



Техническая коллекция

# Руководство по устройству электроустановок 2009

Технические решения  
«Шнейдер Электрик»



Данное руководство предназначено для специалистов, занимающихся проектированием, инсталляцией и обслуживанием электроустановок. Документ разработан в соответствии с нормами Международной электротехнической комиссии (МЭК). При разработке технических решений особое внимание уделено соблюдению требований техники безопасности.

Международный стандарт МЭК 60364 «Электроустановки зданий» устанавливает нормативы, обеспечивающие безопасность и требуемые рабочие характеристики электроустановок всех типов. Поскольку международный стандарт должен охватывать различные типы оборудования и технические решения, используемые во всем мире, правила данного стандарта должны быть комплексными и универсальными и не могут автоматически применяться к конкретному случаю. Поэтому стандарт МЭК не может рассматриваться в качестве рабочего руководства и предназначен для использования только в качестве справочного документа.

Цель настоящего руководства заключается в детальном пошаговом разъяснении требований к конкретной электроустановке в соответствии с МЭК 60364 и другими стандартами МЭК, применимыми к описываемой ситуации. Поэтому в первой главе рассматривается используемая методология, а каждая последующая глава описывает конкретный вопрос, который должен быть детально изучен. Особое внимание уделено рекомендациям по обеспечению электромагнитной совместимости, которые основаны на большом практическом опыте решения данных проблем.

Надеемся, что данное руководство окажется полезным для Вас.

**Schneider Electric S.A.**

Данное Руководство — это единый обобщающий материал, в котором изложены методы, правила и стандарты, относящиеся к электроустановкам. Оно предназначено для специалистов-электротехников, работающих в компаниях, конструкторских бюро, контролирующих организациях, и т. д.

«Руководство по устройству электроустановок» предназначено для квалифицированного технического персонала и, хотя авторы постарались включить в настоящий документ точную и достоверную информацию, компания Schneider Electric не берет на себя ответственность за любые последствия, которые могут возникнуть в связи с использованием данного материала неквалифицированным персоналом.

Мы выражаем благодарность коллективу ООО НПФ «Элпром» во главе с Генеральным Директором, к.т.н. Гельманом Г. А., доценту Самарского Государственного Технического Университета Лыкову Ю. Ф. за ценный вклад в редактирование русского издания Руководства, а также сотруднику Санкт-Петербургского Электротехнического Университета Шорохову А. Ю. за перевод и редактирование главы «Энергоэффективность в электрических сетях».

Мы будем чрезвычайно признательны всем специалистам, приславшим нам свои замечания и предложения, которые помогут улучшить следующее издание.

**ЗАО «Шнейдер Электрик», Россия**

**Общие правила проектирования  
электроустановок**

**A**

**Подключение к распределительной сети  
высокого напряжения**

**B**

**Подключение к низковольтной  
распределительной сети**

**C**

**Руководство по выбору архитектуры сети  
высокого и низкого напряжения**

**D**

**Распределение в системах низкого  
напряжения**

**E**

**Защита от поражения электрическим  
током**

**F**

**Выбор сечения и защита проводников**

**G**

**Низковольтная распределительная  
аппаратура**

**H**

**Защита от перенапряжений в  
низковольтных сетях**

**J**

**Энергоэффективность в электрических  
сетях**

**K**

**Компенсация реактивной мощности  
и фильтрация гармоник**

**L**

**Управление гармониками**

**M**

**Особые источники питания и нагрузки**

**N**

**Коттеджи, жилые и особые помещения**

**P**

**Рекомендации по обеспечению  
электромагнитной совместимости**

**Q**

# Общее содержание

<b>A</b>	<b>Общие правила проектирования электроустановок</b>	
	1 Методология	A2
	2 Действующие нормы и правила	A4
	3 Установленные мощности потребителей - характеристики	A10
	4 Силовая нагрузка электроустановки	A15
<b>B</b>	<b>Подключение к распределительной сети высокого напряжения</b>	
	1 Электроснабжение при высоком напряжении	B2
	2 Процедура создания новой подстанции	B14
	3 Защита	B16
	4 Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении	B22
	5 Подстанция потребителя с учетом на высоком напряжении	B32
	6 Создание распределительных понижающих подстанций	B37
<b>C</b>	<b>Подключение к низковольтной распределительной сети</b>	
	1 Низковольтные сети электроснабжения	C2
	2 Тарифы и учет электроэнергии	C16
<b>D</b>	<b>Руководство по выбору архитектуры сети высокого и низкого напряжения</b>	
	1 Преимущества для пользователя	D3
	2 Упрощенный процесс проектирования архитектуры	D4
	3 Характеристики электроустановки	D7
	4 Технические характеристики	D11
	5 Критерии оценки архитектуры	D13
	6 Выбор основных элементов архитектуры	D15
	7 Выбор архитектурных деталей	D19
	8 Выбор оборудования	D24
	9 Рекомендации по оптимизации архитектуры	D26
	10 Глоссарий	D29
	11 Программное обеспечение ID-Spec	D30
	12 Пример: электроснабжение типографии	D31
<b>E</b>	<b>Распределение в системах низкого напряжения</b>	
	1 Системы заземления	E2
	2 Система установки	E15
	3 Внешние воздействия (МЭК 60364-5-51)	E25
<b>F</b>	<b>Защита от поражения электрическим током</b>	
	1 Общие сведения	F2
	2 Защита от прямого прикосновения	F4
	3 Защита от косвенного прикосновения	F6
	4 Защита имущества от ущерба вследствие пробоя изоляции	F17
	5 Реализация системы TT	F19
	6 Реализация системы TN	F23
	7 Реализация системы IT	F29
	8 Устройства защитного отключения (УЗО)	F36
<b>G</b>	<b>Выбор сечения и защита проводников</b>	
	1 Общие положения	G2
	2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводников в цепи	G7
	3 Расчет потерь напряжения	G20
	4 Ток короткого замыкания	G24
	5 Частные случаи токов короткого замыкания	G30
	6 Нулевой защитный проводник (PE)	G37
	7 Нейтральный провод	G42
	8 Пример расчета кабелей	G46



# Общее содержание

Н	<b>Низковольтная распределительная аппаратура</b>	
	1 Основные функции низковольтной распределительной аппаратуры	H2
	2 Коммутационные аппараты	H5
	3 Выбор коммутационной аппаратуры	H10
	4 Автоматический выключатель	H11
J	<b>Защита от перенапряжений в низковольтных сетях</b>	
	1 Общие положения	J2
	2 Устройства защиты от перенапряжений	J6
	3 Стандарты	J11
	4 Выбор защитной аппаратуры	J15
К	<b>Энергоэффективность в электрических сетях</b>	
	1 Введение	K2
	2 Энергоэффективность и электричество	K3
	3 Диагностика с использованием электрических измерений	K7
	4 Решения по энергосбережению	K13
	5 Оценка энергосбережения	K31
	6 От окупаемости проекта к постоянным дивидендам	K34
L	<b>Компенсация реактивной мощности и фильтрация гармоник</b>	
	1 Реактивная мощность и коэффициент мощности	L2
	2 Зачем повышать коэффициент мощности?	L5
	3 Методы повышения коэффициента мощности	L7
	4 Выбор места установки конденсаторов	L10
	5 Выбор оптимального уровня компенсации	L12
	6 Компенсация на зажимах трансформатора	L15
	7 Компенсация реактивной мощности асинхронных двигателей	L18
	8 Работа установки до и после компенсации реактивной мощности	L20
	9 Влияние гармоник	L21
	10 Конденсаторные батареи	L24
М	<b>Управление гармониками</b>	
	1 Проблема: Зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?	M2
	2 Стандарты	M3
	3 Общие положения	M4
	4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки	M6
	5 Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения	M11
	6 Измерение показателей	M14
	7 Устройства обнаружения	M16
	8 Способы ослабления гармоник	M17
N	<b>Особые источники питания и нагрузки</b>	
	1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей	N2
	2 Источники бесперебойного питания (ИБП)	N11
	3 Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения	N24
	4 Осветительные сети	N27
	5 Асинхронные двигатели	N45
Р	<b>Коттеджи, жилые и особые помещения</b>	
	1 Жилые помещения и коттеджи	P2
	2 Ванные и душевые комнаты	P8
	3 Советы по устройству электроустановок для специальных помещений и зон	P12
Q	<b>Рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости</b>	
	1 Схемы распределения электроэнергии	Q2
	2 Принципы исполнения систем заземления	Q3
	3 Конструктивное исполнение	Q5
	4 Механизмы электромагнитной связи и меры противодействия	Q16
	5 Рекомендации по электропроводке	Q22



Содержание		
<b>1</b>	<b>Методология</b>	<b>A2</b>
<b>2</b>	<b>Действующие нормы и правила</b>	<b>A4</b>
	2.1 Определение диапазонов напряжений	A4
	2.2 Правила	A5
	2.3 Нормы	A5
	2.4 Качество и безопасность электроустановки	A6
	2.5 Предварительные испытания установки	A6
	2.6 Периодические проверки установки	A7
	2.7 Соответствие (нормам и спецификациям) оборудования установки	A7
	2.8 Окружающая среда	A8
<b>3</b>	<b>Установленные мощности потребителей - характеристики</b>	<b>A10</b>
	3.1 Асинхронные двигатели	A10
	3.2 Резистивные нагревательные приборы и лампы накаливания (традиционные и галогенные)	A12
<b>4</b>	<b>Силовая нагрузка электроустановки</b>	<b>A15</b>
	4.1 Установленная мощность (кВт)	A15
	4.2 Установленная полная мощность (кВА)	A15
	4.3 Оценка максимальной нагрузки (кВА)	A16
	4.4 Пример применения коэффициентов $k_u$ и $k_s$	A17
	4.5 Коэффициент одновременности	A18
	4.6 Выбор номинальной мощности трансформатора	A19
	4.7 Выбор источников питания	A20

**А - Общие правила проектирования электроустановок****В – Подключение к распределительной сети высокого напряжения****С - Подключение к распределительной сети электроснабжения низкого напряжения****Д - Руководство по выбору архитектуры сети высокого и низкого напряжения****Е - Низковольтное распределение****F - Защита от поражения электрическим током****G - Выбор сечения и защита проводников****Н - Распределительное устройство низкого напряжения: функции и выбор**

Чтобы оптимизировать проектирование электроустановок, рекомендуется прочитать все главы данного руководства в порядке их следования.

**Перечень силовых нагрузок**

Изучение предлагаемой электроустановки должно проводиться с учетом всех действующих норм и правил.

Общая потребляемая мощность может рассчитываться на основе данных о местоположении и мощности каждой нагрузки с учетом рабочих режимов (установившийся режим, пусковой режим, разновременная работа и т.д.)

На основе этих данных рассчитывается мощность, требуемая от источника питания, и (если это необходимо) число источников, необходимых для соответствующего питания установки.

Местная информация о тарифной структуре также требуется для обеспечения оптимального выбора схемы соединения с электросетью, например, на уровне высокого или низкого напряжения.

**Подключение абонента**

Это подключение может быть выполнено:

**■ На уровне высокого напряжения**

При этом варианте необходимо исследование, строительство и оснащение абонентской подстанции. Эта подстанция может быть закрытого или открытого типа в соответствии с действующими нормами и правилами (при необходимости, низковольтная секция может быть спроектирована отдельно). В этом случае возможен учет электроэнергии на высоком или низком напряжении.

**■ На уровне низкого напряжения**

Установка подсоединяется к местной электросети с учетом местных низковольтных тарифов.

**Архитектура распределительной электросети**

Распределительные сети установки проектируются в комплексе.

Предлагается руководство по выбору оптимальной архитектуры.

Рассматриваются распределительные электросети высокого/низкого и низкого напряжения.

Системы заземления выбираются в соответствии с местными нормами, ограничениями электропитания и типами нагрузок.

Распределительное оборудование (распределительные устройства, соединения цепей...) определяются на основе проектов детальной планировки и местоположения и группировки нагрузок.

Тип помещений и их расположение может влиять на чувствительность к внешним нарушениям.

**Защита от поражения электрическим током**

Должна быть предусмотрена система заземления (TT, IT или TN) с соответствующими устройствами для предотвращения поражения электрическим током.

**Цепи и распределительное устройство**

Детально изучается каждая цепь. На основе данных о номинальных токах, уровне тока короткого замыкания и типе устройства защиты можно определить площадь поперечного сечения проводников цепей с учетом типа проводки и их влияния на номинальный ток проводников. При выборе проводника должны быть удовлетворены следующие требования.

**■ Потеря напряжения в соответствии с действующим стандартом.****■ Обеспечение нормального пуска двигателей.****■ Обеспечение защиты от поражения электрическим током.**

Затем определяется ток короткого замыкания  $I_{sc}$  и проверяются тепловые и электродинамические характеристики цепей.

Эти расчеты могут указывать на необходимость увеличения сечения выбранных проводников.

Требуемые рабочие характеристики распределительных устройств определяют их тип.

Необходимо использовать метод каскадирования и селективную работу предохранителей и выключателей.

