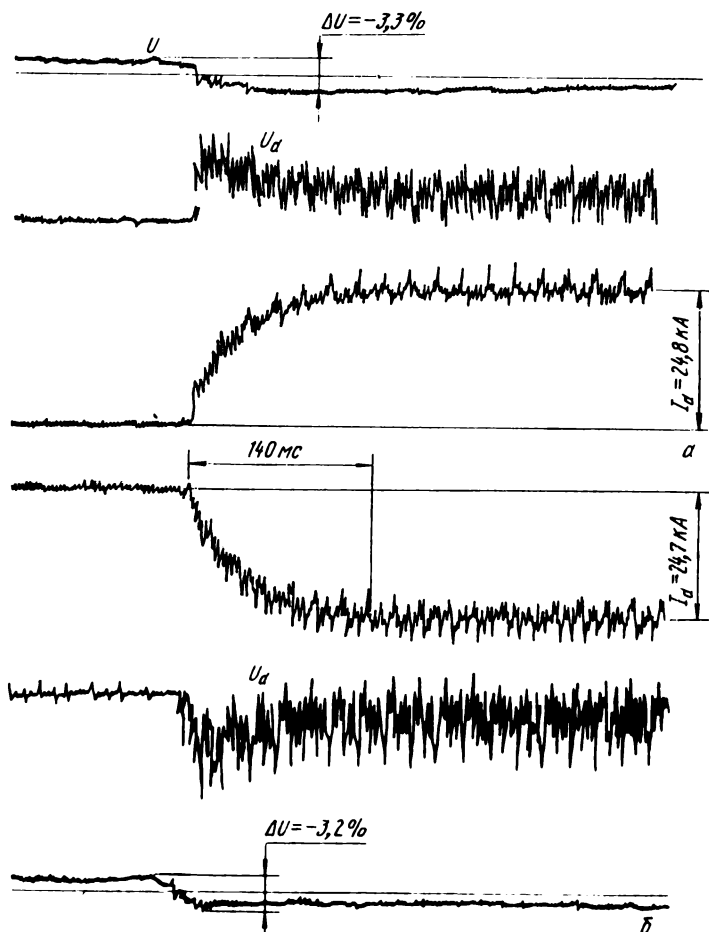


Рис. 67. Осциллограммы напряжения на шинах переменного тока преобразовательной подстанции  $U$ , напряжения  $U_d$  и рабочего тока  $I_d$  серии электролизеров цинка при прямом (а) и обратном (б) направлениях тока

напряжений  $\Delta U$  на шинах напряжением 6–10 кВ преобразовательных подстанций при переходных режимах.

Для иллюстрации на рис. 67 показаны осциллограммы  $U$ ,  $U_d$ ,  $I_d$  при включении серии электролиза цинка при прямом и обратном направлении тока  $I_d$ . Различие между характеристиками переходных процессов при различных направлениях  $I_d$  отсутствует. Длительность переходного процесса составляла 140 мс, величина отклонения напряжения на шинах напряжением 10 кВ преобразовательной подстанции – около 3,3 % от номинального значения.

На рис. 68 приведены идеализированные диаграммы изменения напряжения  $U$  на шинах напряжением 6–10 кВ преобразовательных подстанций

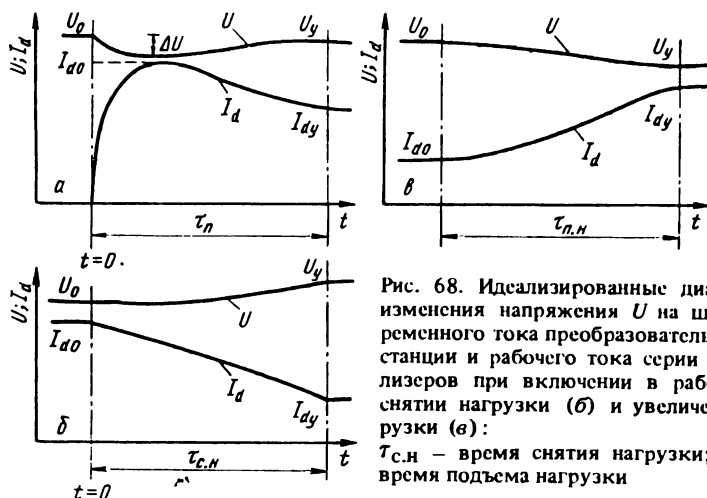


Рис. 68. Идеализированные диаграммы изменения напряжения  $U$  на шинах переменного тока преобразовательной подстанции и рабочего тока серии электролизеров при включении в работу (а), снятии нагрузки (б) и увеличении нагрузки (в):  $\tau_{с.н}$  – время снятия нагрузки;  $\tau_{п.н}$  – время подъема нагрузки

и тока серий  $I_d$  при включении в работу, введении режимов ограничения и восстановления электропотребления, где  $U_0$ ,  $I_{d0}$  – первоначальные значения;  $U_\gamma$ ,  $I_{d\gamma}$  – установившиеся значения.

Анализ осциллограмм переходных процессов показывает, что серии электролизеров цветных металлов обладают невысокой кратностью пускового тока ( $K_{п} = 1,05 \div 1,4$ ), переходные процессы протекают быстро ( $\tau_{п} = 0,12 \div 3$  с), напряжение на шинах переменного тока преобразовательной подстанции во время пуска понижается ( $\Delta U = 0,04 \div 0,12 U_{н}$ ), снижение нагрузки серий на 10–30 % от номинального значения вызывает увеличение напряжения на шинах переменного тока преобразовательной подстанции на  $0,02 \div 0,04 U_{н}$ .

## 2. Проверка дальнейшей пригодности действующих систем электроснабжения при реконструкции электролизных производств

При реконструкции электролизных производств предприятий цветной металлургии возникает задача по определению способности действующих систем электроснабжения обеспечивать требуемые показатели качества электрической энергии после подключения к ним новых преобразователь-



ных агрегатов. Для установления пригодности системы электроснабжения необходимо иметь достоверную информацию о влиянии параметров системы электроснабжения и режимов работы полупроводниковых выпрямительных агрегатов на коэффициент несинусоидальности напряжения. Расчеты  $K_{нс}$  в системах электроснабжения с электролизными установками, по данным работы [18], имеют низкую точность из-за того, что при выводе уравнений не учитывали влияние на  $K_{нс}$  аномальных гармоник напряжения, несимметричной нагрузки по току фаз трехфазных выпрямительных мостов, перегрузок отдельных трехфазных выпрямительных мостов одного и того же полупроводникового выпрямительного агрегата.

Рассматривая искаженную форму линейного напряжения, обусловленную работой мощного полупроводникового выпрямительного агрегата с эквивалентной 12-фазной схемой выпрямления, как результат сложения неискаженной формы линейного напряжения и коммутационных импульсов, можно получить следующее выражение для определения коэффициента несинусоидальности напряжения:

$$K_{нс} = \frac{S_{п}}{S_{к.з}} \sqrt{\frac{3 K_3 \sqrt{1 - K_c^2 K_n^2 K_{и}^2}}{\pi [S_{п}/S_{к.з} + u_k (1 + K_p/4)]}}, \quad (91)$$

где  $K_3$  — коэффициент загрузки преобразовательного агрегата по полной мощности;  $S_{п}$  — номинальная мощность трансформатора преобразовательного агрегата;  $S_{к.з}$  — мощность трехфазного короткого замыкания в системе электроснабжения в месте подключения полупроводникового выпрямительного агрегата;  $K_c$ ,  $K_n$ ,  $K_{и}$  — соответственно коэффициенты сдвига, несимметрии и искажения полупроводникового выпрямительного агрегата (группового преобразователя);  $K_p$  — коэффициент расщепления

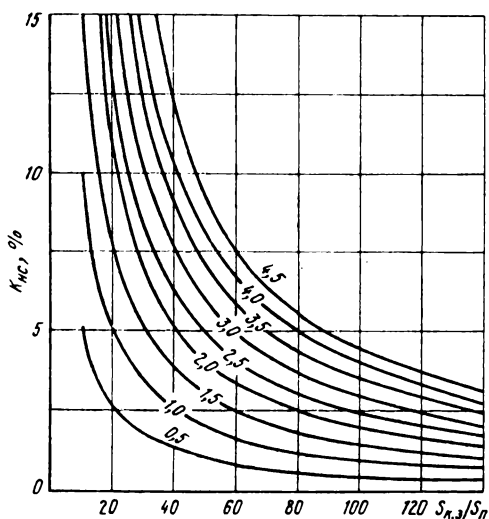


Рис. 69. Зависимость  $K_{нс}$  от отношения  $S_{к.з} / S_{п}$  при различных значениях  $K_3$ ,  $u_k$ ,  $K_p$ . На кривых приведены значения  $\sqrt{(K_3 \sqrt{1 - \chi^2})} / [u_k (1 + K_p/4)]$

обмоток преобразовательного трансформатора [18];  $u_k$  — напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора.

При расчетах на стадии проектирования систем электроснабжения целесообразно использовать выражение [15]:  $\chi = K_c K_n K_i$ , а значение коэффициента мощности полупроводникового выпрямительного агрегата принимать, исходя из вероятностей оценки режимов его работы, приведенной в гл. II, разд. 1.

Если  $[u_k(1 + K_p/4)S_{к.з}]/S_{п} \geq 10$ , то выражение (91) упрощается:

$$K_{нс} \approx S_{п}/S_{к.з} \sqrt{(K_3 \sqrt{1 - \chi^2})/u_k(1 + K_p/4)}. \quad (92)$$

Относительная ошибка при определении  $K_{нс}$  по формуле (91) составляет около 5 %.

Для рабочего режима полупроводникового выпрямительного агрегата, в котором  $K_3 = 0,5 \div 1,0$ ,  $\chi = 0,6 \div 0,92$ , по формуле (92) на рис. 69 построены кривые  $K_{нс} = f(s_{к.з}/S_{п})$ . Необходимое значение  $S_{к.з}/S_{п}$ , при котором  $K_{нс} < 5\%$ , определяют по кривым следующим образом: находят значение  $\sqrt{(K_3 \sqrt{1 - \chi^2})/[u_k(1 + K_p/4)]}$  и отыскивают кривую на рис. 69, соответствующую этому значению; на оси абсцисс откладывают такое значение  $S_{к.з}/S_{п}$ , чтобы точка пересечения этой прямой с найденной ранее кривой соответствовала значению  $K_{нс} < 5\%$  на оси ординат.

Учитывая вероятностные оценки режимов работы полупроводникового выпрямительного агрегата и анализируя кривые на рис. 69, следует отметить, что значение  $K_{нс} < 5\%$  обеспечивается при жесткой системе электроснабжения.

Питание серий электролизеров цветных металлов осуществляется от нескольких однотипных полупроводниковых выпрямительных агрегатов. Реальный режим работы агрегатов характеризуется разбросом углов управления; асимметрией углов коммутации, которые являются случайными величинами. Поэтому наложение коммутационных искажений  $(n - 1)$  выпрямителей на коммутацию первого выпрямителя происходит частично [30].

Принимая равномерной плотность вероятности распределения коммутационных искажений напряжения, получают уравнение:

$$K_{нс\Sigma} = K_{нс i} \sqrt{\frac{n+1}{2} + \frac{n-1}{2} \left( \frac{S_{п i}}{S_{п i} + u_{к i} (1 + K_{p i}/4) S_{к з}} \right)}, \quad (93)$$

где  $n$  — число полупроводниковых выпрямительных агрегатов;  $S_{п i}$  — номинальная мощность  $i$ -того преобразователя;  $u_{к i}$  — напряжение короткого замыкания трансформатора  $i$ -того преобразователя;  $K_{p i}$  — коэффициент расщепления обмоток  $i$ -того трансформатора;  $K_{нс i}$  и  $K_{нс\Sigma}$  — соответственно коэффициент несинусоидальности напряжения при работе  $i$ -того полупроводникового выпрямительного агрегата и  $n$  агрегатов.

Относительная ошибка расчета  $K_{нс\Sigma}$  по формуле (93) составляет  $\pm 5\%$ .

Подставляя формулу (91) в формулу (93) и преобразовывая ее, получаем:

$$K_{\text{НС}\Sigma}^2 [u_{\text{К}i} (1 + K_{\text{р}i} / 4)]^2 X^3 + 2 K_{\text{НС}\Sigma} u_{\text{К}i} (1 + K_{\text{р}i} / 4) X^2 - (1/2 \pi) \times \\ \times [3 K_{3i} \sqrt{1 - \chi^2} u_{\text{К}i} (1 + K_{\text{р}i} / 4) (n + 1) - 2 \pi K_{\text{НС}\Sigma}^2 X - \\ - (3/\pi) K_{3i} n \sqrt{1 - \chi^2}] = 0, \quad (94)$$

где  $X = S_{\text{К.З}} / S_{\text{П}i}$ .

Выражение (94) является математической моделью влияния параметров системы электроснабжения, выраженных через их интегральный показатель  $S_{\text{К.З}}$ , количества полупроводниковых выпрямительных агрегатов и режимов их работы на коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах переменного тока преобразовательных подстанций.

На предприятиях отрасли для питания мощных серий электролизеров алюминия, цинка, магния и других металлов применяются полупроводниковые выпрямительные агрегаты с выпрямленным током силой 25 кА. Количество агрегатов, устанавливаемых для питания одной серии электролиза, рассчитывают из условия, что при выходе из строя одного агрегата остальные  $n - 1$  агрегатов обеспечивают нормальную работу серии [1]. Поэтому в нормальном режиме агрегаты загружены не на номинальную величину.

Решая уравнения (94) на ЭВМ при следующих значениях коэффициентов:  $n = 3 \div 9$ ;  $K_{\text{НС}\Sigma} = 0,05$ ;  $K_{3i} = 0,5 \div 1,0$ ;  $\chi_i = 0,5 \div 0,9$ ;  $u_{\text{К}i} (1 + K_{\text{р}i} / 4) \approx 0,15$ , получили необходимые статистические данные для построения функции  $S_{\text{К.З}} / S_{\text{П}i} = f(K_{3i}, n, \chi_i)$  — рис. 70. В связи с этим можно производить оценку действующих систем электроснабжения, обеспечи-

вающих  $K_{\text{НС}} \leq 5 \%$ , при известных эксплуатационных показателях преобразовательных агрегатов и мощности серии электролизеров также графическим методом.

*Пример.* Рабочий ток серии электролизеров магния составляет 100 кА при пяти работающих преобразовательных агрегатах. Требуется установить минимальное значение отношения  $S_{\text{К.З}} / S_{\text{П}i}$ , при котором  $K_{\text{НС}} \leq 5 \%$ .

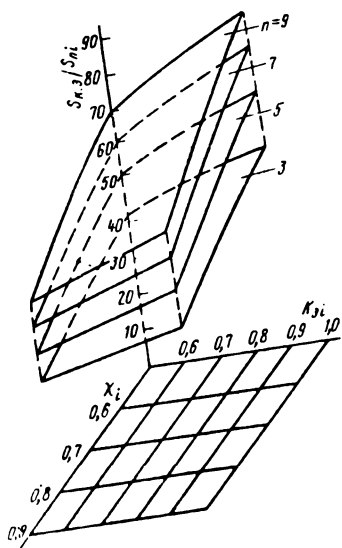


Рис. 70. Геометрическая интерпретация функции  $S_{\text{К.З}} / S_{\text{П}i} = f(K_{3i}, n, \chi_i)$  для системы электроснабжения 6–10 кВ мощной серии электролизеров

Допустим, что все агрегаты работают с коэффициентом мощности  $\chi_i = 0,9$  при одинаковой нагрузке  $K_{3i} = 0,8$ . На плоскости  $\chi_i - K_{3i}$  (рис. 70) отыскивают точку пересечения прямых  $K_{3i} = 0,8$ ,  $\chi_i = 0,9$ . К этой точке восстанавливают перпендикуляр до пересечения с плоскостью  $n = 5$ ; измерение его показывает, что  $S_{K,3}/S_{Pi} \approx 60$ . Таким образом, если в системе электроснабжения отношение  $S_{K,3}/S_{Pi} < 60$ , то она не может обеспечить требуемый коэффициент несинусоидальности напряжения. На практике иногда целесообразно оценивать способность системы электроснабжения подавлять искажения формы синусоиды напряжения, возникающие при работе преобразовательных агрегатов, не по величине отношения  $S_{K,3}/S_{Pi}$ , а по величине  $S_T/S_{Pi}$ , где  $S_T$  — мощность понизительного трансформатора в узле нагрузки.

Мощность понизительного трансформатора  $S_T$  и его напряжение короткого замыкания  $u_{K,T}$  связывают мощность трехфазного короткого замыкания на шинах низкого напряжения  $S_{K,31}$ , которая определяет значение коэффициента несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения, с мощностью трехфазного короткого замыкания на высокой стороне  $S_{K,32}$ :  $u_{K,T}/100(1/S_T) = 1/S_{K,37} - 1/S_{K,32}$ . (95)

Для увеличения  $S_{K,31}$  при известном значении  $S_{K,32}$  необходимо повышать мощность трансформатора  $S_T$  и уменьшать  $u_{K,T}$ .

Так как  $S_{K,32} \gg S_{K,31}$ , то допустимо уравнение  $S_{K,31} \approx S_T 100/u_{K,T}$  (96).

Подставляя выражение (96) в формулу (94), легко получить выражение для определения величины отношения  $S_{Pi} : S_T$ , при которой  $K_{нс} = 5\%$ .

На многих предприятиях при внедрении отдельных преобразователей технологических установок возникают трудности по обеспечению необходимого качества электрической энергии в системах электроснабжения. Например, на Башкирском медно-серном комбинате при внедрении тиристорного электропривода подъемной машины на одном из рудников коэффициент несинусоидальности напряжения увеличился до 12 %. Нормальная работа конденсаторных батарей, применяемых для компенсации реактивной мощности, и других приемников электрической энергии была нарушена.

Эта проблема становится еще более актуальной в связи с увеличением единичной мощности преобразователей цветной металлургии. Промышленные предприятия, планируя приобретение преобразовательной техники, должны достоверно знать, как изменятся показатели качества электрической энергии в системе электроснабжения и прежде всего коэффициент несинусоидальности.

В целях недопущения грубых ошибок при внедрении преобразовательных агрегатов произведены расчеты предельных значений  $S_T/S_{Pi}$  для преобразовательных установок цветной металлургии и их систем электроснабжения.

*Система электроснабжения напряжением 0,4 кВ серии электролизеров редких и благородных металлов.* Преобразовательные агрегаты питания серий электролизеров редких и благородных металлов имеют незначи-

тельную мощность (менее 1000 кВт) и подключаются к цеховым распределительным устройствам 0,4 кВ.

Учитывая, что преобразовательный агрегат устанавливают вблизи цеховых трансформаторов, для которых  $u_{к.т} = 5,5\%$ , и принимая  $n = 1$ ,  $u_{к.т} = 0,055$ ,  $K_{нс} = 0,05$ ,  $K_p = 0$ , по формулам (94) и (96) были получены статистические данные, по которым на рис. 71 построены кривые

функции  $S_{п}/S_{т} = f(K_3, \chi)$ . Анализ кривых показывает, что коэффициент несинусоидальности напряжения 0,4 кВ находится в пределах требований ГОСТа, если  $S_{т}/S_{п} > 2,7$ .

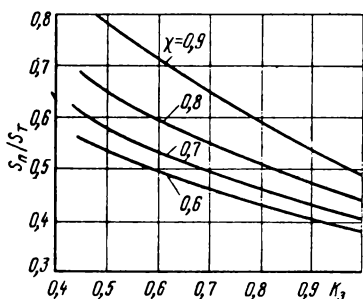


Рис. 71. Зависимости  $S_{п} / S_{т} = f(K_3, \chi)$  для системы электроснабжения 0,4 кВ серий электролизеров редких и благородных металлов

Система электроснабжения 6–10 кВ дуговых вакуумных печей. В некоторых производствах цветной металлургии применяют дуговые вакуумные печи постоянного тока. Полупроводниковые выпрямительные агрегаты, управляемые дросселями насыщения, обладая низким номинальным значением коэффициента мощности ( $\chi = 0,74 \div 0,77$ ), значительно влияют на  $K_{нс}$  [31]. Повышение качества электрической энергии в системах электроснабжения этих производств приобретает особое значение в связи с созданием мощных дуговых печей.