*J – Защита от перенапряжений в низковольтных сетях*

*K – Энергоэффективность распределительных электрических сетей*

*L - Компенсация реактивной мощности и фильтрация гармоник*

*M - Управление гармониками*

*N - Характеристики конкретных источников и нагрузок*

*P - Жилые и другие специальные объекты*

*Q - Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС)*

## Защита от перенапряжений

Прямые или не прямые разряды молнии могут повреждать электрооборудование на расстоянии до нескольких километров. Коммутационные перенапряжения и перенапряжения в переходном процессе и при промышленной частоте могут приводить к тем же последствиям. Последствия изучаются и решения предлагаются.

## Энергоэффективность распределительных электрических сетей

Внедрение измерительных приборов с соответствующей системой связи для электроустановок имеет большие преимущества для пользователя или владельца - пониженное энергопотребление, пониженная стоимость энергоресурсов и оптимальное использование электрооборудования.

## Реактивная энергия

Компенсация реактивной мощности электроустановок осуществляется на местном или централизованном уровне.

## Гармоники

Гармоники в сети влияют на качество энергии и являются источником многих нарушений, таких как перегрузки, вибрации, старение оборудования, отказы чувствительного оборудования, локальных и телефонных сетей. Данная глава посвящена источникам происхождения и влиянию гармоник, способам их измерения и решения этой проблемы.

## Источники питания и нагрузки

Рассматриваются особые случаи и оборудование:

- Специальные источники питания, такие как генераторы или инверторы.
- Нагрузки со специальными характеристиками, такие как асинхронные двигатели, осветительные цепи или распределительные трансформаторы.
- Специальные системы, такие как сети постоянного тока.

## Типовые области применения

Определенные помещения и объекты регулируются специальными нормами: общепринятым примером являются жилые объекты.

## Рекомендации по обеспечению ЭМС

Необходимо соблюдать определенные основные правила для обеспечения электромагнитной совместимости. Несоблюдение этих правил может иметь серьезные последствия для работы электроустановок: нарушение работы систем связи, срабатывание устройств защиты и даже отказ чувствительных устройств.

## Программное обеспечение Ecodial

Программное обеспечение Ecodial<sup>(1)</sup> предоставляет полный пакет для проектирования низковольтных установок в соответствии с нормами и рекомендациями МЭК.

Возможности программного обеспечения:

- Построение однолинейных схем
- Расчет токов КЗ
- Расчет потерь напряжения
- Оптимизация сечений кабелей
- Требуемые номинальные характеристики распределительных устройств и предохранителей
- Селективность устройств защиты
- Рекомендации по выбору защит с учетом принципа каскадирования
- Проверка систем защиты персонала
- Полная распечатка проектных данных

(1) Ecodial – это продукт компании Merlin Gerin; имеются французская и английская версии.

Проектирование и эксплуатация низковольтных установок регулируется рядом нормативных и справочных документов, которые могут быть классифицированы следующим образом:

- Законодательные нормы (постановления, заводские акты и т.д.)
- Нормы и правила, выпущенные профессиональными организациями; квалификационные требования
- Национальные и международные стандарты для установок
- Национальные и международные стандарты для изделий

## 2.1 Определение диапазонов напряжений

### Эталоны напряжений и рекомендации МЭК

3-фазн. 4-проводн. Ном. напряжение (В) 50 Гц	или 3-проводн. системы 60 Гц	1-фазн. 3-проводн. системы Ном. напряжение (В) 60 Гц
—	120/208	120/240
—	240	—
230/400 <sup>(1)</sup>	277/480	—
400/690 <sup>(1)</sup>	480	—
—	347/600	—
1000	600	—

(1) Номинальное напряжение существующих систем 220/380В и 240/415В должно изменяться к рекомендованному значению 230/400В. Переходный период должен быть как можно более коротким, и не позднее 2008 года. В течение этого периода, в качестве первого шага, органы по электроснабжению в странах с системами 220/380В должны довести напряжение до 230/400В +6 %, -10 %, а страны с системами 240/415В - до 230/400В +10 %, -6 %. В конце этого переходного периода должно быть достигнуто допустимое напряжение 230/400В ± 10%; после этого должен быть рассмотрен вопрос о снижении этого диапазона. Все вышеуказанное применяется для существующего напряжения 380/660В в отношении рекомендуемого значения 400/690В.

Рис. А1 : Стандартные напряжения между 100В и 1000В (МЭК 60038, Изд. 6.2 2002-07)

Макс. напряжение для оборудования, серия 1 (кВ)	Ном. напряжение системы (кВ)	Макс. напряжение для оборудования, серия 2 (кВ)	Ном. напряжение системы (кВ)
3.6 <sup>(1)</sup>	3.3 <sup>(1)</sup> 3 <sup>(1)</sup>	4.40 <sup>(1)</sup>	4.16 <sup>(1)</sup>
7.2 <sup>(1)</sup>	6.6 <sup>(1)</sup> 6 <sup>(1)</sup>	—	—
12	11 10	—	—
—	—	13.2 <sup>(2)</sup>	12.47 <sup>(2)</sup>
—	—	13.97 <sup>(2)</sup>	13.2 <sup>(2)</sup>
—	—	14.52 <sup>(1)</sup>	13.8 <sup>(1)</sup>
(17.5)	— (15)	—	—
24	22 20	—	—
—	—	26.4 <sup>(2)</sup>	24.94 <sup>(2)</sup>
36 <sup>(3)</sup>	33 <sup>(3)</sup> —	—	—
—	—	36.5	34.5
40.5 <sup>(3)</sup>	— 35 <sup>(3)</sup>	—	—

Как правило, эти системы являются трехпроводными, если не указывается иначе.

Значения указаны для междуфазных напряжений.

Значения, указанные в скобках, следует рассматривать как менее предпочтительные. Рекомендуется, чтобы эти значения не использовались для новых систем, строительство которых запланировано.

**Примечание 1:** Рекомендуется, чтобы в любой стране отношение между двумя смежными номинальными напряжениями составляло не менее двух.

**Примечание 2:** В нормальной системе серии 1 максимальное и минимальное напряжения не должны отклоняться более чем на ±10 % (прибл.) от номинального напряжения системы. В нормальной системе серии 2 максимальное напряжение не должно отклоняться более чем на +5 %, а минимальное напряжение более чем на -10 % от номинального напряжения системы.

(1) Эти значения не должны использоваться для распределительных систем общего пользования.

(2) Как правило, эти системы являются четырехпроводными.

(3) Рассматривается вопрос об унификации этих значений.

Рис. А2 : Стандартные напряжения свыше 1 кВ и не более 35 кВ (МЭК 60038, Изд. 6.2 2002-07)

## 2.2 Правила

В большинстве стран электроустановки должны соответствовать ряду норм, установленных национальными органами или общепризнанными частными организациями. Необходимо учитывать эти местные ограничения перед началом проектирования.

## 2.3 Нормы

Данное руководство основано на соответствующих нормах МЭК, в частности, МЭК 60364. Нормы МЭК 60364 разработаны квалифицированными врачами и инженерами всех стран мира на международном уровне. В настоящее время правила безопасности МЭК 60364 и 60479-1 составляют основу большинства электротехнических норм в мире (см. таблицу ниже и следующую страницу).

<b>МЭК 60038</b>	Стандартные напряжения
<b>МЭК 60076-2</b>	Силовые трансформаторы — повышение температуры
<b>МЭК 60076-3</b>	Силовые трансформаторы — уровни изоляции, испытания изоляции на пробой и внешние воздушные зазоры
<b>МЭК 60076-5</b>	Силовые трансформаторы — стойкость к короткому замыканию
<b>МЭК 60076-10</b>	Силовые трансформаторы — определение уровней среднего звукового давления
<b>МЭК 60146</b>	Полупроводниковые преобразователи — общие требования и преобразователи с синхронизацией от сети
<b>МЭК 60255</b>	Электрические реле
<b>МЭК 60265-1</b>	Высоковольтные переключатели — высоковольтные переключатели на номинальные напряжения более 1 кВ и менее 52 кВ
<b>МЭК 60269-1</b>	Плавкие предохранители низкого напряжения — общие требования
<b>МЭК 60269-2</b>	Плавкие предохранители низкого напряжения — дополнительные требования к предохранителям для малоквалифицированных пользователей (предохранители, в основном, для бытовых и аналогичных областей применения)
<b>МЭК 60282-1</b>	Плавкие предохранители высокого напряжения — токоограничивающие предохранители
<b>МЭК 60287-1-1</b>	Электрические кабели — расчет номинального тока — формулы расчета номинального тока (коэффициент нагрузки 100%) и расчет потерь — общие положения
<b>МЭК 60364</b>	Электроустановки зданий
<b>МЭК 60364-1</b>	Электроустановки зданий — основные принципы
<b>МЭК 60364-4-41</b>	Электроустановки зданий — обеспечение безопасности — защита от поражения электрическим током
<b>МЭК 60364-4-42</b>	Электроустановки зданий — обеспечение безопасности — защита от тепловых эффектов
<b>МЭК 60364-4-43</b>	Электроустановки зданий — обеспечение безопасности — защита от сверхтоков
<b>МЭК 60364-4-44</b>	Электроустановки зданий — обеспечение безопасности — защита от электромагнитных помех и резких отклонений напряжения
<b>МЭК 60364-5-51</b>	Электроустановки зданий — выбор и монтаж электрооборудования — общие правила
<b>МЭК 60364-5-52</b>	Электроустановки зданий — выбор и монтаж электрооборудования — системы соединений
<b>МЭК 60364-5-53</b>	Электроустановки зданий — выбор и монтаж электрооборудования — изоляция, коммутация и управление
<b>МЭК 60364-5-54</b>	Электроустановки зданий — выбор и монтаж электрооборудования — схемы заземления
<b>МЭК 60364-5-55</b>	Электроустановки зданий — выбор и монтаж электрооборудования — другое оборудование
<b>МЭК 60364-6-61</b>	Электроустановки зданий — вентиляция и испытания — первичная проверка
<b>МЭК 60364-7-701</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — помещения с ваннами или душами
<b>МЭК 60364-7-702</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — плавательные бассейны и другие водные объекты
<b>МЭК 60364-7-703</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — объекты с саунами
<b>МЭК 60364-7-704</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — строительство и демонтаж местных установок
<b>МЭК 60364-7-705</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — электроустановки сельскохозяйственных и садоводческих помещений
<b>МЭК 60364-7-706</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — объекты с проводящими полом, стенами и потолком
<b>МЭК 60364-7-707</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — требования к заземлению оборудования для обработки данных
<b>МЭК 60364-7-708</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — электроустановки стоянок для автоприцепов и домов-фургон
<b>МЭК 60364-7-709</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — морские вокзалы и прогулочные суда
<b>МЭК 60364-7-710</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — медицинские объекты
<b>МЭК 60364-7-711</b>	Электрооборудование зданий — требования к специальным установкам или объектам — выставки, витрины и стенды
<b>МЭК 60364-7-712</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — гелиофотоэлектрические системы (PV)
<b>МЭК 60364-7-713</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — инвентарь
<b>МЭК 60364-7-714</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — установки наружного освещения
<b>МЭК 60364-7-715</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — осветительные установки сверхнизкого напряжения
<b>МЭК 60364-7-717</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — передвижные или подвижные установки
<b>МЭК 60364-7-740</b>	Электроустановки зданий — требования к специальным установкам или объектам — временные электроустановки для сооружений, оборудования детских площадок увеселительных аттракционов и балаганов на ярмарках, в парках культуры и отдыха и цирках
<b>МЭК 60427</b>	Высоковольтные автоматические выключатели переменного тока.
<b>МЭК 60439-1</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства — прошедшие полные и частичные типовые испытания
<b>МЭК 60439-2</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства — специальные требования к системам сборных шин (шиннопроводам)
<b>МЭК 60439-3</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства — специальные требования к низковольтным комплектным устройствам, предназначенных для монтажа в местах, где малоквалифицированные пользователи имеют доступ к ним — распределительные устройства
<b>МЭК 60439-4</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства — специальные требования к устройствам для строительных объектов (ACS)
<b>МЭК 60446</b>	Основные принципы и правила безопасности для человеко-машинного интерфейса, маркировка и идентификация — цветовая или числовая маркировка проводников
<b>МЭК 60439-5</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства — специальные требования к устройствам, предназначенным для монтажа вне помещений в общественных местах - Распределительные кабельные шкафы (CDC)
<b>МЭК 60479-1</b>	Воздействие тока на людей и скот — общие аспекты
<b>МЭК 60479-2</b>	Воздействие тока на людей и скот — специальные аспекты
<b>МЭК 60479-3</b>	Воздействие тока на людей и скот — последствия прохождения тока через тело скота
<b>МЭК 60529</b>	Степень защиты, обеспечиваемой корпусами (нормы IP).
<b>МЭК 60644</b>	Спецификация высоковольтных плавких перемычек для цепей двигателей

(Продолжение на следующей странице)

<b>МЭК 60664</b>	Согласование изоляции для оборудования низковольтных систем
<b>МЭК 60715</b>	Размеры низковольтных комплектных распределительных устройств. Стандартный монтаж на направляющих для механического крепления электрических компонентов комплектных распределительных устройств
<b>МЭК 60724</b>	Предельные температуры короткого замыкания для электрических кабелей с номинальными напряжениями 1 кВ ( $U_m = 1,2$ кВ) и 3 кВ ( $U_m = 3,6$ кВ)
<b>МЭК 60755</b>	Общие требования к защитным устройствам, срабатывающим от тока утечки
<b>МЭК 60787</b>	Руководство по выбору плавких вставок предохранителей высокого напряжения для трансформаторов
<b>МЭК 60831</b>	Силовые шунтирующие конденсаторы самовосстанавливающегося типа для систем переменного тока с номинальным напряжением 1000 кВ включительно – общие положения – рабочие характеристики, испытание и номинальное напряжение – требования техники безопасности – руководство по монтажу и эксплуатации
<b>МЭК 60947-1</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства – общие правила
<b>МЭК 60947-2</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства – автоматические выключатели
<b>МЭК 60947-3</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства - выключатели, разъединители, выключатели-разъединители и предохранители
<b>МЭК 60947-4-1</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства - контакторы и пускатели двигателей – электромеханические контакторы и пускатели двигателей
<b>МЭК 60947-6-1</b>	Низковольтные комплектные распределительные устройства – многофункциональное оборудование – автоматические переключатели питания
<b>МЭК 61000</b>	Электромагнитная совместимость (ЕМС)
<b>МЭК 61140</b>	Защита от поражения электрическим током – общие аспекты для установок и оборудования
<b>МЭК 61557-1</b>	Электробезопасность низковольтных распределительных систем вплоть до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока – Оборудование для испытаний, измерений или контроля средств защиты – общие требования
<b>МЭК 61557-8</b>	Электробезопасность низковольтных распределительных систем вплоть до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока – Оборудование для испытаний, измерений или контроля средств защиты
<b>МЭК 61557-9</b>	Электробезопасность низковольтных распределительных систем вплоть до 1000 В переменного и 1500 В постоянного тока – оборудование для локализации повреждений изоляции в информационных системах
<b>МЭК 61558-2-6</b>	Безопасность силовых трансформаторов, блоков электропитания и аналогичного оборудования – специальные требования к изолирующим трансформаторам безопасности общего назначения
<b>МЭК 62271-1</b>	Общие технические требования к стандартам высоковольтных комплектных распределительных устройств
<b>МЭК 62271-100</b>	Высоковольтные комплектные распределительные устройства – высоковольтные автоматические выключатели переменного тока
<b>МЭК 62271-102</b>	Высоковольтные комплектные распределительные устройства – разъединители и заземляющие переключатели переменного тока
<b>МЭК 62271-105</b>	Высоковольтные комплектные распределительные устройства – плавкие предохранители-разъединители
<b>МЭК 62271-200</b>	Высоковольтные комплектные распределительные устройства –комплектные распределительные устройства переменного тока в металлической оболочке с номинальными напряжениями свыше 1 кВ вплоть до 52 кВ
<b>МЭК 62271-202</b>	Блочные подстанции высокого/низкого напряжения

(Окончание)

## 2.4 Качество и безопасность электроустановки

Качество и безопасность гарантируются только при соблюдении методик контроля качества и выполнении следующих условий:

- Первоначальная проверка соответствия электроустановки стандартам и нормам
- Электрооборудование установки соответствует действующим нормам и правилам
- Периодическая проверка установки, рекомендованная изготовителем оборудования

## 2.5 Пуско-наладочные испытания установки

Перед подключением электроустановки к питающей электросети, должны быть проведены строгие пуско-наладочные испытания и визуальный осмотр соответствующим органом или его уполномоченным агентом.

Такие испытания проводятся в соответствии с местными (государственными и/или отраслевыми) нормами, которые могут несколько различаться в зависимости от страны. Однако, принципы установления всех таких норм являются общими и основаны на соблюдении строгих правил техники безопасности при проектировании и внедрении установки.

Стандарт МЭК 60364-6-61 и сопутствующие нормы, включенные в данное руководство, основаны на международном признании таких испытаний, учитывающих все правила техники безопасности и принятые практики, требуемые в норме для жилых зданий и зданий делового и (в большинстве случаев) производственного назначения. Однако, многие отрасли имеют дополнительные требования, связанные с конкретной продукцией (нефть, уголь, природный газ и т.д.). Такие дополнительные требования выходят за рамки данного руководства.

Пуско-наладочные испытания и технический осмотр установок в зданиях включают, как правило, следующее:

- Проверка изоляции всех кабелей и проводников смонтированной установки между фазами и между фазами и землей.
- Проверка на отсутствие обрывов защитных, эквипотенциальных и заземляющих проводников и испытание на падение напряжений
- Измерение сопротивлений заземляющих устройств относительно земли
- Проверка работы блокировок (при наличии)
- Проверка допустимого числа штепсельных розеток на соответствие разрешенному количеству



- Проверка выбранного сечения всех проводников по условиям токов КЗ с учетом устройств защиты, материалов и монтажных условий (воздушная линия, кабельный канал и т.д.).
- Проверка заземления всех открытых и внешних металлических частей.
- Проверка допустимых расстояний в ванных комнатах и т.д.

Эти испытания и проверки являются основными (но не исчерпывающими) для большинства установок. Многие другие проверки и правила включаются в нормы для отдельных случаев, например: Установки со схемами заземления TN, TT или IT, установки с классом изоляции 2, цепи SELV и специальные объекты и т.д.

Цель данного руководства состоит в рассмотрении специальных характеристик установок разных типов, и указании основных правил, которые необходимо соблюдать для обеспечения удовлетворительного уровня качества, гарантирующего безопасную и безотказную работу. Методы, рекомендуемые в данном руководстве (с изменениями, необходимыми для учета всех возможных изменений, вводимых энергосистемой общего пользования), предназначены для удовлетворения всех требований пусконаладочных испытаний и проверок.

### 2.6 Периодические проверки установки

Во многих странах все электроустановки зданий производственного и административного назначения, включая общественные здания, подлежат периодической проверке контролирующей организацией.

Рисунок А3 показывает интервал проверки, обычно предписываемый в соответствии с типом установки.

Тип установки	Интервал проверок
<b>Установки с требованием по защите персонала</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Объекты с риском деградации, пожара или взрыва</li> <li>■ Временные установки на рабочих местах</li> <li>■ Объекты с низковольтными установками</li> <li>■ Объекты с ограниченной проводимостью, где используется передвижное оборудование</li> </ul>	Ежегодно
Другие случаи	Раз в 3 года
<b>Установки в общественных зданиях, где требуется защита от рисков пожара и паники</b>	Согласно типу организации и ее способности принимать людей
<b>Жилье</b>	Согласно местным нормам

**Рис. А3** : Периодичность проверок, обычно рекомендуемых для электроустановки.

Соответствие оборудования действующим нормам может быть подтверждено несколькими способами

### 2.7 Соответствие (нормам и спецификациям) оборудования установки

#### Подтверждение соответствия

Способы подтверждения соответствия оборудования действующим нормам:

- Официальный знак соответствия, выданный сертификационным органом, или
- Сертификат соответствия, выданный сертификационным органом, или
- Декларация соответствия от изготовителя

Как правило, первые два способа не применяются для высоковольтного оборудования.

#### Декларация соответствия

Если оборудование должно использоваться квалифицированными или подготовленными лицами, декларация соответствия от изготовителя, как правило, признается в качестве действительного подтверждения. В случае сомнений в компетентности изготовителя, к декларации изготовителя может прилагаться сертификат соответствия.

**Примечание: Маркировка CE**

Европейские директивы требуют от изготовителя или его полномочного представителя наносить маркировку CE под свою ответственность. Это означает, что:

- Изделие отвечает законодательным требованиям
- Изделие считается годным для продажи в Европе

Маркировка CE не является отметкой о происхождении и знаком соответствия нормам.

**Знак соответствия нормам**

Знаки соответствия нормам наносятся на приборы и оборудование, используемые, как правило, простыми неподготовленными людьми (например, на бытовых приборах). Знак соответствия нормам выдается сертификационным органом, если оборудование отвечает требованиям применяемого стандарта и проведена проверка системы управления качеством изготовителя.

**Сертификат качества**

Нормы определяют несколько методов обеспечения качества, которые соответствуют скорее разным ситуациям, а не разным уровням качества.

**Аттестация**

Лаборатория по испытанию образцов не может подтверждать соответствия всей партии изделий: для этого требуются типовые испытания. В некоторых испытаниях на соответствие нормам образцы подвергаются разрушению (например, испытания плавких предохранителей).

Только изготовитель может удостоверить, что готовые изделия на самом деле имеют указанные характеристики.

Аттестация качества служит для обеспечения исходной декларации или сертификата соответствия.

В качестве свидетельства принятия всех мер, необходимых для обеспечения качества продукции, изготовитель проводит сертификацию системы управления качеством, которая служит для контроля изготовления рассматриваемых изделий. Соответствующие сертификаты выдаются организациями, занимающимися контролем качества, и основаны на международном стандарте ISO 9001: 2000.

Такие стандарты определяют три модели обеспечения качества, которые соответствуют скорее разным ситуациям, а не разным уровням качества:

- Модель 3 определяет степень обеспечения качества путем инспекции и проверки готовой продукции.
- Модель 2 включает в дополнение к проверке конечной продукции проверку техпроцесса. Например, этот метод применяется для изготовителя плавких предохранителей, где рабочие характеристики не могут быть проверены без разрушения предохранителя.
- Модель 1 соответствует модели 2, но дополнительно требует тщательного анализа качества процесса проектирования, например, в случае, когда не предусматривается изготовление и испытание прототипа (случай специального изделия, изготавливаемого по спецификации заказчика).

**2.8 Окружающая среда**

Системы управления состоянием окружающей среды могут быть сертифицированы независимым органом, если они отвечают требованиям ISO 14001. Этот тип сертификации связан главным образом с производственными объектами, но может также распространяться на объекты, где разрабатываются изделия.

Проектирование изделий с учетом экологических требований («эко-проектирование») — это подход к обеспечению устойчивого развития с целью разработки изделий/услуг, оптимально отвечающих требованиям заказчиков при минимизации воздействия на окружающую среду за весь жизненный цикл изделий. Методологии, используемые для этой цели, ведут к выбору архитектуры оборудования вместе с компонентами и материалами с учетом влияния изделий на окружающую среду в течение их жизненного цикла (от добычи сырья до превращения в металлические отходы), т.е., производство, транспортировка, распределение, завершение срока службы и т.д.

В Европе опубликованы две директивы:

- Директива RoHS (ограничение опасных веществ), вступившая в силу в июле 2006 года (дата вступления в силу - 13-го февраля 2003 г., дата подачи заявки — 1-го июля 2006 г.), направлена на устранение из изделий шести опасных веществ: свинец, ртуть, кадмий, шестивалентный хром, полибромдефинилы (PBB) или полибромдефинилэфиры (PBDE).

■ Директива WEEE (отходы электрического и электронного оборудования), вступившая в силу в августе 2005 года (дата вступления в силу – 13-го февраля 2003 года, дата подачи заявки - 13-го августа 2005 года) с целью регулирования срока службы и утилизации бытового и промышленного оборудования.

В других странах мира новое законодательство будет преследовать те же цели.

Кроме поддержки эко-проектирования изготовителями, может быть значительно повышен вклад всей электроустановки в экологию посредством оптимизации проектирования установки. Фактически, показано, что оптимизированное проектирование установки с учетом режимов работы, схемы расположения подстанций высокого/низкого напряжения и распределительной системы (распределительные устройства, шинопроводы, кабели) может значительно снизить воздействие на окружающую среду (истощение запасов сырья и энергоресурсов, срок службы).

В главе D описано расположение подстанции и главного распределительного щита.

## 3 Установленная мощность потребителя - характеристики

Определение расчетной полной мощности, потребляемой разными нагрузками: необходимый предварительный этап проектирования низковольтной установки

Номинальная мощность (кВт,  $P_n$ ) двигателя указывает его номинальную эквивалентную механическую выходную мощность

Полная мощность (кВА,  $P_a$ ), подаваемая на двигатель, зависит от полной мощности, КПД двигателя и коэффициента мощности

$$P_a = \frac{P_n}{\eta \cos \varphi}$$

Определение расчетных значений полной мощности, требуемой каждым потребителем, позволяет установить следующее:

- Заявляемое потребление мощности, которое определяет договор на поставку энергии.
- Номинальная мощность трансформатора высокого/низкого напряжения (с учетом ожидаемого роста нагрузки)
- Уровни тока нагрузки для каждого распределительного устройства.