На основании статистических данных, полученных в результате решения уравнений (94) и (96) при  $n = 1$ ,  $u_{к.т} = 10,5\%$ ,  $u_{к.п} = 6,2\%$ ,  $K_p = 0$ ,  $K_{нс} = 0,05$ , построены кривые исследуемой функции  $S_{п}/S_{т} = f(K_3, \chi)$  (рис. 72). При рабочих режимах дуговых вакуумных печей ( $K_3 = 0,7 \div 1,0$ ,  $\chi = 0,4 \div 0,7$ ) мощность понижающего трансформатора должна превышать мощность преобразовательного трансформатора в 5 раз и более.

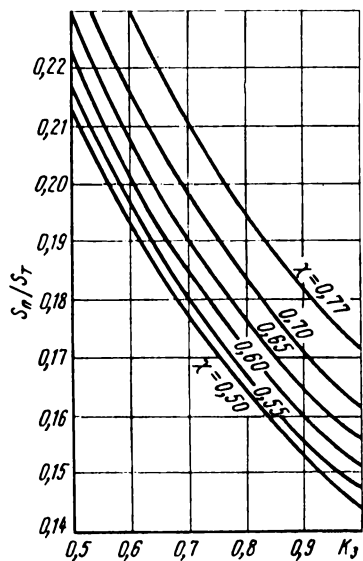


Рис. 72. Зависимости  $S_{п} / S_{т} = f(K_3, \chi)$  для системы электроснабжения 6–10 кВ вакуумных дуговых печей

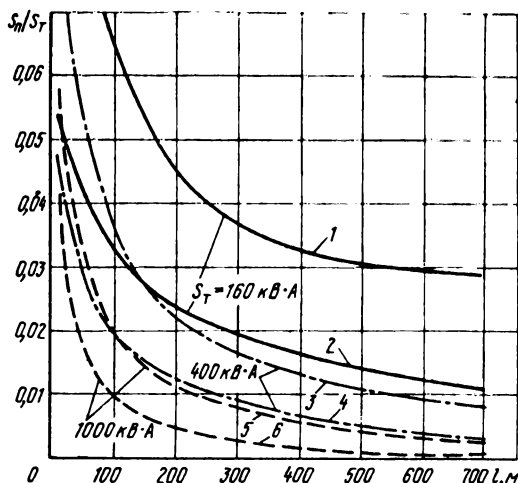


Рис. 73. Зависимость  $S_{\Pi}/S_T = f(K_3, \chi)$  для системы электроснабжения 0,4 кВ тиристорных преобразователей технологических механизмов:

1, 3, 5 — для кабелей с алюминиевой жилой; 2, 4, 6 — то же, с медной жилой

Система электроснабжения напряжением 0,4 кВ преобразователей технологических агрегатов. Преобразовательные агрегаты статических систем регулирования возбуждением синхронных двигателей типа СПВУ, ВТЦ и др. электроприводов различных технологических установок, как правило, удалены от шин напряжением 0,4 кВ распределительного устройства. При оценке способности системы электроснабжения подавлять искажения формы напряжения необходимо принимать во внимание не только отношение номинальной мощности преобразовательного трансформатора  $S_{\Pi}$  к номинальной мощности цехового трансформатора  $S_T$ , но и удаленность преобразователя от понизительного трансформатора, а также сечение кабельной линии.

С учетом уравнений (94) и (96) при  $n = 1$ ,  $K_{НС\Sigma} = 0,05$ ,  $u_{к.т} = 4,5 \div 5,5\%$  (в зависимости от мощности  $S_T$ ),  $\chi = 0,92$ ,  $K_3 = 1$ ,  $u_{к.п} = 0,05$  построены кривые исследуемой функции (рис. 73). Видно, что  $K_{НС\Sigma} \leq 5\%$  у преобразователей, удаленных на расстояние 50 м и более от цеховых понизительных трансформаторов, достигается при значительном отношении  $S_T/S_{\Pi}$ . Поэтому рекомендуется устанавливать преобразователь вблизи понизительного трансформатора.

### 3. Координация уровней токов однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения при несинусоидальном напряжении

Надежность электрических кабелей в системах электроснабжения серий электролизеров цветных металлов. Эксплуатация систем электроснабжения серий электролизеров показывает, что электрические кабели имеют недостаточную надежность из-за высокой интенсивности потока от-

казов и, как следствие, незначительной вероятности нахождения в рабочем состоянии [32, 33]. Основные причины недостаточной надежности — интенсивное старение изоляции при несинусоидальном напряжении и перенапряжения, возникающие в системе электроснабжения при однофазном замыкании на землю.

Различают следующие виды старения изоляции: ионизационное (электрическое), термическое (тепловое), электрохимическое (химическое), механическое (электрохимическое), термомеханическое [20]. В реальных условиях в той или иной степени наблюдаются одновременно все или большая часть видов старения, однако преобладающими для кабелей являются ионизационный (электрический) и термический виды старения или их сочетание.

Ионизационный вид старения диэлектрика обуславливается частичными разрядами в газовых включениях непропитанного твердого диэлектрика. Причина возникновения этих разрядов — увеличение напряженности электрического поля выше критического значения из-за ослабления диэлектрических свойств изоляции. Количество разрядов в газовых включениях зависит от формы кривой напряжения, приложенного к изоляции. При заостренной форме кривой напряжения по сравнению с синусоидой количество разрядов увеличивается в 2 раза и более, коэффициент диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ) также значительно повышается [17].

В местах возникновения частичных разрядов происходит разложение жидкого и разрушение твердого диэлектрика под действием ионных и электронных лавин с образованием твердых, жидких и газообразных продуктов. Среди последних возможны сильные окислители — озон, окись азота и др., приводящие к электрохимическому разрушению изоляции.

Термический вид старения изоляции обуславливается потерями активной мощности и повышением температуры изоляции. Бумажный диэлектрик разрушается в результате термоокислительных и гидролитических реакций, а также пиролиза — непосредственного термического разложения клетчатки целлюлозы [20]. Последнее характерно для относительных высоких температур (выше  $100^{\circ}\text{C}$ ), тогда как термоокислительные реакции имеют место при нормальных температурах.

В системах электроснабжения с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю возникают перенапряжения. При металлическом замыкании на землю одной фазы они повышаются в двух других до значения линейного напряжения:  $U_{\text{нр}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$ . При дуговом замыкании на землю и неустойчивом горении дуги возникают более высокие перенапряжения. Изучение этих перенапряжений начали вести с начала XX в., когда они вызывали массовые случаи перекрытия изоляции, потому что электрические сети выполняли только с изолированной нейтралью и имели низкий уровень изоляции. Многочисленные измерения, выполненные рядом исследователей, показывают, что максимальные перенапряжения при дуговых замыканиях на землю составляют в неповрежденных фазах 3,0–3,4  $U_{\text{ф}}$ , в поврежденной фазе 2,0–2,4  $U_{\text{ф}}$ .

При дуговом замыкании на землю, сопровождающемся обрывом фазного провода, перенапряжение в неповрежденных фазах достигает 4,36  $U_{\text{ф}}$ .

Такой обрыв может быть следствием теплового действия заземляющей дуги.

Перенапряжения при дуговом замыкании на землю не вызывают повреждения нормальной изоляции, уровень которой соответствует современным нормам изоляции. Поэтому одной из основных мер по предотвращению однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения с нормальной изоляцией является ее профилактическое испытание повышенным напряжением в соответствии с требованиями действующих Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей.

При низких показателях качества электрической энергии в системах электроснабжения, обусловленных работой силовых преобразователей, происходят дополнительные потери активной мощности на токоведущих частях и в изоляции. Под действием этих потерь повышается температура изоляции и сокращается срок ее службы. Понижение напряжения в системе электроснабжения приводит к увеличению активной составляющей тока  $\Delta I$  электродвигателей технологических механизмов цветной металлургии и к дополнительным потерям активной мощности в кабельных линиях, которую определяют по формуле

$$\Delta P_a = 3(2 \Delta I I + \Delta I^2) r, \quad (97)$$

где  $r$  — активное сопротивление кабельной сети, Ом;  $I$  — электрический ток, протекающий через кабельную сеть при номинальном напряжении, А. Значение этого тока определяют по выражению  $I = \sqrt{W_a^2 + W_p^2} / \sqrt{3 U_n T_n}$ , где  $W_a$  и  $W_p$  — соответственно количество активной и реактивной энергии, потребляемых электродвигателями за расчетное время потерь  $T_n$ , кВт·ч и квар·ч.

Дополнительные потери активной мощности, обусловленные несинусоидальностью напряжения, при стабильном режиме работы системы электроснабжения определяют по выражению [8]

$$\Delta P_v = (\Delta P_{м.н} / Z_{1*}^2) \sum_{v=2}^n (U_{v*}^2 / v \sqrt{v}), \quad (98)$$

где  $Z_{1*} = Z_1 / Z_{ном}$  — относительное полное сопротивление кабельной линии току основной частоты;  $U_{v*}$  — относительное значение  $v$ -той гармоники напряжения;  $n$  — число учитываемых гармоник напряжения.

Дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией напряжения, определяют по формуле [8]

$$\Delta P_2 = U_n^2 r_2 K_H^2 / Z_2^2, \quad (99)$$

где  $r_2$  и  $Z_2$  — соответственно активное и полное сопротивления кабельной линии току обратной последовательности, Ом;  $K_H$  — коэффициент несимметрии напряжения.

Высокочастотные электромагнитные поля, обусловленные высшими гармоническими составляющими тока и напряжения в системе электроснабжения, вызывают потери активной мощности на поляризационные, ионизационные процессы и в активном сопротивлении изоляции (сопротивлении утечки). Основной вклад в потери в диэлектрике дают поляризационные процессы, так как токи утечки незначительны, а мощность



начальных частичных разрядов, т.е. ионизационного процесса, на несколько порядков ниже мощности тепловыделения в активном диэлектрике при минимальных значениях тангенса угла диэлектрических потерь. Поэтому составляющими потерь активной мощности пренебрегают.

При несинусоидальном напряжении мощность тепловыделения в диэлектрике определяют по формуле

$$\Delta P_{g\nu} = 2 \pi f C U_1^2 \operatorname{tg} \delta_1(T) \eta(T), \quad (100)$$

где  $\eta(T) = \sum_{i=1}^n (U_{\nu}/U_1)^2 \nu (\operatorname{tg} \delta_{\nu}(T) / \operatorname{tg} \delta_1(T))$ ;  $U_1$  — действующее значение первой гармоники напряжения, кВ;  $C$  — емкость изоляции кабельной сети, Ф;  $\operatorname{tg} \delta_1(T)$  — коэффициент диэлектрических потерь на частоте  $\omega_1 = 2 \pi f$  ( $f = 50$  Гц);  $U_{\nu}$  — действующее значение  $\nu$ -той гармоники напряжения, кВ;  $\operatorname{tg} \delta_{\nu}(T)$  — коэффициент диэлектрических потерь на частоте  $\omega_{\nu} = 2 \pi f \nu$ .

Относительное сокращение срока службы изоляции, обусловленное повышением ее температуры за счет дополнительных потерь активной мощности  $\Delta P_{gi}$ , определяют по формуле

$$\Delta t_* = \begin{cases} 0,087 \tau_1 \Delta P_{gi} / \Delta P_{\text{м.н}} & \text{— для изоляции классов } A, E; \\ 0,069 \tau_1 \Delta P_{gi} / \Delta P_{\text{м.н}} & \text{— для изоляции классов } B, F, H, \end{cases} \quad (101)$$

где  $\tau_1$  — продолжительность электрической энергии низкого качества, ч/год.

В первый момент времени однофазного замыкания на землю возникает переходный процесс, который определяется появлением электромагнитных волн тока и напряжения, связанных с разрядом на землю емкости поврежденной фазы и дозарядом емкостей неповрежденных фаз. Установившийся ток замыкания на землю содержит, кроме основной, высшие гармоники, обусловленные наличием их в фазном напряжении системы электроснабжения, причем токи высших гармоник, особенно 23, 25, 35, 37-й и др., значительны и отдельные из них соизмеримы с токами первой гармоники.

Дугогасящие реакторы, применяемые в системах электроснабжения для ограничения токов замыкания на землю, не уменьшают до требуемой величины тока высших гармонических составляющих, так как настраиваются на резонанс тока 1-й гармоники. Поэтому на многих предприятиях отрасли токи замыкания на землю превышают допустимое значение, установленное Правилами устройства электроустановок.

Значительные токи замыкания вызывают повреждения изоляции фаз кабелей и вместе с другими факторами (ослабление изоляции из-за интенсивного старения и перенапряжений, возникающих в системе электроснабжения при однофазном замыкании) обуславливают частые перерастания однофазных замыканий в двух- и трехфазные короткие замыкания.

Таким образом, несинусоидальность и несимметрия напряжения, а также понижение напряжения в системах электроснабжения обуславливают их низкую надежность.

Расчетное определение показателей надежности систем электроснабжения при низком качестве электрической энергии – многофакторная задача, решение которой затрудняется из-за отсутствия достоверных данных о действующих значениях высших гармонических составляющих напряжения, диэлектрических свойств различной изоляции и других параметров. Поэтому были проведены статистические исследования с целью определения интенсивности возникновения однофазных замыканий на землю в системах электроснабжения ряда алюминиевых заводов.

Ниже приведены причины, вызывающие однофазные замыкания на землю; здесь  $K_1$  – содержание однофазных замыканий на землю, вызванное определенной группой причин от общего числа отмеченных замыканий на землю, %;  $K_{2,3}$  – содержание однофазных замыканий, перешедших в двух- и трехфазные замыкания, %:

	$K_1$	$K_{2,3}$
Механические повреждения кабелей, набросы на шины и токопроводы, попадание технологических растворов на токоведущие части оборудования РУ напряжением 10 кВ и электрические двигатели напряжением 3–10 кВ, залповое загрязнение изоляции открытых электроустановок технологическими уносами . . . . .	13,8	81,3
Интенсивное старение изоляции кабелей и электрооборудования. . . . .	66,3	70,9
Некачественный монтаж концевых разделок и соединительных муфт кабелей напряжением 3–10 кВ, а также ремонт электрооборудования. . . . .	14,4	8,0
Заводские дефекты электрооборудования и кабелей . . . . .	3,7	10,8
Ошибочные действия обслуживающего персонала . . . . .	0,2	40

Математическое ожидание интенсивности возникновения однофазных замыканий на землю кабелей напряжением 10 кВ длиной 1 км  $\bar{\lambda}_1 = 0,11 \text{ год}^{-1}$ .

Доверительные границы изменения этой величины при доверительной вероятности  $p(t)$ , равной 0,95:  $0,08 \leq \bar{\lambda}_1 \leq 0,15$ .

Вероятность безотказной работы кабельных линий за год:  $0,86 \leq p(t) \leq 0,92$ .

На рис. 74 кривая 1 показывает вероятность отношения интенсивности возникновения однофазных замыканий на землю  $\lambda_p$  при коэффициенте несинусоидальности напряжения  $K_{нс} = 5,0 \div 11,8 \%$  к интенсивности возник-

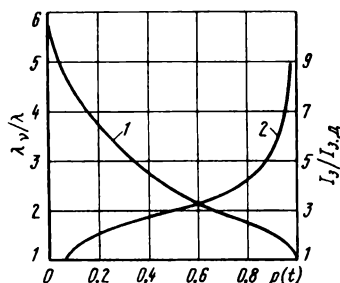


Рис. 74. Вероятности относительной интенсивности возникновения однофазных замыканий на землю (1) и перехода их в многофазные короткие замыкания (2) в зависимости от относительного тока замыкания на землю в системах электроснабжения алюминиевых заводов

новения однофазных замыканий на землю при синусоидальном напряжении ( $\lambda = 3 \text{ год}^{-1}$  при длине кабелей напряжением 6–10 кВ, равной 100 км [34]). Кривая 2 показывает вероятность перехода однофазных замыканий на землю в двух- и трехфазные короткие замыкания в зависимости от величины отношения тока замыкания на землю  $I_3$  к допустимому току замыкания на землю  $I_{3,д}$ .

*Определение тока однофазного замыкания на землю при несинусоидальном напряжении в системе электроснабжения методами планирования эксперимента.* Ток однофазного замыкания на землю в системе электроснабжения напряжением 3–35 кВ с изолированной нейтралью является ее интегральным параметром. В зависимости от величины напряжения следует ограничивать уровень токов определенным значением, независимо от других показателей качества электрической энергии [18]:

Напряжение, кВ . . . . .	6	10	35
Емкостный ток замыкания на землю, А . . . . .	30	20	10

Предотвращение развития однофазных замыканий на землю в многофазные замыкания достигается компенсацией емкостных токов замыкания на землю индуктивными токами дугогасящих реакторов. На рис. 75 показана типовая схема замещения системы электроснабжения серии электролизеров. Активное сопротивление фаз системы электроснабжения  $r$  определяется токами утечки, протекающими по поверхности изоляторов токопроводов и других элементов системы электроснабжения, а также через активное сопротивление изоляции электрических кабелей. Ток утечки через подвесную и опорную изоляцию токопроводов, шин напряжением 6–10 кВ распределительной подстанции и т.п. составляет около 5 % полного емкостного тока системы электроснабжения. При значительных загрязнениях и увлажнении изоляции он увеличивается до 9–11 %. В кабельных линиях активная составляющая тока замыкания на землю достигает 7–12 % полного емкостного тока, а в сетях с синусоидальным напряжением 2–4 %. Увеличение активной составляющей тока замыкания на землю свидетельствует о наличии в системе электроснабжения кабелей с ослабленной изоляцией. Активное сопротивление  $r_k$  дугогасящего реактора характеризует потери активной мощности в его магнитопроводе. Составляющая тока, обусловленная этими потерями, мала по сравнению с полным током реактора и составляет около 0,5 % [8].

При дугогасящем реакторе на нейтрали появляется напряжение смещения, обусловленное несимметрией напряжения:  $U_{см} = U_{нс} / \sqrt{K^2 + d^2}$ , где

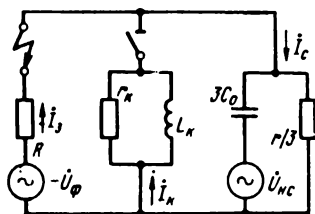


Рис. 75. Схема замещения системы электроснабжения серии электролизеров с изолированной нейтралью при компенсации емкостного тока дугогасящим реактором

$a$  — коэффициент успокоения в сети, он равен отношению активной составляющей тока замыкания на землю к емкостному току;  $K$  — коэффициент расстройки компенсации, %:  $K = (I_c - I_k) 100 / I_c$ , где  $I_c$  — емкостный ток замыкания на землю, А;  $I_k$  — индуктивный ток дугогасящего реактора, А.

При металлическом замыкании фазы системы электроснабжения с компенсированной нейтралью  $U_{см} = U_{\phi}$ .

При резонансной настройке дугогасящего реактора  $3 \omega C_0 = 1 / \omega L_k = b$  и металлическом однофазном замыкании на землю ток основной частоты — чисто активный:  $I_{01} = 3 U_{\phi} / (3 r_k + r)$ .

За счет искажения формы кривой фазового напряжения через место замыкания также протекают токи высших гармоник.

Пренебрегая активной составляющей тока  $\nu$ -той гармоники, обусловленной проводимостью системы электроснабжения, реактивную составляющую определяют как разность токов, протекающих через фазовые емкости на землю и дугогасящий реактор:

$$I_{\nu} = U_{\nu} (\nu 3 \omega C_0 - 1 / \nu \omega K_k) = U_{\nu} b (\nu - 1 / \nu), \quad (102)$$

где  $U_{\nu}$  — действующее значение  $\nu$ -той гармоники напряжения, В.

При известной величине емкостного тока замыкания на землю имеем:  $I_c = U_1 3 \omega C_0 = U_1 b$ , где  $U_1$  — фазовое напряжение 1-й гармоники, В:

$$I_{\nu} / I_c = U_{\nu} / U_1 (\nu - 1 / \nu). \quad (103)$$

Выражение (103) позволяет по известному гармоническому составу фазового напряжения определить гармонический состав тока замыкания на землю.

Таким образом, для определения влияния несинусоидальности напряжения на ток замыкания на землю необходимо иметь достоверную информацию о действующих значениях канонических и аномальных гармоник фазного напряжения. Такую информацию получить расчетным путем невозможно. Поэтому (например, при решении вопроса о возможности подключения к действующей системе электроснабжения мощных преобразователей) расчеты по определению токов однофазных замыканий на землю не производят. В результате снижается расчетная обеспеченность надежности систем электроснабжения.