### 3.1 Асинхронные двигатели

#### Потребление тока

Полный ток нагрузки  $I_a$ , подаваемый на двигатель, рассчитывается по следующим формулам:

- 3-фазный двигатель:  $I_a = P_n \times 1,000 / (\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos \varphi)$
- 1-фазный двигатель:  $I_a = P_n \times 1,000 / (U \times \eta \times \cos \varphi)$

где

$I_a$ : полный ток (А)

$P_n$ : номинальная мощность (кВт)

$U$ : междуфазное напряжение для 3-фазного двигателя и напряжение между зажимами для 1-фазного двигателя (В). 1-фазные двигатели могут подсоединяться на фазное или линейное напряжение,

$\eta$ : КПД, т.е., выходная мощность (кВт)/ входная мощность (кВт),

$\cos \varphi$ : коэффициент мощности, т.е., входная мощность (кВт)/выходная мощность (кВА)

#### Сверхпереходный ток и уставка защиты

- Пиковое значение сверхпереходного тока может быть крайне высоким; обычно, это значение в 12-15 раз превышает среднеквадратическое номинальное значение  $I_{nm}$ . Иногда это значение может в 25 раз превышать значение  $I_{nm}$ .
- Выключатели Merlin Gerin, контакторы Telemecanique и термореле рассчитываются на пуски двигателей при крайне высоких сверхпереходных токах (сверхпереходное пиковое значение может в 19 раз превышать среднеквадратическое номинальное значение  $I_{nm}$ ).
- При внезапных срабатываниях защиты от сверхтоков при пуске это означает выход пускового тока за нормальные пределы. В результате могут достигаться предельные значения параметров распределительных устройств, срок службы может укорачиваться и даже некоторые устройства могут выходить из строя. Во избежание такой ситуации необходимо рассмотреть вопрос о повышении номинальных параметров распределительных устройств.
- Распределительные устройства Merlin Gerin и Telemecanique рассчитываются на обеспечение защиты пускателей двигателей от КЗ. В зависимости от риска, таблицы показывают комбинации выключателя, контактора и термореле для обеспечения координации типа 1 или типа 2.

#### Пусковой ток двигателя

Хотя рынок предлагает двигатели с высоким КПД, на практике их пусковые токи приблизительно такие же, как у стандартных двигателей.

Применение пускателей с соединением треугольником, статических устройств для плавного пуска или регулируемых приводов позволяет снизить значение пускового тока (например: 4  $I_a$  вместо 7,5  $I_a$ ).

#### Компенсация реактивной мощности (квар), подаваемой на асинхронные двигатели

Как правило, по техническим и финансовым соображениям выгоднее снижать ток, подаваемый на асинхронные двигатели. Это может обеспечиваться за счет применения конденсаторов, без влияния на выходную мощность двигателей.

Применение этого принципа для оптимизации работы асинхронных двигателей называется «повышением коэффициента мощности» или «компенсацией реактивной мощности».

Как обсуждается в Главе L, полная мощность (кВА), подаваемая на двигатель, может значительно снижаться путем использования параллельно подключенных конденсаторов.. Снижение входной полной мощности означает соответствующее снижение входного тока (так как напряжение остается постоянным).

Компенсация реактивной мощности особенно рекомендуется для двигателей с длительными периодами работы при пониженной мощности.

Как указывается выше,

$$\cos \varphi = \frac{\text{kW input}}{\text{kVA input}}$$

Поэтому, снижение входной полной мощности (кВА) приводит к увеличению (т.е., улучшению) значения  $\cos \varphi$ .

### 3 Установленная мощность потребителя - характеристики

A11

Ток, подаваемый на двигатель, после компенсации реактивной мощности рассчитывается по формуле:

$$I = I_a \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'}$$

где:  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности до компенсации,  $\cos \varphi'$  – коэффициент мощности после компенсации,  $I_a$  – исходный ток.

**Рис. А4** ниже показывает (в зависимости от номинальной мощности двигателя) стандартные значения тока для нескольких напряжений питания.

кВт	л.с.	230 В	380 - 415 В	400 В	440 - 480 В	500 В	690 В
		A	A	A	A	A	A
0.18	-	1.0	-	0.6	-	0.48	0.35
0.25	-	1.5	-	0.85	-	0.68	0.49
0.37	-	1.9	-	1.1	-	0.88	0.64
-	1/2	-	1.3	-	1.1	-	-
0.55	-	2.6	-	1.5	-	1.2	0.87
-	3/4	-	1.8	-	1.6	-	-
-	1	-	2.3	-	2.1	-	-
0.75	-	3.3	-	1.9	-	1.5	1.1
1.1	-	4.7	-	2.7	-	2.2	1.6
-	1-1/2	-	3.3	-	3.0	-	-
-	2	-	4.3	-	3.4	-	-
1.5	-	6.3	-	3.6	-	2.9	2.1
2.2	-	8.5	-	4.9	-	3.9	2.8
-	3	-	6.1	-	4.8	-	-
3.0	-	11.3	-	6.5	-	5.2	3.8
3.7	-	-	-	-	-	-	-
4	-	15	9.7	8.5	7.6	6.8	4.9
5.5	-	20	-	11.5	-	9.2	6.7
-	7-1/2	-	14.0	-	11.0	-	-
-	10	-	18.0	-	14.0	-	-
7.5	-	27	-	15.5	-	12.4	8.9
11	-	38.0	-	22.0	-	17.6	12.8
-	15	-	27.0	-	21.0	-	-
-	20	-	34.0	-	27.0	-	-
15	-	51	-	29	-	23	17
18.5	-	61	-	35	-	28	21
-	25	-	44	-	34	-	-
22	-	72	-	41	-	33	24
-	30	-	51	-	40	-	-
-	40	-	66	-	52	-	-
30	-	96	-	55	-	44	32
37	-	115	-	66	-	53	39
-	50	-	83	-	65	-	-
-	60	-	103	-	77	-	-
45	-	140	-	80	-	64	47
55	-	169	-	97	-	78	57
-	75	-	128	-	96	-	-
-	100	-	165	-	124	-	-
75	-	230	-	132	-	106	77
90	-	278	-	160	-	128	93
-	125	-	208	-	156	-	-
110	-	340	-	195	-	156	113
-	150	-	240	-	180	-	-
132	-	400	-	230	-	184	134
-	200	-	320	-	240	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-
160	-	487	-	280	-	224	162
185	-	-	-	-	-	-	-
-	250	-	403	-	302	-	-
200	-	609	-	350	-	280	203
220	-	-	-	-	-	-	-
-	300	-	482	-	361	-	-
250	-	748	-	430	-	344	250
280	-	-	-	-	-	-	-
-	350	-	560	-	414	-	-
-	400	-	636	-	474	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-

**Рис. А4** : Номинальная мощность и токи (продолжение на следующей странице)

кВт	л.с.	230 В	380 - 415 В	400 В	440 - 480 В	500 В	690 В
		А	А	А	А	А	А
315	-	940	-	540	-	432	313
-	540	-	-	-	515	-	-
335	-	-	-	-	-	-	-
355	-	1061	-	610	-	488	354
-	500	-	786	-	590	-	-
375	-	-	-	-	-	-	-
400	-	1200	-	690	-	552	400
425	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-	-
475	-	-	-	-	-	-	-
500	-	1478	-	850	-	680	493
530	-	-	-	-	-	-	-
560	-	1652	-	950	-	760	551
600	-	-	-	-	-	-	-
630	-	1844	-	1060	-	848	615
670	-	-	-	-	-	-	-
710	-	2070	-	1190	-	952	690
750	-	-	-	-	-	-	-
800	-	2340	-	1346	-	1076	780
850	-	-	-	-	-	-	-
900	-	2640	-	1518	-	1214	880
950	-	-	-	-	-	-	-
1000	-	2910	-	1673	-	1339	970

Рис. А4 : Номинальная мощность и токи (окончание)

## 3.2 Резистивные нагревательные приборы и лампы накаливания (традиционные и галогенные)

Потребление тока нагревательным прибором или лампой накаливания легко выводится из номинальной мощности  $P_n$ , указанной изготовителем (т.е.,  $\cos \varphi = 1$ ) (см. Рис. А5).

Ном. мощность (кВт)	Потребление тока (А)			
	1-ф. 127 В	1-ф. 230 В	3-ф. 230 В	3-ф. 400 В
0.1	0.79	0.43	0.25	0.14
0.2	1.58	0.87	0.50	0.29
0.5	3.94	2.17	1.26	0.72
1	7.9	4.35	2.51	1.44
1.5	11.8	6.52	3.77	2.17
2	15.8	8.70	5.02	2.89
2.5	19.7	10.9	6.28	3.61
3	23.6	13	7.53	4.33
3.5	27.6	15.2	8.72	5.05
4	31.5	17.4	10	5.77
4.5	35.4	19.6	11.3	6.5
5	39.4	21.7	12.6	7.22
6	47.2	26.1	15.1	8.66
7	55.1	30.4	17.6	10.1
8	63	34.8	20.1	11.5
9	71	39.1	22.6	13
10	79	43.5	25.1	14.4

Рис. А5 : Потребление тока резистивными нагревательными приборами и лампами накаливания (традиционными или галогенными)

Токи рассчитываются следующим образом:

■ 3-ф. случай:  $I_a = \frac{P_n^{(1)}}{\sqrt{3} U}$

■ 1-ф. случай:  $I_a = \frac{P_n^{(1)}}{U}$

где:  $U$  — напряжение между зажимами оборудования.

Для лампы накаливания, применение инертного газа обеспечивает источник более направленного света. Светоотдача повышается, а срок службы лампы удваивается.

**Примечание:** При включении лампы холодная нить накала приводит к повышению тока, хотя и кратковременного, но интенсивного.

## Люминесцентные лампы и сопутствующее оборудование

Мощность  $P_n$  (Вт), указанная на трубке люминесцентной лампы, не включает мощность, рассеиваемую в дросселе стартера.

Ток рассчитывается следующим образом:

$$I_a = \frac{P_{\text{балласт}} + P_n}{U \cos \varphi}$$

Где  $U$  = напряжение, подаваемое на лампу в комплекте с сопутствующим оборудованием.

Если на дросселе не указывается значение потерь мощности, можно использовать значение 25%  $P_n$ .

## Стандартные люминесцентные лампы

При (если не указывается иначе):

■  $\cos \varphi = 0,6$  без конденсатора для компенсации коэффициента мощности (PF) <sup>(2)</sup>

■  $\cos \varphi = 0,86$  с компенсацией PF <sup>(2)</sup> (однотрубные или двухтрубные)

■  $\cos \varphi = 0,96$  для электронного дросселя.

Если на дросселе не указывается значение потерь мощности, можно использовать значение 25%  $P_n$ .

**Рис. А6** показывает эти значения для различных типов дросселей.

Схема расположения ламп, стартеров и дросселей	Мощность трубки (Вт) <sup>(3)</sup>	Ток (А) при 230 В			Длина трубки (см)
		Магнитный дроссель		Электрон. дроссель	
		Без конденсатора компенсации PF	С конденсатором компенсации PF		
Однотрубные	18	0.20	0.14	0.10	60
	36	0.33	0.23	0.18	120
	58	0.50	0.36	0.28	150
Двухтрубные	2 x 18		0.28	0.18	60
	2 x 36		0.46	0.35	120
	2 x 58		0.72	0.52	150

(3) Мощность в Вт, указанная на трубке

**Рис. А6** : Потребление тока и мощности для люминесцентных ламп общепринятых размеров (при 230 В – 50 Гц)

## Компактные люминесцентные лампы

Компактные люминесцентные лампы имеют такие же характеристики по экономии и сроку службы, как и традиционные лампы. Они широко используются в общественных местах с постоянным освещением (например: коридоры, холлы, бары и т.д.) и могут устанавливаться в ситуациях, в которых используются лампы накаливания (см. **Рис. А7** на следующей странице).

(1)  $I_a$  в амперах;  $U$  в вольтах.  $P_n$  в ваттах. Если  $P_n$  в кВт, умножить уравнение на 1000

(2) В терминологии газоразрядных ламп вместо термина «коррекция коэффициента мощности» часто используется термин «компенсация».

$\cos \varphi$  приблизительно равен 0,95 (нулевые значения  $V$  и  $I$  почти совпадают по фазе), но коэффициент мощности равен 0,5 из-за импульсной формы тока, пик которого возникает "позже" в каждом полупериоде.

### 3 Установленная мощность потребителя - характеристики

Тип лампы	Мощность лампы (Вт)	Ток при 230 В (А)
Отдельная лампа	10	0.080
	18	0.110
с дросселем	26	0.150
Встроенная лампа	8	0.075
	11	0.095
с дросселем	16	0.125
	21	0.170

Рис. А7 : Потребление тока и мощности для компактных люминесцентных ламп (при 230 В – 50 Гц)

Мощность (Вт), указанная на трубке разрядной лампы, не включает мощность, рассеиваемую в балластном сопротивлении.

#### Газоразрядные лампы

Рис. А8 показывает ток, принимаемый всем устройством, включая все сопутствующее вспомогательное оборудование.

Эти лампы основаны на световом электрическом разряде через газ или пар металлического соединения, которое заключено в герметичную прозрачную оболочку при заданном давлении. Эти лампы имеют большое время пуска, в течение которого ток Iа больше номинального тока Iп. Потребление мощности и тока приводится для разных типов ламп (типовые средние значения могут слегка отличаться в зависимости от изготовителя).