В то же время приведенный метод расчета интегрального показателя высших гармонических составляющих напряжения (см. гл. II) — коэффициента несинусоидальности напряжения — и тщательное изучение пределов его изменения в системах электроснабжения действующих предприятий позволяют представить задачу по определению тока однофазного замыкания на землю как экстремальную.

Методы планирования экстремальных экспериментов дают возможность благодаря оптимальному расположению точек, характеризующих исследуемый параметр в факторном пространстве, и линейному преобразованию координат преодолеть недостатки классического регрессионного анализа, в частности корреляцию между коэффициентами управления регрессии.

При металлическом замыкании на землю ток однофазного замыкания зависит от величины фазового напряжения, емкостной проводимости системы электроснабжения, несинусоидальности напряжения и частоты. Его можно представить следующей функцией:  $I_3 = f(3 C_0, \omega, U_{\text{ф}}, K_{\text{нс}})$ , где  $\omega$  — круговая частота при  $f = 50$  Гц.

Отклонения напряжения и частоты на величины, которые наблюдаются в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии, не оказывают значительного влияния на ток однофазного замыкания на землю. Поэтому фазовое напряжение и частота отнесены к неизменным факторам.

Интегральным критерием величины  $3 C_0$  является расчетный емкостный ток замыкания на землю, определенный при синусоидальном напряжении:  $I_{\text{с.р}} = 3 C_0 \omega U_{\text{ф}}$ . Емкостный ток однофазного замыкания на землю кабельных линий превышает емкостный ток токопроводов, ошиновки распределительных подстанций и оборудования в 100 раз и более. Поэтому емкость этих элементов системы электроснабжения не всегда нужно учитывать. Таким образом, определяющими параметрами системы электроснабжения, влияющими на величину расчетного тока замыкания на землю при  $K_{\text{нс}} = 0$ , являются длина и сечение кабелей.

Статистические исследования систем электроснабжения преобразовательных подстанций серий электролизеров показали, что суммарные длины кабелей сечением 50–240 мм<sup>2</sup>, напряжением 6–10 кВ, проложенные на металлургических предприятиях и подключенные к целой или отдельной части системы электроснабжения, находятся в пределах 7,6–22,4 км. Расчетный емкостный ток замыкания на землю отдельных частей систем электроснабжения находится в пределах 8–24 А.

На основании изложенного ниже представлена характеристика факторов, влияющих на величину емкостного тока замыкания на землю:

	Основной уровень $X_{i0}$	Интервал варьирования $\Delta X_i$	Верхний уровень $X_{i \text{ max}}$	Нижний уровень $X_{i \text{ min}}$
$X_1 \rightarrow I_{\text{с.р.}}, \text{А} \dots \dots$	14,75	6,58	21,33	8,16
$X_2 \rightarrow K_{\text{нс}}, \% \dots \dots$	5	5	10	0

Матрица планирования полного факторного эксперимента  $2^2$  приведена в табл. 9.

Опыты металлического короткого замыкания проводили на физической модели и в системе электроснабжения одного из предприятий отрасли.

Т а б л и ц а 9. Матрица планирования эксперимента

$u$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$\bar{I}_3, \text{А}$	$S_3^2$	$(I_3 - \bar{I}_3)^2$
1	+	—	—	+	8,3	0,01	0,01
2	+	+	—	—	22	0,58	0
3	+	—	+	—	21,2	0,42	0,0016
4	+	+	+	+	56	0,75	0
5	+	0,49	—	0,49	18	—	—
$b_i$	26,9	12,1	11,7	5,3	—	$\Sigma 1,76$	$\Sigma 0,0116$

Эмпирическое среднее значение  $\bar{I}_3$  и дисперсию  $S_3^2$  определяют по формулам [12]:

$$\bar{I}_3 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_{3i}; \quad S_3^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (I_{3i} - \bar{I}_3)^2,$$

где  $m=3$  — повторяемость каждого опыта.

Используя критерий Кохрена, определяют, что ряд дисперсий  $S_3^2$  однороден. Вычисляя величину  $G = S_3^2 \max_u / \sum_{u=1}^N$  и сравнивая с  $G_{\text{табл}} = 0,87$  при  $K_1 = m - 1$  и  $K_2 = 3$  и принятой доверительной вероятности  $p(t) = 0,95$  [35], устанавливают при  $G < G_{\text{табл}}$ , что гипотеза об однородности не отвергается.

Оценку дисперсии опыта производят по дисперсии воспроизводимости  $S_y^2$  с числом степеней свободы  $K_y = (m-1)N = 8$ :  $S_y^2 = \sum_{u=1}^N S_3^2 / N$ .

Значения коэффициентов полинома определяют по формулам:

$$b_i = \sum_{u=1}^N \bar{I}_3 X_{iu} / N; \quad b_{ij} = \sum_{u=1}^N \bar{I}_3 X_{iu} X_{ju} / N,$$

где  $u$  — номер опыта;  $i, j$  — номера факторов;  $N$  — число опытов.

Математическая модель имеет вид:

$$I_3 = 26,9 + 12,1 X_1 + 11,7 X_2 + 15,3 X_1 X_3. \quad (104)$$

Статистическую значимость коэффициентов полиномов определяют по доверительному интервалу [35], вычисляемому с помощью таблиц критерия Стьюдента:  $\Delta b = t \sqrt{S_y^2 / N}$ , где  $t = 2,31$  — табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента при принятой доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы  $K_y = 8$ .

Коэффициенты полинома больше  $\Delta b$  значимы.

Проверку адекватности математической модели производят по критерию Фишера  $F$ . Для этого по формуле (104): 1) вычисляют значения  $I_{3i}$  в каждом опыте; 2) находят дисперсию адекватности:  $S_{\text{ад}}^2 = m \sum_{u=1}^N (\bar{I}_3 - I_{3i})^2 / K_{\text{ад}}$ , где  $K_{\text{ад}} = 1$  — число степеней свободы; 3) определяют расчетное значение критерия Фишера:  $F = S_{\text{ад}}^2 / S_y^2$  и сравнивают с табличным его значением, полученным при доверительной вероятности 0,95 со степенями свободы  $K_y = 8$  для меньшей дисперсии и  $K_{\text{ад}} = 1$  для большей.

При  $F_{\text{табл}} > F$  математическая модель адекватна. Проверка уравнения (104) с помощью опыта № 5 в центре плана (см. табл. 9) подтверждает этот вывод:  $|\bar{I}_3 - I_3| < S_y$ .

Уравнение (104) при натуральных значениях  $I_{\text{с.р}}$  и  $K_{\text{нс}}$  имеет вид:  $I_3 = I_{\text{с.р}} + 0,16 I_{\text{с.р}} K_{\text{нс}}$  (105).

Относительная ошибка расчетов по формуле (105) составляет  $\pm 5\%$ .

*Прогнозирование изменения тока однофазного замыкания на землю в системе электроснабжения.* В процессе эксплуатации систем электроснабжения происходит увеличение токов однофазных замыканий на землю, вызванное повышением емкостных токов замыкания на землю и изменением коэффициента несинусоидальности напряжения.

Для научно обоснованной координации уровней токов однофазных замыканий на землю необходимо иметь достоверную информацию о динамике изменения их во времени. Поэтому при проектировании систем электроснабжения первой очередной задачей по координации уровней токов однофазных замыканий на землю является его прогнозирование за расчетный период эксплуатации предприятия.

Математическое выражение (93) позволяет прогнозировать величину коэффициента несинусоидальности напряжения при известном изменении числа преобразовательных агрегатов, режимов их работы и параметров системы электроснабжения. Если такая информация отсутствует, то прогнозирование  $K_{нс}$  необходимо производить по изменению коэффициента мощности преобразовательных агрегатов (см. гл II).

В тех случаях, когда не известны пределы изменения параметров системы электроснабжения, рекомендуется пользоваться косвенным методом, основанным на зависимости емкостного тока замыкания на землю от суммарной установленной мощности цеховых трансформаторов, трансформаторов преобразовательных агрегатов и высоковольтных двигателей  $\Sigma S$ , а также от площади технологических цехов.

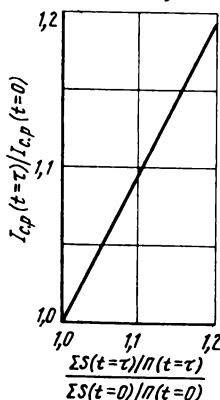


Рис. 76. Зависимость изменения расчетного емкостного тока однофазного замыкания на землю от изменения плотности установленной мощности приемников электрической энергии в технологических цехах

На рис. 76 показана зависимость изменения расчетного емкостного тока однофазного замыкания на землю от изменения плотности установленной мощности приемников электрической энергии в технологических цехах, т.е.

$$\frac{I_{с.р}(t=\tau)}{I_{с.р}(t=0)} = f \left[ \frac{\Sigma S(t=\tau)/\Pi(t=\tau)}{\Sigma S(t=0)/\Pi(t=0)} \right],$$

где  $I_{с.р}(t=0)$  и  $I_{с.р}(t=\tau)$  — соответственно расчетный ток замыкания на землю при вводе предприятия в работу и через  $\tau$  лет, А;  $\Pi(t=0)$  и  $\Pi(t=\tau)$  — соответственно площадь технологических цехов при вводе предприятия в работу и через  $\tau$  лет,  $\text{м}^2$ ;  $\Sigma S(t=0)$  и  $\Sigma S(t=\tau)$  — соответственно суммарная установленная мощность цеховых и преобразовательных трансформаторов, высоковольтных электродвигателей при вводе предприятия в работу и через  $\tau$  лет, МВт.

*Координация уровней токов однофазных замыканий на землю в системе электроснабжения при несинусоидальном напряжении.* В системах электроснабжения с синусоидальным напряжением снижение токов однофазных замыканий на землю достигается установкой дугогасящих реакторов типа ЗРОМ, которые настраивают на компенсацию емкостных токов. При резонансной настройке дугогасящих реакторов ток замыкания на землю не содержит реактивной составляющей (индуктивной или ем-

костной) основной частоты. Однако активная составляющая тока, обусловленная потерями в дугогасящих реакторах, активной проводимостью сети и активным сопротивлением контура заземления, и высшие гармонические составляющие тока, обусловленные искажением формы кривой фазного напряжения, составляют в системах электроснабжения серий электролизеров значительную величину. Отсюда возникает задача координации уровней токов однофазных замыканий на землю — проверка эффективности снижения до требуемой Правилами устройств электроустановок величины тока замыкания на землю дугогасящими реакторами типа ЗРОМ, настроенными на резонанс токов 1-й гармоники.