Ном. мощность лампы (Вт)	Потребление мощности (Вт) при 230 В 400 В	Ток n(A)		Пуск. ток		Светоотдача (лм/Вт)	Средний ресурс лампы (ч)	Применение
		Без компен-сации PF 230 В 400 В	С компен-сацией PF 230 В 400 В	а/п	Период (мин)			
Натриевые лампы высокого давления								
50	60	0.76	0.3	1.4 - 1.6	4 - 6	80 - 120	9000	■ Освещение больших залов ■ Открытые пространства ■ Общественные места
70	80	1	0.45					
100	115	1.2	0.65					
150	168	1.8	0.85					
250	274	3	1.4					
400	431	4.4	2.2					
1000	1055	10.45	4.9					
Натриевые лампы низкого давления								
26	34.5	0.45	0.17	1.1 - 1.3	7 - 15	100 - 200	8000 - 12000	■ Освещение автострад ■ Охранное освещение, станция ■ Площадки, склады
36	46.5		0.22					
66	80.5		0.39					
91	105.5		0.49					
131	154		0.69					
Ртутные + металлогалогеновые лампы (также называемые лампами с иодидами металлов)								
70	80.5	1	0.40	1.7	3 - 5	70 - 90	6000 6000 6000 6000 2000	■ Освещение очень больших объектов прожекторами (например: спорт. стадионы и т.д.)
150	172	1.80	0.88					
250	276	2.10	1.35					
400	425	3.40	2.15					
1000	1046	8.25	5.30					
2000	2092 2052	16.50 8.60	10.50 6					
Ртутные + люминесцентные лампы								
50	57	0.6	0.30	1.7 - 2	3 - 6	40 - 60	8000 - 12000	■ Цеха с очень высокими потолками (залы, ангары) ■ Наружное освещение ■ Низкая светоотдача <sup>(1)</sup>
80	90	0.8	0.45					
125	141	1.15	0.70					
250	268	2.15	1.35					
400	421	3.25	2.15					
700	731	5.4	3.85					
1000	1046	8.25	5.30					
2000	2140 2080	15	11 6.1					
(1) Заменяются натриевыми лампами.								

(1) Заменяются натриевыми лампами.

**Примечание:** Эти лампы чувствительны к падениям напряжения. Они гаснут при снижении напряжения ниже 50% номинального значения и загораются вновь после охлаждения в течение около 4 минут.

**Примечание:** Натриевые лампы низкого давления имеют светоотдачу выше, чем у всех других источников. Однако, применение этих ламп ограничивается тем фактом, что желто-оранжевое излучение делает практически невозможным распознавание цветов.

Рис. А8 : Потребление тока для разрядных ламп



Чтобы спроектировать электроустановку, необходимо оценить максимальную мощность, которая будет потребляться из питающей электросети.

Проектирование на основе простой арифметической суммы мощностей всех потребителей, подключенных к электроустановке, представляет собой крайне неэкономичный подход и недобросовестную инженерную практику.

Цель данной главы состоит в демонстрации способов оценки определенных факторов с учетом разновременности (работы всех устройств данной группы) и коэффициента использования (например, электродвигатель не работает, как правило, при своей полной мощности и т.д.) всех действующих и предполагаемых нагрузок. Приводимые значения основаны на опыте и зарегистрированных результатах работы действующих установок. Кроме обеспечения основных проектных данных по отдельным цепям установки, в результате получают общие значения всей установки, на основе которой могут определяться требования к системе питания (распределительная сеть, трансформатор высокого/низкого напряжения или генератор).

#### 4.1 Установленная мощность (кВт)

*Установленная мощность есть сумма номинальных мощностей всех устройств-потребителей мощности в установке.*

*Это не есть мощность, которая будет потребляться фактически.*

Большинство электроприемников(ЭП) имеет маркировку своей номинальной мощности ( $P_n$ ).

Установленная мощность есть сумма номинальных мощностей всех ЭП в электроустановке. Это не есть та мощность, которая будет потребляться фактически. В случае электродвигателей номинальная мощность является мощностью на его валу. Очевидно, что потребляемая из сети мощность будет больше.

Люминесцентные и разрядные лампы, со стабилизирующими балластными сопротивлениями (дресселями), являются другими примерами, когда номинальная мощность, указанная на лампе, меньше мощности, потребляемой лампой и ее балластным сопротивлением (дресселем).

Методы оценки фактического потребления мощности двигателями и осветительными приборами приводятся в Разделе 3 данной главы.

Потребление мощности (кВт) необходимо знать для выбора номинальной мощности генератора или батареи, а также в случае учета требований к первичному двигателю.

Для подачи мощности от низковольтной системы электроснабжения или через трансформатор высокого/низкого напряжения, определяющей величиной является полная мощность в кВА.

#### 4.2 Установленная полная мощность (кВА)

*Установленная полная мощность обычно полагается равной арифметической сумме полных мощностей отдельных ЭП. Однако, максимальная расчетная полная мощность, не равна общей установленной полной мощности.*

Установленная полная мощность обычно полагается равной арифметической сумме полных мощностей отдельных ЭП. Однако, максимальная потребляемая мощность, которая должна подаваться, не равна общей установленной полной мощности.

Потребление полной мощности нагрузкой (которая может являться одним устройством) рассчитывается на основе ее номинальной мощности (при необходимости, с поправкой, как указывается выше для двигателей и т.д.) с использованием следующих коэффициентов:

$\eta$  = КПД = выходная мощность / входная мощность

$\cos \varphi$  = коэффициент мощности = кВт / кВА

Полная (кажущаяся) мощность, потребляемая электроприемником:

$P_a = P_n / (\eta \times \cos \varphi)$

Из этого значения выводится полный ток  $I_a$  (А)<sup>(1)</sup>, потребляемый ЭП:

$$\blacksquare I_a = \frac{P_a \times 10^3}{V}$$

для одного ЭП с подсоединением между фазой и нейтралью.

$$\blacksquare I_a = \frac{P_a \times 10^3}{\sqrt{3} \times U}$$

для 3-фазной симметричной нагрузки:

$V$  = фазное напряжение (В)

$U$  = линейное напряжение (В)

Следует отметить, что, строго говоря, полная мощность не является арифметической суммой расчетных номинальных значений полной мощности отдельных потребителей (если потребители имеют разный коэффициент мощности).

Однако, общепринято делать простое арифметическое суммирование, результат которого дает значение кВА, которое превышает действительное значение на допустимый «расчетный запас».

Когда неизвестны некоторые или все нагрузочные характеристики, значения, приводимые на **Рис. А9** на следующей странице, могут использоваться для получения приблизительной оценки потребления полной мощности в ВА (как правило, отдельные нагрузки слишком малы, чтобы выражаться в кВА или кВт).

Оценки удельной плотности осветительных нагрузок основаны на общей площади 500 м<sup>2</sup>.

(1) Чтобы повысить точность, необходимо учитывать коэффициент максимального использования, как разъясняется ниже в п.4.3.

Люминесцентное освещение (с поправкой cos φ = 0.86)		
Тип применения	Оценка (ВА/м²) Люминесцентная лампа с промыш. отражат. <sup>(1)</sup>	Средний уровень освещения (люкс = лм/м²)
Дороги и автострасы склады, работа с перерывами	7	150
Тяжелые режимы: изготовление и сборка больших заготовок	14	300
Повседневная работа: офис	24	500
Точные работы: КБ, высокоточные сборочные цеха	41	800
Силовые цепи		
Тип применения	Оценка (ВА/м²)	
Насосные, сжатый воздух	3 - 6	
Вентиляция помещений	23	
Эл. конвекционные подогреватели: частные дома, квартиры	115 - 146 90	
Офисы	25	
Диспетчерские пункты	50	
Сборочный цех	70	
Механический цех	300	
Окрасочный цех	350	
Установка для термообработки	700	
(1) пример: лампа 65 Вт (исключая балластное сопротивление), 5100 люмен (лм), светоотдача лампы = 78,5 лм / Вт.		

Рис. А9 : Оценка установленной полной мощности

### 4.3 Оценка максимальной нагрузки (кВА)

Все отдельные ЭП не обязательно работают при полной номинальной мощности и одновременно. Коэффициенты  $k_u$  и  $k_s$  позволяют определить максимальную полную мощность электроустановки.

#### Коэффициент максимального использования ( $k_u$ )

В нормальных режимах работы потребление мощности обычно меньше номинальной мощности. Это довольно частое явление, которое оправдывает применение коэффициента использования ( $k_u$ ) при оценке реальных значений.

Этот коэффициент должен применяться для каждого ЭП, особенно для электродвигателей, которые крайне редко работают при полной нагрузке.

В промышленной установке этот коэффициент может оцениваться по среднему значению 0,75 для двигателей.

Для освещения лампами накаливания этот коэффициент всегда равен 1.

Для цепей со штепсельными розетками этот коэффициент полностью зависит от типа приборов, питаемых от штепсельных розеток.

#### Коэффициент одновременности ( $k_s$ )

Практически одновременная работа всех установленных ЭП определенной установки никогда не происходит, т.е., всегда существует некоторая степень разновременности и этот факт учитывается при расчете путем применения коэффициента одновременности ( $k_s$ ).

Коэффициент  $k_s$  применяется для каждой группы ЭП (например, запитываемых от главного или вторичного распределительного устройства). Определение этих коэффициентов входит в ответственность конструктора, поскольку требует детального знания установки и условий работы отдельных цепей. По этой причине невозможно дать точные значения для общего применения.

#### Коэффициент одновременности для жилой застройки

Некоторые типовые значения для этого случая приводятся на Рис. А10 на следующей странице, и применяются для бытовых потребителей с питанием 230/400 В (3-фазная 4-проводная сеть). В случае потребителей, использующих электрические обогреватели для отопления, рекомендуется коэффициент 0,8, независимо от числа электроприемников (ЭП).

Число ЭП	Коэффициент одновременности (ks)
2 - 4	1
5 - 9	0.78
10 - 14	0.63
15 - 19	0.53
20 - 24	0.49
25 - 29	0.46
30 - 34	0.44
35 - 39	0.42
40 - 49	0.41
50 и более	0.40

**Рис. А10** : Значения коэффициента одновременности для жилой застройки

**Пример (см. Рис. А11):**

5-тиэтажное жилое здание с 25 потребителями с установленной мощностью 6кВА для каждого.

Общая установленная мощность для здания:  $36 + 24 + 30 + 36 + 24 = 150$  кВА

Полная мощность, потребляемая зданием:  $150 \times 0,46 = 69$  кВА

С помощью Рис. А10 можно определить величину тока в разных секциях общей питающей магистрали всех этажей. Для стояков, запитываемых на уровне первого этажа, площадь поперечного сечения проводников может постепенно снижаться от нижних к верхним этажам.

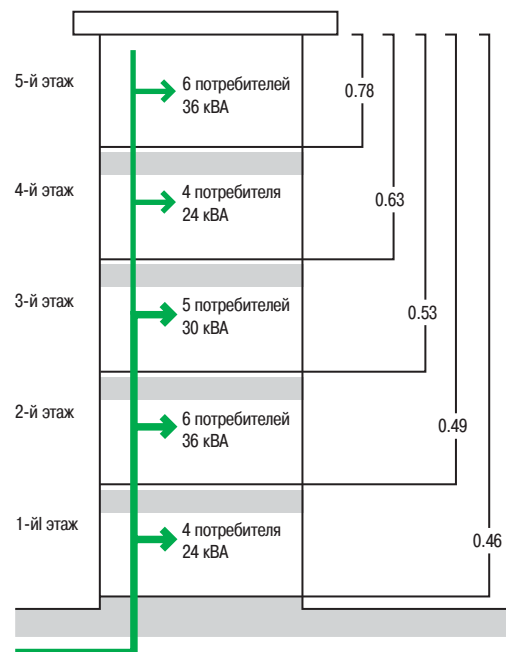
Как правило, такие изменения сечения проводника производятся с минимальным интервалом в 3 этажа.

В этом примере, ток, поступающий на стояк на уровне первого этажа, равен:

$$\frac{150 \times 0.46 \times 10^3}{400 \sqrt{3}} = 100 \text{ A}$$

ток, поступающий на 4-й этаж, равен:

$$\frac{(36 + 24) \times 0.63 \times 10^3}{400 \sqrt{3}} = 55 \text{ A}$$



**Рис. А11** : Применение коэффициента одновременности (ks) для жилого 5-этажного здания

Коэффициент одновременности для распределительных устройств

Рис. А12 показывает теоретические значения ks для распределительного устройства, запитывающего ряд цепей, для которых отсутствует схема распределения нагрузки между ними. Если цепи служат в основном для осветительных нагрузок, целесообразно принять значения ks, близкие к единице.

Число цепей	Коэффициент одновременности (ks)
Информация имеется, 2 и 3	0.9
4 и 5	0.8
6 - 9	0.7
10 и более	0.6
Информации нет	1.0

Рис. А12 : Коэффициент одновременности для распределительных устройств (МЭК 60439)

Коэффициент одновременности в зависимости от назначения цепи

Значения коэффициента ks, которые могут использоваться для цепей, питающих стандартные нагрузки, приводятся на Рис. А13.

Назначение цепи	Коэффициент одновремен. (ks)
Освещение	1
Отопление и кондиционирование воздуха	1
Штепсельные розетки	0.1 - 0.2 <sup>(1)</sup>
<sup>(2)</sup>	
■ Для самых мощных двигателей	1
■ Для двигателей средней мощности	0.75
■ Для остальных двигателей	0.60

(1) В определенных случаях, в частности, для промышленных установок, этот коэффициент может быть выше.  
(2) Учитываемый ток равен номинальному току двигателя, увеличенному на треть его пускового тока.

Рис. А13 : Коэффициент одновременности в зависимости от назначения цепи

4.4 Пример применения коэффициентов ku и ks

Пример оценки максимальных мощностей (кВА), потребляемых на всех уровнях электроустановки приводится на Рис. А14 (следующая страница).  
В этом примере, общая установленная полная мощность составляет 126,6 кВА, что соответствует расчетной максимальной мощности на низковольтных зажимах трансформатора высокого/низкого напряжения, величиной 65 кВА.  
**Примечание:** при выборе сечений кабелей для распределительных цепей установки, ток I (А) через цепь определяется по следующей формуле:

$$I = \frac{S \times 10^3}{U \sqrt{3}}$$

где: S, кВА — значение максимальной 3-фазной полной мощности цепи,  
U — междуфазное (линейное) напряжение (В).

4.5 Коэффициент разновременности

Коэффициент разновременности, как определяется в нормах МЭК, эквивалентен коэффициенту одновременности (ks), используемому в данном руководстве (см. п.4.3). Однако, в некоторых англоязычных странах (на время выпуска руководства) коэффициент разновременности является величиной, обратной коэффициенту ks, т.е. он ≥ 1.

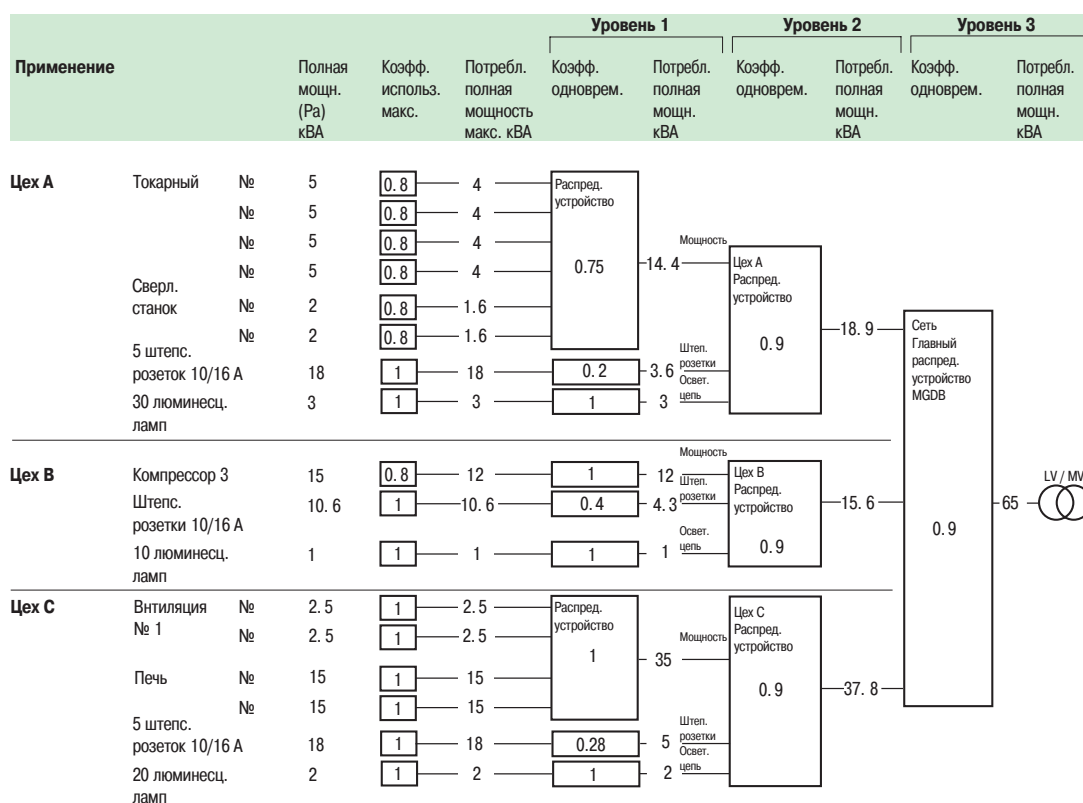


Рис. А14 : Пример оценки максимальной ожидаемой мощности установки (используемые значения коэффициента служат только в справочных целях)

## 4.6 Выбор номинальной мощности трансформатора

Когда электроустановка питается непосредственно от трансформатора высокого/низкого напряжения и определена максимальная полная мощность установки, необходимо определить соответствующую номинальную мощность трансформатора с учетом следующих факторов (см. Рис. А15):

- Возможность повышения коэффициента мощности установки (см. Главу L)
- Ожидаемые расширения установки
- Ограничения по эксплуатации установки (например, температура)
- Стандартные номинальные параметры установки

Полная мощность кВА	In (A)	
	237 В	410 В
100	244	141
160	390	225
250	609	352
315	767	444
400	974	563
500	1218	704
630	1535	887
800	1949	1127
1000	2436	1408
1250	3045	1760
1600	3898	2253
2000	4872	2816
2500	6090	3520
3150	7673	4436

Рис. А15 : Стандартные полные мощности трансформаторов среднего/низкого напряжения и соответствующие номинальные токи

Номинальный полный ток нагрузки  $I_n$  на стороне низкого напряжения 3-фазного трансформатора рассчитывается по следующей формуле:

$$I_n = \frac{P_a \times 10^3}{U \sqrt{3}}$$

где:

- $P_a$  = номинальная полная мощность (кВА) трансформатора
- $U$  = междуфазное напряжение холостого хода (237 В или 410 В)
- $I_n$  в амперах.

Для 1-фазного трансформатора:

$$I_n = \frac{P_a \times 10^3}{V}$$

где:

- $V$  = фазное напряжение холостого хода (В)

Упрощенная формула для 400 В (3-фазная нагрузка)

- $I_n = \text{kVA} \times 1.4$

Стандарт МЭК для силовых трансформаторов - МЭК 60076.

## 4.7 Выбор источников питания

Важность поддержания бесперебойного электропитания ставит вопрос об использовании резервной силовой установки. Выбор характеристик таких альтернативных источников питания является частью выбора архитектуры, как описывается в Главе D.

Для основного источника питания выбор делается, как правило, между подсоединением к сети электроснабжения высокого или низкого напряжения.

На практике подсоединение к источнику высокого напряжения может быть необходимо, когда нагрузки превышают (или запланировано их превышение) определенный уровень — как правило, порядка 250 кВА, или если качество электроснабжения требуется выше обеспечиваемого низковольтной сетью.

Более того, если установка может вызывать нарушение питания соседних потребителей при подсоединении к низковольтной сети, органы, регулирующие электроснабжение, могут предложить использование сети высокого напряжения.

Питание потребителя по сети высокого напряжения имеет определенные преимущества: фактически, потребитель:

- не зависит от других потребителей. В случае низковольтного питания другие потребители могут нарушать его работу
- может выбрать любой тип системы заземления низкого напряжения
- имеет более широкий выбор тарифов
- Имеет возможность значительно повышать нагрузку.

Однако, следует отметить, что:

- Потребитель является собственником подстанции высокого/низкого напряжения и в некоторых странах он должен строить и оснащать такую подстанцию за свой счет. При определенных обстоятельствах энергоснабжающая организация может участвовать в инвестициях, например, на уровне линии высокого напряжения.

■ Например, часть затрат на подсоединение может возмещаться, если второй потребитель подсоединяется к линии высокого напряжения в течение определенного времени после подсоединения первого потребителя.

■ Потребитель имеет доступ только к низковольтной части установки; доступ к части высокого напряжения резервируется для персонала энергоснабжающей организации (снятие показаний счетчиков, работы по обслуживанию и т.д.)

Однако, в некоторых странах защитный выключатель высокого напряжения (или выключатель нагрузки с предохранителем) может использоваться непосредственно потребителем.

- Тип и местоположение подстанции согласовываются между потребителем и энергоснабжающей организацией.

## Глава В

# Подключение к распределительной сети высокого напряжения

**B1**

	Содержание	
<b>1</b>	<b>Электроснабжение при высоком напряжении</b>	<b>B2</b>
	1.1 Характеристики высоковольтной сети системы электроснабжения	B2
	1.2 Различные способы подключения ВВ электроснабжения	B11
	1.3 Некоторые эксплуатационные аспекты распределительных сетей ВН	B12
<b>2</b>	<b>Процедура создания новой подстанции</b>	<b>B14</b>
	2.1 Предварительная информация	B14
	2.2 Изучение проекта	B15
	2.3 Реализация	B15
	2.4 Ввод в эксплуатацию	B15
<b>3</b>	<b>Защита</b>	<b>B16</b>
	3.1 Защита от поражения электрическим током	B16
	3.2 Защита трансформатора и линий	B17
	3.3 Блокировки и обусловленные операции	B19
<b>4</b>	<b>Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении</b>	<b>B22</b>
	4.1 Общие положения	B22
	4.2 Выбор комплектных распредустройств (КРУ)	B22
	4.3 Выбор высоковольтного оборудования для подключения трансформатора	B25
	4.4 Выбор понижающего трансформатора	B25
	4.5 Инструкция по использованию оборудования высокого напряжения	B29
<b>5</b>	<b>Подстанция потребителя с учетом на высоком напряжении</b>	<b>B32</b>
	5.1 Общие положения	B32
	5.2 Выбор ячеек	B34
	5.3 Параллельная работа трансформаторов	B35
<b>6</b>	<b>Создание распределительных понижающих подстанций</b>	<b>B37</b>
	6.1 Различные типы подстанций	B37
	6.2 Подстанция внутренней установки	B37
	6.3 Подстанция наружной установки	B39

# 1 Электроснабжение при высоком напряжении

B2

Основные характеристики системы электроснабжения:

- номинальное напряжение и соответствующие ему уровни прочности изоляции;
- ток короткого замыкания;
- номинальный ток заводских установок и оборудования;
- система заземления.

В настоящее время нет международного соглашения, четко ограничивающего определение «высокого» напряжения.

Уровни напряжения, в одних странах обозначаемые как «высокие», в других странах обозначаются как «средние».

В данном разделе распределительные сети, которые работают при напряжениях 1000 В или ниже считаются низковольтными сетями, а сети, требующие одну ступень понижения напряжения с целью питания низковольтных сетей, считаются высоковольтными сетями.

По экономическим и техническим причинам, номинальное напряжение высоковольтных распределительных сетей, определенных выше, редко превышает 35 кВ.

## 1.1 Характеристики высоковольтной сети системы электроснабжения

### Номинальное напряжение и соответствующие ему уровни прочности изоляции

Номинальное напряжение сети или оборудования определено в МЭК 60038 как «напряжение, которым обозначается сеть или оборудование, и к которому относятся определенные рабочие характеристики». Тесно связанным с понятием номинального напряжения является «максимальное рабочее напряжение для оборудования», зависящее от уровня прочности изоляции при номинальной рабочей частоте, и к которому можно отнести прочие характеристики, согласно соответствующим рекомендациям к оборудованию.

«Максимальное рабочее напряжение для оборудования» определено в МЭК 60038 как: «максимальное значение напряжения, при котором возможно использование оборудования, которое возникает при нормальных условиях работы в любое время и в любой точке сети. Это исключает переходные напряжения, например, возникающие при коммутации сети, и временные изменения напряжения».

#### Примечания:

**1-** Максимальное рабочее напряжение для оборудования указывается только для номинальных напряжений сети выше 1000 В. Очевидно, что, в частности, для определенных номинальных напряжений сети, нельзя гарантировать нормальную работу оборудования вплоть до этого максимального рабочего напряжения, принимая во внимание, что его характеристики зависят от величины приложенного напряжения (например: потери в конденсаторах, броски намагничивающего тока в трансформаторах и т.д.). Для таких случаев стандарты МЭК определяют предел, до которого может быть гарантирована нормальная работа оборудования.

**2-** Оборудование, используемое в сетях с номинальным напряжением до 1000 В, должно соответствовать техническим требованиям по данному номинальному напряжению сети, как для работы, так и для изоляции.

**3-** Определение «максимальное рабочее напряжение для оборудования», приведенное в МЭК 60038, идентично определению, данному в МЭК 60694 для «номинального напряжения». МЭК 60694 относится к распределительной аппаратуре с напряжениями свыше 1000 В.

Значения, приведенные на **рис. В1**, взятые из МЭК 60038, являются наиболее используемыми стандартными уровнями высоковольтного распределения энергии и соотносят номинальные напряжения с соответствующими стандартными значениями «максимального рабочего напряжения для оборудования».

Как правило, эти сети являются трехпроводными, если не указано иначе. Приведенные значения являются линейными напряжениями (между фазами).

Значения, указанные в скобках, не являются предпочтительными. Не рекомендуется использовать эти значения при проектировании новых сетей.

Серия I (для частоты 50 и 60 Гц)		
Номинальное напряжение сети		Максимальное рабочее напряжение для оборудования
(кВ)	(кВ)	(кВ)
3.3 <sup>(1)</sup>	3 <sup>(1)</sup>	3.6 <sup>(1)</sup>
6.6 <sup>(1)</sup>	6 <sup>(1)</sup>	7.2 <sup>(1)</sup>
11	10	12
-	15	17.5
22	20	24
33 <sup>(2)</sup>	-	36 <sup>(2)</sup>
-	35 <sup>(2)</sup>	40.5 <sup>(2)</sup>

(1) Эти значения не должны использоваться для распределительных сетей общего пользования.