Для решения этой задачи классическим методом необходимо знать спектр высших гармоник фазного напряжения. Из-за низкой точности расчетного определения действующих значений высших гармонических составляющих напряжения и значительной трудоемкости решение поставленной задачи целесообразно осуществить с помощью теории планирования эксперимента, позволяющей получить математическое выражение функции цели в заданных условиях.

В качестве функции цели принимают действующее значение полного тока в месте замыкания на землю при компенсации 1-й гармоники дугогасящими реакторами  $I_{3\nu}$ .

Основными факторами, влияющими на  $I_{3\nu}$ , являются: расчетное значение тока замыкания при синусоидальном напряжении  $I_{с.р.}$ , величина коэффициента несинусоидальности  $K_{нс}$  и количество дугогасящих реакторов  $n$ .

Для получения полинома, описывающего функцию  $I_{3\nu} = f(I_{с.р.}, K_{нс}, n)$ , был реализован полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . Диапазоны варьирования факторов приняты широкие, они охватывают все реально встречающиеся ситуации:

	Основной уровень $X_{i0}$	Интервал варьирования $\Delta X_i$	Верхний уровень $X_i \max$	Нижний уровень $X_i \min$
$X_1 \rightarrow I_{с.р.}, \text{А} \dots\dots\dots$	14,75	6,58	21,33	8,17
$X_2 \rightarrow K_{нс}, \% \dots\dots\dots$	5	5	10	0
$X_3 \rightarrow n \dots\dots\dots$	0	1	1	0

После обработки результатов плановых опытов получено следующее выражение:  $I_{3\nu} = 4,9 - 0,7 K_{нс} + 0,14 I_{с.р.} K_{нс}$  (106).

Результаты расчетов  $I_{3\nu}$  по формуле (106) показывают, что расхождения с опытными данными не выходят за пределы интервала  $\pm S_y$  (дисперсии воспроизводимости).

Если после компенсации 1-й гармоники снизить однофазный ток замыкания на землю до требуемой величины не удастся, то дальнейшее снижение необходимо обеспечивать путем изменения схемы электроснабжения, оптимального распределения приемников электрической энергии между отдельными секциями распределительных устройств, деления системы электроснабжения в характерных точках. Т.е. первоначальная схема электроснабжения должна быть пересмотрена и повторно произведена координация уровней токов однофазного замыкания на землю. При этом



необходимо принимать во внимание, что стационарное или автоматическое деление системы электроснабжения при эксплуатации является вынужденным решением в условиях отсутствия эффективных серийно поставляемых электропромышленностью токоограничивающих устройств. Поэтому деление сети следует рассматривать как внутренний резерв системы электроснабжения [36].

Эффективное средство снижения однофазного тока замыкания на землю — выделение в особую группу приемников электрической энергии полупроводниковых выпрямительных агрегатов, подключенных к отдельным понизительным трансформаторам или генераторам ТЭЦ. Т.е. систему электроснабжения полупроводниковых выпрямительных агрегатов с искаженной формой следует строить с минимально возможными параметрами ее элементов.

Компенсацию гармонических составляющих остаточного тока замыкания на землю в некоторых зарубежных электрических системах осуществляют путем установки специальных дугогасящих устройств, состоящих из индуктивной катушки и конденсаторов [8]. Эти устройства представляют собой фильтры, настроенные на частоте основной и высших гармоник. Подобные устройства в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии не применяют в основном из-за отсутствия технико-экономического обоснования. При этом считают, что гармоники должны быть сведены к минимуму в нормальных режимах работы сети, а не в период возникновения однофазных замыканий на землю. Такой подход к этим устройствам представляется обоснованным при создании новых объектов цветной металлургии; на действующих же предприятиях применение их повысило бы надежность систем электроснабжения.

#### **4. Выбор оптимальной структуры системы электроснабжения мощных серий электролизеров цветных металлов**

Система электроснабжения предприятий с мощными сериями электролизеров цветных металлов должна обеспечивать нормируемые показатели качества электрической энергии на вводе к каждому приемнику электрической энергии и надежности, отвечающую требованиям потребителей первой категории [37].

Показатели качества напряжения в системе электроснабжения с мощными полупроводниковыми выпрямительными агрегатами питания серий электролизеров цветных металлов в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–67 обеспечиваются при определенном значении мощности трехфазного короткого замыкания на шинах переменного тока преобразовательной подстанции (см. гл. V, разд. 2).

Значительная по величине мощность трехфазного короткого замыкания  $S_{к.з}$  уменьшает отклонения и колебания напряжения у приемников электрической энергии, повышает устойчивость работы двигателя, уменьшает потери электрической энергии. В то же время рост  $S_{к.з}$  при заданной величине напряжения в системе электроснабжения увеличивает ток трехфазного короткого замыкания, повышает стоимость системы электроснабжения из-за применения электрических аппаратов (выключателей,

разъединителей) со значительной отличающей способностью, а силовых электрических кабелей и токопроводов с высокими показателями электродинамической и термической стойкости.

Структура системы и ее параметры определяют уровень мощности трехфазного короткого замыкания, которая, оказывая непосредственное влияние на технико-экономические показатели, является ее интегральным параметром. При построении системы электроснабжения для ослабления отрицательного воздействия на качество электрической энергии различных режимов преобразовательных агрегатов необходимо полное использование мощности трехфазного короткого замыкания на границе раздела между системой внутриводского электроснабжения и внешней энергосистемой, которая в электрических сетях напряжением 110 кВ составляет 1000–1800 МВ·А, а в сетях напряжением 220 кВ 1700–2900 МВ·А.

В настоящее время при выборе вариантов системы электроснабжения использование этой мощности для повышения качества электрической энергии не анализируется. Замеры, проведенные в системах электроснабжения напряжением 10 кВ 16 предприятий отрасли, показывают, что  $K_{нс} = 6 \div 12 \%$ ,  $S_{к.з} = 200 \div 600$  МВ·А. Предприятия имеют одинаковый уровень мощности трехфазного короткого замыкания при различных преобразовательных нагрузках. Коэффициент несинусоидальности же в этих системах электроснабжения различный и превышает допустимое значение. Оптимальную структуру системы электроснабжения определяют путем оптимизации мощности трехфазного короткого замыкания на шинах переменного тока преобразовательной подстанции и выбора оптимального варианта схемы системы электроснабжения.

*Оптимизация  $S_{к.з}$  в системе электроснабжения.* Критерием принятия технического решения, согласно специальной методике [38], утвержденной Государственным комитетом СССР по науке и технике, является его экономическая целесообразность. Поэтому приняты в качестве целевой функции приведенные годовые затраты на систему электроснабжения. На них влияет напряжение сети, технические параметры электрооборудования, стоимость оборудования, убыток от нарушения качества электрической энергии и перерывов в электроснабжении, потери электрической энергии. На выбор этой целевой функции повлияло также следующее: задача оптимизации  $S_{к.з}$  является частью общей задачи по оптимизации структуры и параметров системы электроснабжения. Выбранную целевую функцию с достаточной общностью уже широко используют при оптимизации напряжения, оптимального сечения сетей и пр.

Задача оптимизации — многоэкстремальная. Она формулируется следующим образом: для данной системы электроснабжения необходимо найти оптимальную величину мощности трехфазного короткого замыкания путем минимизации функции приведенных затрат:

$$Z(S_{к.з}) = C_3 + K_{н.з}K + Y \quad (107)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} I_{к.з} \leq I_{к.з.доп}; & I_{к.з} > I_{п}; & \Delta U \leq \Delta U_{доп}; & K_{н.с} \leq K_{н.с.доп}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 \leq I_{3.\text{доп}}; K_{3.т} = K_{3.т.о}; K \leq K_{\text{доп}}; n_a \leq n_{a.\text{доп}}; \\ L_{\Pi} \leq L_{\Pi.\text{доп}}; p(t) \geq p(t)_{\text{доп}}; \Delta P \rightarrow \min. \end{cases}$$

Здесь  $C_3$  — ежегодные эксплуатационные расходы;  $K_{н.э}$  — нормативный коэффициент экономической эффективности;  $K$  — капиталовложения;  $Y$  — суммарный убыток от перерыва в электроснабжении и нарушения качества электрической энергии;  $I_{к.з.доп}$  — максимально допустимый ток трехфазного короткого замыкания по условиям надежной работы аппаратов и сетей;  $I_{\Pi}$  — максимальный пусковой ток преобразовательной подстанции серии электролиза цветных металлов;  $\Delta U_{\text{доп}}$  — допустимое понижение напряжения в системе электроснабжения в переходных режимах;  $K_{нс.доп}$  — допустимое значение коэффициента несинусоидальности напряжения согласно ГОСТ 13109–67;  $p(t)_{\text{доп}}$  — допустимое значение вероятности безотказной работы за время  $t$ ;  $K_{\text{доп}}$  — плановые капиталовложения в систему электроснабжения;  $n_a$  — матрица числа требуемых различных электрических аппаратов;  $n_{a.\text{доп}}$  — матрица допустимого числа аппаратов, определяемая с учетом фондовых ограничений;  $L_{\Pi}$  — матрица требуемых проводников необходимых параметров;  $L_{\Pi.\text{доп}}$  — матрица допустимого количества проводников необходимых параметров;  $I_{3.\text{доп}}$  — допустимое значение тока замыкания на землю;  $K_{3.т}$  — коэффициент загрузки понижающих трансформаторов;  $\Delta P$  — потери активной мощности в системе электроснабжения;  $K_{3.т.о}$  — оптимальный коэффициент загрузки понижающих трансформаторов.

Величину годовых эксплуатационных расходов на систему электроснабжения определяют по формуле:  $C_3 = C_{\Pi} + C_a + C_{o.\Pi} + C_M$ , где  $C_{\Pi}$  — стоимость потерь электрической энергии в системе электроснабжения;  $C_a$  — амортизационные отчисления;  $C_{o.\Pi}$  — расходы на содержание обслуживающего персонала и текущий ремонт;  $C_M$  — затраты на материалы (вспомогательные расходы).

Убытки от перерыва в электроснабжении и нарушении качества электрической энергии равны:  $Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$ , где  $Y_1$  — убытки от перерыва электроснабжения;  $Y_2$  — убытки от нарушения качества напряжения в системе электроснабжения;  $Y_3$  — убыток, вызванный необходимостью обеспечить при проектировании необходимую (более высокую) мощность трехфазного короткого замыкания на шинах преобразовательной подстанции.