(2) Унификация этих значений находится в процессе рассмотрения.

**Рис. В1:** Отношение между номинальными напряжениями системы и максимальными рабочими напряжениями для оборудования



# 1 Электроснабжение при высоком напряжении

B3

Для каждой отдельно взятой страны рекомендуется, чтобы отношение между двумя смежными номинальными напряжениями было не меньше двух.

С целью обеспечения надежной защиты оборудования от чрезмерно высоких кратковременных перенапряжений промышленной частоты и переходных перенапряжений, вызванных ударом молнии, коммутацией или сбоем в сети и т.д., все ВВ оборудование должно иметь номинальные уровни прочности изоляции, соответствующие техническим условиям.

## Распределительная аппаратура

**Рис. В2**, приведенный ниже, взят из МЭК 60694 и содержит ряд требуемых стандартных значений «выдерживаемых» напряжений. Выбор между значениями столбца 1 и столбца 2 таблицы В2 зависит от степени вероятности возникновения перенапряжений, вызванных ударом молнии или коммутацией<sup>(1)</sup>, типа заземления нейтрали, а также от типа устройств защиты от перенапряжений и т.д. (для получения более подробной информации обращайтесь к МЭК 60071).

Номинальное напряжение U (ср. кв. значение)	Номинальное выдерживаемое напряжение грозового импульса (амплитуда)				Номинальные кратковременные выдерживаемые перегрузки по напряжению/частоте (ср. кв. значение)	
	Столбец 1		Столбец 2			
	На землю между полюсами и через разомкнутое коммутационное устройство	Через изоляционный промежуток	На землю между полюсами и через разомкнутое коммутационное устройство	Через изоляционный промежуток		
(кВ)	(кВ)	(кВ)	(кВ)	(кВ)	(кВ)	(кВ)
3.6	20	23	40	46	10	12
7.2	40	46	60	70	20	23
12	60	70	75	85	28	32
17.5	75	85	95	110	38	45
24	95	110	125	145	50	60
36	145	165	170	195	70	80
52	-	-	250	290	95	110
72.5	-	-	325	375	140	160

**Примечание:** Значения выдерживаемого напряжения «через изоляционный промежуток» применимы только для коммутационных устройств, где изоляционный промежуток между открытыми контактами спроектирован с учетом удовлетворения требований, определенных для разъединителей.

Рис. В2: Номинальные уровни прочности изоляции коммутационной аппаратуры

Необходимо заметить, что для рассматриваемых уровней напряжения не указаны паспортные данные коммутационных перенапряжений. Это связано с тем, что перенапряжения, вызываемые переходными процессами при коммутации, менее значительны при этих уровнях напряжения, чем перенапряжения, вызываемые ударом молнии.

## Трансформаторы

Значения на **рис. В3**, приведенные ниже, взяты из стандарта МЭК 60076-3.

Смысл значений столбца 1 и столбца 2 тот же самый, что и для таблицы для коммутационной аппаратуры, т.е. выбор зависит от степени подверженности удару молнии и т.д.

Наибольшее напряжение оборудования (ср. кв.)	Номинальное кратковременное выдерживаемое напряжение пром. частоты (ср. кв.)	Номинальное выдерживаемое напряжение грозового импульса (амплитуда)	
		Столбец 1	Столбец 2
(кВ)	(кВ)	(кВ)	(кВ)
≤1.1	3	-	-
3.6	10	20	40
7.2	20	40	60
12	28	60	75
17.5	38	75	95
24	50	95	125
36	70	145	170
52	95	250	-
72.5	140	325	-

Рис. В3: Номинальные уровни прочности изоляции трансформаторов

(1) Столбец 1 относится, в основном, к коммутационной аппаратуре, используемой в подземных кабельных сетях, а столбец 2 – к коммутационной аппаратуре в сетях воздушных линий.

Национальные стандарты любой страны обычно сокращены и включают в себя только один или два уровня напряжения, тока и уровней токов и мощностей при аварийных режимах (токи и мощности короткого замыкания)

Автоматический выключатель (также с плавким предохранителем на ограниченный диапазон напряжений) является единственным видом коммутационной аппаратуры, способным безопасно размыкать большие токи, связанные с коротким замыканием, возникающем в системе питания.

Другие элементы

Изоляционные характеристики других важных ВВ элементов, таких как, например, фарфоровые или стеклянные изоляторы, ВВ кабели, измерительные трансформаторы, и т.д., должны быть совместимы с изоляционными характеристиками коммутационной аппаратуры и трансформаторов, о которых говорилось выше. Программа испытаний для этих элементов приведена в соответствующих рекомендациях МЭК.

Национальные стандарты любой страны обычно сокращены, и включают в себя только один, или два уровня напряжения, тока и уровней токов и мощностей при аварийных режимах (токи и мощности короткого замыкания).

Общее примечание:

Стандарты МЭК предназначены для всемирного применения и, следовательно, включают в себя широкий диапазон уровней напряжений и токов. Они отражают различные методы, принятые в странах, имеющих различные метеорологические, географические и экономические ограничения.

Ток короткого замыкания

Стандартные значения, характеризующие отключающую способность выключателя, обычно указываются в килоамперах.

Эти значения относятся к режиму трехфазного короткого замыкания, и выражены в виде среднеквадратичных значений переменной составляющей тока в каждой из трех фаз.

Для выключателей в диапазоне номинальных напряжений, рассматриваемых в данной главе, на **рис. В4** даны стандартные значения отключающей способности.

кВ	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52
кА	8	8	8	8	8	8	8
(ср.кв.)	10	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	16	16	16	16	16	16	20
	25	25	25	25	25	25	
	40	40	40	40	40	40	
			50				

Рис. В4: Стандартные значения отключающей способности выключателей

Расчет тока короткого замыкания

Правила для расчета токов короткого замыкания в электрических установках представлены в стандарте 60909 МЭК.

Расчет токов короткого замыкания в различных точках системы питания может быстро перерасти в затруднительную задачу в случае, если установка является сложной.

Использование специализированного программного обеспечения ускоряет расчеты.

Этот общий стандарт, применимый ко всем радиальным и многоконтурным системам питания 50 или 60 Гц и до 550 кВ, является очень точным и надежным.

Он может быть использован для различных типов коротких замыканий (симметричных или несимметричных), которые могут возникнуть в электрической установке:

- трехфазное короткое замыкание (всех трех фаз); как правило, этот тип КЗ сопровождается наибольшими токами;
- двухфазное короткое замыкание (между двумя фазами), токи ниже, чем при трехфазном коротком замыкании;
- двухфазное короткое замыкание на землю (между двумя фазами и землей);
- однофазное короткое замыкание на землю (между фазой и землей), наиболее частый тип КЗ (80% всех случаев).

При возникновении короткого замыкания, переходный ток короткого замыкания изменяется по времени и включает в себя две составляющие (см. **рис. В5**):

- периодическую составляющую, начальная величина которой определяется величиной напряжения источника (генераторов, питающих короткозамкнутую сеть) величиной ее импеданса (полного сопротивления). Эта величина уменьшается до своего установившегося значения за время, зависящее от общей (эквивалентной) постоянной времени группы вращающихся машин (генераторов);
- аperiodическую составляющую, которая с течением времени уменьшается до нуля («затухает»). Ее начальная величина зависит от момента ее возникновения, а время «затухания» - от постоянной времени цепи короткого замыкания.

Таким образом, необходимо определить значения параметров короткого замыкания, которые полезны в выборе оборудования сети и системы защиты:

- $I''_k$ : среднеквадратичное значение начального тока симметричного короткого замыкания;
- $I_b$ : среднеквадратичное значение тока симметричного короткого замыкания, отключаемого выключателем, когда размыкается первый полюс при  $t_{min}$  (при минимальном запаздывании);
- $I_k$ : среднеквадратичное значение установившегося тока симметричного короткого замыкания;
- $I_p$ : максимальное мгновенное значение (амплитуда тока при первом максимуме - ударный ток короткого замыкания);
- $I_{DC}$ : величина аperiodической составляющей тока.

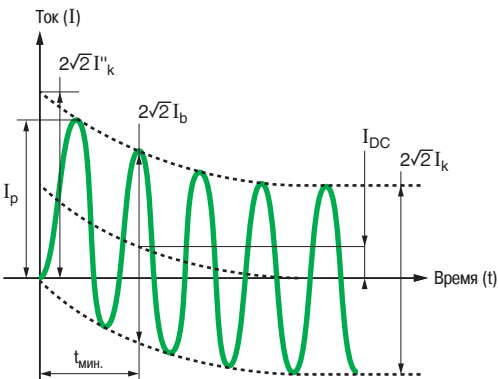


Рис. В5: Графическое представление величин короткого замыкания согласно МЭК 60909

Эти токи обозначаются нижними индексами 3, 2, 2E, 1, в зависимости от типа короткого замыкания: трехфазное, двухфазное без земли, двухфазное на землю, однофазное на землю.

Метод, основанный на принципе суперпозиции Тевенина и разложении на симметричные составляющие, заключается в приложении к точке короткого замыкания эквивалентного источника напряжения с целью определения тока. Расчет проводится в три этапа:

■ Определяется эквивалентный источник напряжения, приложенный к точке КЗ. Он представляет собой напряжение, существовавшее непосредственно перед КЗ, и равен номинальному напряжению, умноженному на коэффициент, учитывающий нестабильность источника (наличие переключателя у трансформатора и поведения машин в сверхпереходном режиме).

■ Рассчитываются полные сопротивления каждой ветви относительно точки КЗ. Для систем прямой и обратной последовательности, в расчете не учитываются емкости линий и проводимости параллельных невращающихся нагрузок.

■ После определения значений напряжения и полного сопротивления, рассчитываются минимальные и максимальные значения характеристик токов короткого замыкания.

Различные значения тока в точке КЗ рассчитываются с помощью:

- имеющихся уравнений;
- уравнений по первому закону Кирхгофа (сумма токов, текущих в ветвях, сходящихся в одном узле, равна нулю):
- $I'_k$  (см. **рис. В6** для расчета  $I''_k$ , где коэффициент по напряжению определяется стандартным, геометрическим или алгебраическим сложением);
- $I_p = \kappa \times 2 \times I'_k$ , где  $\kappa$  меньше 2, в зависимости от отношения активного и реактивного сопротивлений ( $R/X$ ) прямой последовательности данной ветви; сложение максимумов;
- $I_b = \mu \times q \times I'_k$ , где  $\mu$  и  $q$  меньше 1, в зависимости от генераторов и двигателей, а также минимальной задержки отключения тока; алгебраическое сложение;
- $I_k = I''_k$ , когда КЗ далеко от генератора;
- $I_k = \lambda I_r$  для генератора, где  $I_r$  – номинальный ток генератора,  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от индукции насыщения; алгебраическое сложение.

Тип короткого замыкания	$I''_k$	
	Обычная ситуация	Отдаленное КЗ
3 фазы	$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_1}$	$\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} Z_1}$
2 фазы	$\frac{c \cdot U_n}{Z_1 + Z_2}$	$\frac{c \cdot U_n}{2Z_1}$
2 фазы / земля	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_1 Z_0}$	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{Z_1 + 2Z_0}$
Фаза / земля	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$\frac{c \cdot U_n \cdot \sqrt{3}}{2 Z_1 + Z_0}$

Рис. В6: Токи короткого замыкания согласно МЭК 60909

## Определение характеристик

Существуют 2 типа оборудования сети, в зависимости от того, реагируют ли они на возникновение короткого замыкания или нет.

### Пассивное оборудование

Эта категория включает в себя все оборудование, которое, ввиду его назначения, должно быть способным проводить как номинальный ток, так и ток короткого замыкания. Это оборудование включает в себя кабели, линии, шины, разъединители, трансформаторы, последовательные реакторы, измерительные трансформаторы.

Для такого оборудования способность выдерживать короткое замыкание без повреждения определяется с учетом:

- электродинамической устойчивости («максимальный выдерживаемый ток»; значение максимального тока выражено в кА), характеризующей механическую прочность;
- термической устойчивости («кратковременный выдерживаемый ток»; среднеквадратичное значение, выраженное в кА для продолжительности в диапазоне от 0,5 до 3 секунд, с предпочтительным значением 1 секунда), характеризующей максимально допустимое рассеяние тепла.

## Активное оборудование

Эта категория включает в себя оборудование, предназначенное для отключения токов короткого замыкания, т.е. выключатели и предохранители. Оно характеризуется отключающей способностью, и, если необходимо, включающей способностью, при возникновении короткого замыкания.

### ■ Отключающая способность (см. рис. В7 )

Основной характеристикой устройства, устраняющего короткое замыкание, является максимальный ток (среднеквадратичное значение, выраженное в кА), который оно способно прервать в определенных условиях, определяемых стандартами; стандарт МЭК приводит среднеквадратичное значение периодической составляющей тока короткого замыкания. В некоторых других стандартах определено среднеквадратичное значение суммы двух составляющих периодической и апериодической (переменной и постоянной), и в этом случае это «несимметричный ток».