Одна из важнейших задач при минимизации функции годовых затрат — объективная и методически строгая оценка убытков (см. гл. I).

Расчеты по формуле (107) показывают, что оптимальный уровень  $S_{к.з}$  существенно отличается от уровня  $S_{к.з.}$ , получаемого по существующей детерминированной методике, в соответствии с которой он определяется по наиболее слабому элементу системы электроснабжения. Обычно этими элементами являются электрические кабели с невысокой термической стойкостью и выключатели с незначительной отключающей мощностью. Для системы электроснабжения предприятий с электролизными производствами минимум приведенных годовых затрат находится в области повышенных значений  $S_{к.з.}$

В отдельных случаях оправданы именно малоомощных выключателей более мощными, увеличение сечения кабелей сверх необходимых по условиям работы в нормальном, ремонтном и послеаварийном режимах.

**Выбор оптимального варианта схемы системы электроснабжения.** Эта задача формулируется следующим образом: из сравниваемых  $n$  систем электроснабжения необходимо выбрать единственную с оптимальными параметрами.

Для данной технико-экономической задачи характерно табличное задание функции. Пусть в общем случае функция задана таблично:

$$\begin{array}{cccc} Z_i, \text{ тыс. руб.} & Z_1 & Z_2 & Z_n \\ S_{\text{к.з}}, \text{ МВ·А} & S_{\text{к.з}1} & S_{\text{к.з}2} & S_{\text{к.з}n} \end{array}$$

Аппроксимируя по методу наименьших квадратов [8, 14] эмпирическую функцию многочленом 2-й степени, получаем  $Z = a + bS_{\text{к.з}} + cS_{\text{к.з}}^2$  (108).

Этой степени многочлена, как правило, бывает достаточно, когда рассматривают не более 4–7 вариантов системы электроснабжения.

Для определения среднеквадратичной ошибки расчета годовых затрат с помощью аппроксимирующего многочлена составляют таблицу отклонения:

$$\begin{array}{ccc} S_{\text{к.з}i}, \text{ МВ·А} & S_{\text{к.з}1} & S_{\text{к.з}2} & S_{\text{к.з}n} \\ Z_i, \text{ тыс. руб.} & Z_1 & Z_2 & Z_n \\ \hat{Z}_i, \text{ тыс. руб.} & \hat{Z}_1 & \hat{Z}_2 & \hat{Z}_n \\ \epsilon_i = (Z_i - \hat{Z}_i), \text{ тыс. руб.} & \epsilon_1 & \epsilon_2 & \epsilon_n \end{array}$$

В этой таблице  $\hat{Z}_i$  — значения годовых затрат, рассчитанные с помощью уравнения (108).

Аппроксимация считается удовлетворяющей условию, если среднеквадратичная ошибка  $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 / (n-1)}$  не превышает 10 % среднеквадратичных табличных значений эмпирической функции [39].

Для определения экстремума эмпирической функции, заданной таблично, дифференцируем полученный многочлен (108) и, приравнявая производную нулю, получаем:  $S_{\text{к.з}} = 1 - (b/2c)$ .

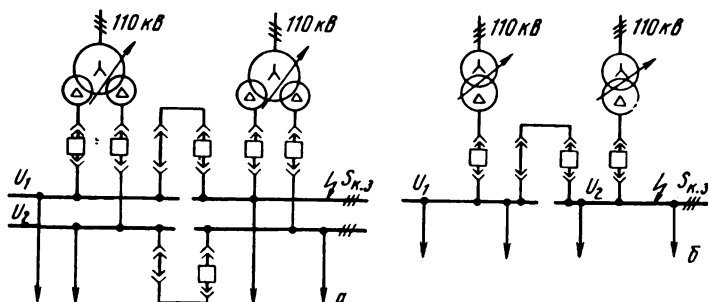


Рис. 77. Схемы системы электроснабжения преобразовательной подстанции с раздельным (а) и совместным (б) питанием силовой и выпрямительной нагрузок

**Т а б л и ц а 10. Техничко-экономические данные сравниваемых вариантов системы электроснабжения**

Схема на рис. 77	Тип трансформатора	Выпрямительная нагрузка			Силовая нагрузка		$З \cdot 10^3$ , руб.
		$U_1$ , кВ	$K_{нс}$ , %	$S_{к.з.}$ , МВ·А	$U_2$ , кВ	$K_{нс}$ , %	
<i>a</i>	ТРДН-25000/110	10,5	7,6	118,6	10,5	3,8	69,7
<i>a</i>	ТДТН-25000/110	35,0	4,74	203,6	10,5	1,0	58,26
<i>a</i>	ТРДН-31500/110	20,0	7,3	146,9	6,3	336	63,7
<i>б</i>	ТДН-40500/110	10,5	4,0	317,62	10,5	4,0	81,0

Аппроксимация по методу наименьших квадратов рекомендуется потому, что в нем существует тенденция к сглаживанию случайных ошибок. Это свойство метода имеет важное значение при технико-экономических расчетах, так как расчетные значения по полученному выражению, как правило, лучше исходных.

*Пример.* Необходимо выбрать схему системы электроснабжения для медеплавильного производства полиметаллического комбината. Активная мощность серии электролизеров меди составляет 7,5 МВт, реактивная мощность 5,6 Мвар, активная мощность силовой нагрузки 21,3 МВт, реактивная мощность 8,29 Мвар, питание предусматривается от внешней энергетической системы по двум линиям напряжением 115 кВ. Мощность трехфазного короткого замыкания на ЛЭП-115 на главной понижающей подстанции предприятия составляет 1800 МВ·А.

Сравним два варианта принципиальных схем системы электроснабжения, имеющих одинаковый уровень надежности, с раздельным и совместным питанием силовой и выпрямительной нагрузок (рис. 77, *a* и *б*). После предварительных расчетов намечилось 4 варианта выполнения этих схем (табл. 10).

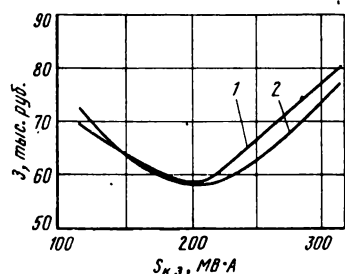


Рис. 78. Зависимость  $З = f(S_{к.з.})$ . Кривые построены:  
1 — по эмпирическим данным; 2 — по аппроксимирующему многочлену

Аппроксимируем эмпирическую функцию приведенных годовых затрат многочленом второй степени:

$$\hat{З} = 137,3 - 0,766 S_{к.з.} + 0,00185 S_{к.з.}^2 \quad (109)$$

На рис. 78 показана зависимость эмпирической  $З$  и определенной по формуле (109) функций приведенных годовых затрат от мощности трехфазного короткого замыкания. Среднеквадратичная ошибка составляет менее 10 % среднеарифметического значения функции  $З$ .

Из уравнения (109) получено значение  $S_{к.з.} = 207,05$  МВ·А, при котором достигается минимум приведенных годовых затрат.

Оптимальный вариант схемы системы электроснабжения — схема с раздельным питанием нагрузок и применением трехобмоточного трансформатора типа ТДТН-25000/110. Оптимальное напряжение питания полупроводниковых выпрямительных агрегатов 35 кВ. Таким образом, определенное напряжение питания полупроводниковых выпрямительных агрегатов характеризует одно из основных требований системы электроснабжения к полупроводниковым выпрямительным

агрегатам. Этим требованиям удовлетворяют агрегаты питания типа ВАКД-12500/300.

Для обеспечения общепромышленного  $\lg \varphi = 0,41$  необходимо предусмотреть конденсаторную батарею мощностью 2181 квар в сетях силовой нагрузки.

### **5. Требования к трансформаторному оборудованию силовых тиристорных агрегатов для цветной металлургии**

Технико-экономические показатели тиристорных агрегатов во многом определяются применяемым трансформаторным оборудованием: питающими трансформаторами, сглаживающими, уравнительными и токоограничивающими реакторами [40].

Опыт эксплуатации тиристорных агрегатов на предприятиях цветной металлургии в СССР и за рубежом показывает, что поставляемое в настоящее время трансформаторное оборудование не всегда соответствует требованиям.

Для комплектования мощных тиристорных преобразователей с нестационарными токами необходимы трансформаторы, способные выдерживать периодическое нарастание тока нагрузки от нуля до номинального в течение 0,05–0,1 с с частотой следования циклов до 20 в 1 мин; позволяющие реализовать не менее чем 24-фазный режим выпрямления; имеющие обмотки, рассчитанные на ток единичного преобразователя до 12500 А; переключающие устройства РПН, которые имеют втрое больший ресурс переключений. Кроме того, для обеспечения автономной работы фазосмещенных мостовых тиристорных выпрямителей необходимо разработать специальные уравнительные реакторы на ток ветви до 25 кА.

В связи с планами создания мощных комплексов цветной металлургии и выделением значительных средств на реконструкцию действующих предприятий значительно возрастут единичные мощности серий электролизеров цветных металлов. Предполагается, что в ближайшем будущем получение меди, никеля и цинка в основном будет осуществляться в электролизерах с рабочим током 50 кА и более, магния — 150, 200 кА, алюминия — 200, 250 кА. Чтобы сохранить количество полупроводниковых выпрямительных агрегатов на преобразовательных подстанциях на существующем уровне, установленном в соответствии с рекомендациями АН СССР [1], необходимо увеличить единичную мощность преобразовательных агрегатов. Следует ожидать усиления воздействия режимов работы этих агрегатов на качество электрической энергии в системе электрообеспечения.

Для эффективного применения схемных решений систем электроснабжения с целью уменьшения коэффициента несинусоидальности напряжения необходимо, чтобы первичные напряжения преобразовательных трансформаторов имели величину, позволяющую подключать их к системе электроснабжения с оптимальным уровнем напряжения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гарнов В.К., Вишневецкий Л.М., Левин Л.Г.* Оптимизация работы мощных электрометаллургических установок. М.: Металлургия, 1975. 334 с., ил.
2. *Бойко Ф.К., Сальников В.Г.* Методические рекомендации по рациональному использованию электрической энергии на предприятиях цветной металлургии. Омск.: НТО, 1972. 140 с., ил.
3. Тиристорные преобразователи для питания электролизеров цветной металлургии/*Городецкий В.А., Бобков В.А., Коновалов Г.С., Родштейн Л.С.* М.: Цветметинформация, 1978. 43 с., ил.
4. Асинхронный частотный электропривод в цветной металлургии/*Сальников В.Г., Бобков В.А., Патрик А.А., Копырин В.С.* М.: Цветметинформация, 1975. 56 с., ил.
5. *Онищенко Г.Б.* Асинхронно-вентильный каскад. М.: Энергия, 1967. 321 с., ил.
6. Асинхронный электропривод по схеме вентильного каскада в цветной металлургии/*Сальников В.Г., Бобков В.А., Патрик А.А., Копырин В.С.* М.: Цветметинформация, 1977. 43 с., ил.
7. Синхронный электропривод со статическими возбудителями в цветной металлургии/*Сальников В.Г., Бойко Ф.К., Копырин В.С., Дворянчиков Г.Е.* М.: Цветметинформация, 1978. 37 с., ил.
8. Оптимизация систем электроснабжения целлюлозно-бумажных предприятий/*Жежеленко И.В., Долгополов В.П., Слепов Ю.В., Хойнов В.И.* — М.: Лесная промышленность, 1980. 200 с., ил.
9. *Гарнов В.К., Вишневецкий Л.М., Пак И.С.* Мощные полупроводниковые агрегаты в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1970. 223 с., ил.
10. *Толстов Ю.Г., Мосткова Г.П., Ковалев Ф.И.* Силовые полупроводниковые выпрямители, управляемые дросселями насыщения. М.: Наука, 1968. 259 с., ил.
11. *Семчинов А.М.* Ртутно-преобразовательные и полупроводниковые подстанции. Л.: Энергия, 1968. 257 с., ил.
12. *Румшихский Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 192 с., ил.
13. *Городецкий В.А., Бобков В.А., Родштейн Л.С.* Цветные металлы, 1980, № 4, с. 23–25.
14. *Барский В.А.* Раздельное управление реверсивными тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1973. 112 с., ил.
15. *Маевский О.А.* Энергетические показатели вентильных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 318 с., ил.
16. *Сыров В.В., Галушко Ю.С.* Применение силовой полупроводниковой техники в цветной металлургии. М.: Цветметинформация, 1975. 51 с., ил.
17. *Жежеленко И.В.* Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 125 с., ил.
18. *Федоров А.А., Каменева В.В.* Основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1979. 407 с., ил.
19. Справочник по преобразовательной технике/Под ред. Чиженко И.М. Киев: Техника, 1978. 446 с., ил.
20. *Ермуратский В.В., Ермуратский И.В.* Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. М.: Энергия, 1979. 223 с., ил.
21. *Лихошерст В.И., Копырин В.С.* — В кн.: Экономические режимы работы промышленного электрического оборудования. Павлодар: Павлодарск. индустр. ин-т, 1973, с. 31–33.
22. *Карвовский О.П., Окорочков В.П.* Справочник по асинхронным двигателям и пускорегулирующей аппаратуре. М.: Энергия, 1963. 214 с., ил.
23. Экономия энергоресурсов при производстве глинозема/*Сальников В.Г., Печаско Н.И., Ульянов М.И.* и др. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1980. 24 с., ил.
24. *Сальников В.Г.* Опыт выбора и выполнения релейных защит токопроводов 6–10 кВ предприятий цветной металлургии. М.: Цветметинформация, 1976. 21 с., ил.

25. Сальников В.Г., Габжон Н.А. Цветная металлургия. Бюл. НТИ, 1973, № 2, с. 47–50.
26. Никулин И.А., Трошин Н.А., Архипенко Н.И., Гуханов Ю.М. Промышленная энергетика, 1968, № 9, с. 15–19.
27. Важнов А.И. Электрические машины. М.: Энергия, 1969. 168 с., ил.
28. Карпов Ф.Ф., Сидяткин Л.А. Регулирование напряжения в электросетях промышленных предприятий. М.: Энергия, 1970. 214 с., ил.
29. Багров О.Н., Клешко Л.М., Михайлов В.И. Энергетика основных производств цветной металлургии. М.: Металлургия, 1979. 375 с., ил.
30. Высочанский В.С. Электричество, 1973, № 4, с. 15–21.
31. Силовые полупроводниковые преобразователи в металлургии: Справочник/Под ред. Резницкого С.Р. М.: Металлургия, 1976. 183 с., ил.
32. Сальников В.Г., Брянский В.А. Промышленная энергетика, 1970, № 11, с. 38–40.
33. Сальников В.Г. Промышленная энергетика, 1969, № 1, с. 9–11.
34. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энергия, 1974. 174 с., ил.
35. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электротехнике. М.: Энергия, 1975. 184 с., ил.
36. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах. М.: Энергия, 1978. 151 с., ил.
37. Сальников В.Г. Электротехнология основных производств. Караганда: Карагандинск. политехнич. ин-т, 1976. 68 с., ил.
38. Методика технико-экономических расчетов в энергетике. М.: ГКНТ при СМ СССР, 1966. 81 с., ил.
39. Федоров А.А. Теоретические основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1976. 272 с., ил.
40. Сальников В.Г. Цветная металлургия. Бюл. НТИ. 1976, № 7, с. 62–64.



**Александр Диамидович НИКУЛИН, Василий Герасимович САЛЬНИКОВ,  
Людвиг Соломонович РОДШТЕЙН, Владимир Александрович БОБКОВ**

**ТИРИСТОРНАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
В ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

**Редактор издательства М.И.Заславская  
Художественный редактор А.И.Гофштейн  
Технический редактор Е.К. Астафьева  
Корректор Л.М.Зинченко**

**ИБ № 2151**

Подписано в печать 08.07.83. Т-14858 Формат бумаги 60 × 90 1/16  
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная Печ. л. 8,0 Кр.-отт. 8,25  
Уч.-изд. л. 9,39 Тираж 4400 экз. Заказ 2354 Цена 50 к. Изд. № 0502

**Набрано в издательстве "Металлургия"  
на электронном композере ИБМ 82 оператором Г.П.Красюк**

**Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство "Металлургия", 119034, Москва, Г-34,  
2-й Обыденский пер., д. 14**

**Московская типография № 9 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
г. Москва, Волочаевская ул., д. 40**

## **ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ И БИБЛИОТЕК!**

**Своевременно оформляйте заказы на книги,  
выпускаемые издательством  
"МЕТАЛЛУРГИЯ" в 1984 году**

КНИГОТОРГОВЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ И БИБЛИОТЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ ЗАКАЗЫ НЕ ПРИНИМАЮТ. В ПРОДАЖУ ЧЕРЕЗ КНИЖНЫЕ МАГАЗИНЫ ЭТА КНИГА НЕ ПОСТУПИТ. ЗАКАЗЫ МОЖНО ОФОРМИТЬ ТОЛЬКО В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ ИЛИ ОТПРАВИТЬ ПО ПОЧТЕ В АДРЕС ИЗДАТЕЛЬСТВА НА ОБЫЧНЫХ ПОЧТОВЫХ ОТКРЫТКАХ С ОБЯЗАТЕЛЬНЫМ УКАЗАНИЕМ ОБРАТНОГО АДРЕСА (ПОЧТОВЫЙ ИНДЕКС УКАЗАТЬ ОБЯЗАТЕЛЬНО).

ПРЕДПРИЯТИЯ, ОРГАНИЗАЦИИ И БИБЛИОТЕКИ ОФОРМЛЯЮТ ЗАКАЗЫ ГАРАНТИЙНЫМИ ПИСЬМАМИ С УКАЗАНИЕМ СРОКА ГАРАНТИИ ДО 31 МАРТА 1985 г.

ЗАКАЗЧИКИ ПОЛУЧАТ КНИГУ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ ЧЕРЕЗ МАГАЗИН "КНИГА – ПОЧТОЙ" № 93. ИЗДАТЕЛЬСТВО ГАРАНТИРУЕТ ВЫПОЛНЕНИЕ ВСЕХ ЗАКАЗОВ, ЕСЛИ ОНИ БУДУТ ОФОРМЛЕНЫ ДО 31 ДЕКАБРЯ 1983 г. ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ ЗАЯВКИ ПОСЛЕ ЭТОГО СРОКА ИЗДАТЕЛЬСТВО МОЖЕТ УЧЕСТЬ ЕЕ, ЕСЛИ К ЭТОМУ ВРЕМЕНИ КНИГА НЕ ПОДПИСАНА В ПЕЧАТЬ.

*Заказы направляйте по адресу: 119034, Москва, ГСП-3, 2-й Обыденский пер., д. 14, издательство "Металлургия", отдел распространения. Телефон для справок: 202-58-04.*

**Багров О.Н., Евдокименко А.И., Миневич В.И., Ковган П.А. — Горячее дутье в печах цветной металлургии. 12 л., 60 коп.**

Дан сравнительный анализ эффективности горячего дутья и других способов интенсификации металлургических процессов и утилизации тепловых отходов печей цветной металлургии. Рассмотрены устройства для сжигания топлива, конструкции воздухонагревателей, приведены методики их расчета.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, исследованием и эксплуатацией воздухонагревателей на предприятиях цветной металлургии.

**Жихаревич И.Г., Котляр Б.А., Сторожев Л.В., Чалов В.И. — Совершенствование организации и управления производством в цветной металлургии. — 8 л. 40 к.**

Обобщен опыт организации и управления производством на предприятиях цветной металлургии. С учетом особенностей отрасли рассмотрены концентрация производства, создание производственных комплексов, совершенствование структуры предприятий. Изложены вопросы научной организации и нормирования управленческого труда, применения различных методов управления.

Для инженерно-технических работников предприятий цветной металлургии.

Лагуткин Л.М., Еленский Ю.А., Сиразутдинова Ж.А. —  
**Производительность труда в цветной металлургии.** — 15 л. 75 к.

Рассмотрены факторы и пути повышения производительности труда на предприятиях цветной металлургии, взаимосвязь трудовых показателей с другими показателями техпромфинплана. Освещены вопросы методологии комплексного анализа производительности труда на отраслевом, подотраслевом уровнях управления, в первичном звене управления производством, а также проблемы планирования, экономического и материального стимулирования повышения производительности труда с учетом отраслевых особенностей.

Для инженерно-технических работников, экономистов, работников отделов труда и заработной платы, плановых органов предприятий и организаций цветной металлургии.