Отключающая способность зависит и от других факторов, таких как:

- напряжение;
- соотношение R/X размыкаемой цепи;
- собственная частота системы энергоснабжения;
- количество повторных включений и отключений при максимальном токе, например, цикл: P - 3/P - 3/P (P = размыкание, 3 = замыкание);
- состояние устройства после испытания.

Отключающая способность является относительно сложной для определения. Поэтому неудивительно, что одно и то же устройство может иметь различную отключающую способность в зависимости от стандарта, по которому эта способность определяется.

### ■ Включающая способность на короткое замыкание

Как правило, эта характеристика полностью определяется отключающей способностью, так как устройство должно быть способным замыкаться при токе, который оно способно прервать.

Иногда включающая способность должна быть выше, например, в выключателях, защищающих генераторы.

Включающая способность определяется амплитудным значением (выраженным в кА), так как первая асимметричная амплитуда является основным действующим фактором с точки зрения электродинамики.

Например, согласно стандарту МЭК 62271-100, выключатель, используемый в системе энергоснабжения 50 Гц, должен быть способным выдерживать амплитуду тока включения, в 2,5 раза превышающую среднеквадратичное значение прерываемого тока (2,6 раза для систем 60 Гц).

Выключатели и, иногда, разъединители, также должны иметь включающую способность, даже если эти устройства не способны устранить короткое замыкание.

### ■ Предполагаемый ток отключения короткого замыкания

Некоторые устройства имеют способность ограничивать ток короткого замыкания, который необходимо прервать.

Их отключающая способность определяется как максимальный предполагаемый ток отключения, который получился бы во время непосредственного короткого замыкания на входных зажимах устройства.

## Специфические характеристики устройств

Функциональные возможности, обеспечиваемые различными коммутационными аппаратами, и их основные ограничения представлены на рис. В8.

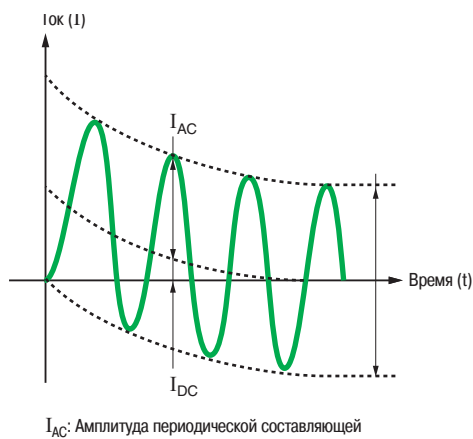


Рис. В7: Номинальный ток прерывания автоматического выключателя, подвергнутого короткому замыканию согласно МЭК 60056

Устройство	Изоляция двух активных сетей	Условия коммутации тока		Главные ограничения
		Номинал	КЗ	
Разъединитель	Да	Нет	Нет	Продольная входная/выходная изоляция
Выключатель нагрузки	Нет	Да	Нет	Включение и отключение тока номинальной нагрузки Включающая способность КЗ
Контактор	Нет	Да	Нет	Номинальная включающая и отключающая способность Максимальная отключающая и включающая способность Характеристики режима и срок службы
Автоматический выключатель	Нет	Да	Да	Отключающая способность КЗ
Предохранитель	Нет	Нет	Да	Минимальная способность отключения КЗ Максимальная способность включения КЗ

Рис. В8: Функции, обеспечиваемые коммутационными аппаратами

Наиболее распространенным значением номинального тока для ВВ распределительной аппаратуры общего назначения является 400 А.

## Номинальный ток

Номинальный (нормальный ток) при температуре устройства, не превышающей величины, определенной соответствующим производственным стандартом.

Требования к номинальному току коммутационной аппаратуры определяются на стадии проектирования подстанции.

Наиболее распространенным значением номинального тока для ВВ распределительной аппаратуры общего назначения является 400 А.

В промышленных зонах и городских районах с высокой плотностью нагрузки иногда требуются цепи, рассчитанные на номинальный ток 630 А, в то время как на подстанциях магистрального энергоснабжения, питающих высоковольтные сети, в качестве стандартных параметров автоматических выключателей для цепей входных трансформаторов, секций сборных шин и шинных соединителей указаны значения номинального тока 800 А, 1250 А, 1600 А, 2500 А и 4000 А. Для понижающих трансформаторов с номинальным током первичной обмотки до 60 А может быть использован выключатель с плавким предохранителем. Для более высоких токов первичной обмотки выключатель с плавким предохранителем не отвечает предъявляемым требованиям.

Для случаев с использованием выключателей с плавким предохранителем в МЭК нет рекомендованных значений номинальных токов. Фактические параметры предоставляются изготовителем выключателя с плавким предохранителем, согласно характеристикам предохранителя и таким параметрам трансформатора, как:

- номинальный ток на стороне высокого напряжения;
- допустимые величины тока перегрузки и его продолжительности;
- максимальная амплитуда и продолжительность броска намагничивающего тока трансформатора при включении;
- положение переключателя отпаяк, как показано на примере, приведенном в Приложении А МЭК 62271-105, и описано в Приложении С1 данного Руководства.

В такой схеме выключатель нагрузки должен быть правильно рассчитан, чтобы размыкаться автоматически, например при помощи реле, при низких значениях тока КЗ, которые должны быть выше (с необходимым запасом), чем минимальный номинальный ток отключения высоковольтных предохранителей. В этом случае, большие токи КЗ, превышающие отключающую способность выключателя нагрузки, будут устранены предохранителями, а небольшие токи КЗ, которые не могут быть корректно устранены предохранителями, будут устранены выключателем нагрузки с релейным управлением. Приложение С1 содержит дополнительную информацию об организации размыкания с использованием высоковольтных выключателей с плавким предохранителем.

## Влияние температуры окружающей среды и высоты над уровнем моря на номинальный ток

Значение номинального тока присваивается любым токопроводящим электрическим устройствам, а верхние пределы определяются допустимым повышением температуры, вызываемом рассеянием мощности  $I^2R$  (Вт) в проводах (где  $I$  = среднеквадратичное значение тока в амперах,  $R$  = сопротивление проводника в омах), совместно с теплом, выделяющимся при потерях на перемагничивание и вихревые токи в двигателях, трансформаторах и т.д., диэлектрических потерях в кабелях и конденсаторах, где это возможно.

Превышение температуры выше температуры окружающей среды главным образом зависит от скорости отвода тепла. Например, большие токи могут протекать в обмотках электродвигателя, не вызывая их перегрев, просто потому, что вентилятор, установленный на валу двигателя, удаляет тепло также быстро, как оно выделяется, и, таким образом, температура достигает устойчивого значения, ниже того, при котором может произойти повреждение изоляции или сгорание двигателя.

Трансформаторы с масляным и/или воздушным охлаждением являются одним из наиболее известных примеров использования таких способов «принудительного охлаждения».

Номинальные значения тока, рекомендуемые МЭК, основаны на значениях температуры окружающего воздуха, обычной для умеренного климата на высоте, не превышающей 1000 метров над уровнем моря. Таким образом, элементы, которые зависят от естественных условий охлаждения в виде лучеиспускания или вентиляции, при работе на номинальном токе в тропическом климате и/или на высотах, превышающих 1000 метров над уровнем моря, будут перегреваться. В таких случаях, номинальные значения параметров оборудования должны быть снижены, т.е. должно быть присвоено меньшее значение номинального тока. Пример с трансформаторами рассмотрен в МЭК 60076-2.

Для трансформаторов с принудительным охлаждением в общем случае достаточно, с целью сохранения исходных параметров, определенных МЭК, установить экраны для защиты от солнца, увеличить поверхности маслоохлаждающего радиатора, количество охлаждающего масла, мощность насосов подачи масла, а также размер воздухообдувающих вентиляторов.

Для получения информации о том, как правильно снизить номинальные значения параметров коммутационной аппаратуры в зависимости от фактических условий её работы, необходимо обратиться к её производителю.

Короткое замыкание на землю в высоковольтных сетях может привести к возникновению опасных перенапряжений на стороне низкого напряжения установки.

Абоненты сети низкого напряжения (и работающий на подстанции персонал) могут быть защищены от такой опасности посредством:

- ограничения амплитуды токов КЗ на землю в сети высокого напряжения;
- снижения сопротивления системы заземления подстанции до минимально возможного значения;
- создания системы выравнивания потенциалов на подстанции и в установке абонента.

## Системы заземления

Система заземлений и проводники, соединяющие с ней оборудование (заземляющие проводники), требуют тщательного рассмотрения, особенно в отношении безопасности абонентов сети НН во время возникновения короткого замыкания на землю в высоковольтных сетях.

### Заземлители

В общем случае, где это физически возможно, предпочтительно разделять электроды, предназначенные для заземления открытых проводящих частей высоковольтного оборудования от электродов, предназначенных для заземления низковольтного нулевого провода. Такая практика широко используется в сельских сетях, где заземлитель низковольтного нулевого провода устанавливается на расстоянии одного или двух пролетов низковольтной линии электропередачи от подстанции.

В большинстве случаев, ограниченность места, доступного на городских подстанциях, не позволяет использовать эту практику, т.е. нет возможности должным образом разделять высоковольтные и низковольтные заземлители с целью предотвращения переноса возможно опасных напряжений в низковольтную сеть.

### Ток замыкания на землю

Уровни тока короткого замыкания на землю при высоком напряжении обычно (если он принудительно не ограничен) сравнимы с уровнями токов, возникающих при 3-фазном коротком замыкании.

Такие токи, проходя через заземлитель, увеличивают его потенциал до высокого значения относительно «удаленной земли» (земля, окружающая заземлитель, получит высокий потенциал; «удаленная земля» имеет нулевой потенциал).

Например, ток замыкания на землю 10 000 А, проходящий через заземлитель с необычно низким сопротивлением 0.5 Ом, увеличит его потенциал до 5 000 В.

При условии, что все открытые металлические части на подстанции «связаны» (соединены вместе) и, затем, подключены к заземляющему электроду (заземлителю), а заземляющее устройство выполнено в виде сетки из проводников, расположенных под полом подстанции, обеспечивается безопасность персонала, так как при этом формируется эквипотенциальная «клетка», в которой все электропроводящие материалы, включая персонал, имеют одинаковый потенциал.

### Вывос потенциал

Однако, проблема, известная как «вывос потенциала», включает в себя несколько опасных моментов. На **рис. В9** видно, что нейтральная точка обмотки НН понижающего трансформатора также подключена к общему заземлителю подстанции, и, таким образом, нулевой провод, обмотки фаз НН и проводники всех фаз также имеют потенциал, равный потенциалу заземлителя.

Низковольтные распределительные кабели, исходящие из подстанции, будут передавать этот потенциал установкам потребителя. Можно заметить, что пробой низковольтной изоляции между фазами или фазой и нейтралью невозможен, так как все они имеют равный потенциал. Однако, существует вероятность пробоя изоляции кабеля или какой-либо части установки между фазой и землей.

### Способы решения

Первым шагом для минимизации опасностей, связанных с выносом потенциала, является уменьшение амплитуды тока короткого замыкания на землю в сети высокого напряжения. В большинстве случаев это достигается заземлением высоковольтной сети через резисторы или реакторы в нейтральных точках звезды выбранных трансформаторов<sup>(1)</sup>, расположенных на крупных (мощных) подстанциях системы электроснабжения.

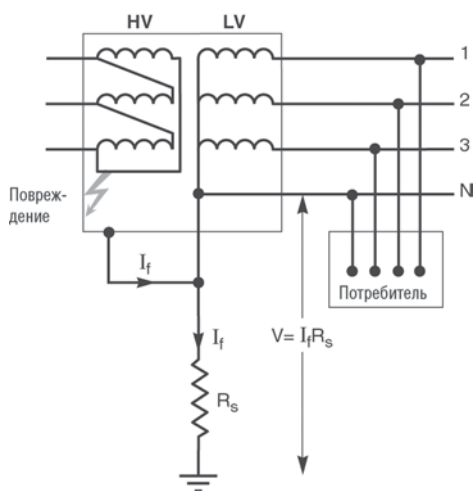
Однако, относительно высокий переносимый потенциал не может быть полностью устранен таким образом, поэтому в некоторых странах принят следующий способ решения этой проблемы: система заземления с уравниванием потенциала (эквипотенциальная заземляющая система) в помещениях потребителя (абонента).

Эквипотенциальное заземление установок в помещении абонента представляет собой удаленное заземление, т.е. заземление нулевым потенциалом. Однако, если такая заземляющая установка будет подключена низкоомным проводником к заземлителю на подстанции, то эквипотенциальные условия, существующие на подстанции, будут также существовать и на установке абонента.

### Низкоомное межсоединение

Такое низкоомное межсоединение достигается путем подключения нулевого провода к эквипотенциальной установке абонента. Получающаяся в результате система известна, как система заземления TN (МЭК 60364), схема А на **рис. В10** на следующей странице.

Система TN обычно соединена со схемой «многократного защитного заземления», в которой нулевой провод заземлен через определенные интервалы его длины (на каждом 3-м или 4-м столбе низковольтной распределительной воздушной линии) и в каждом месте подвода питания потребителю. Таким образом, сеть нулевых проводов, исходящих из подстанции, каждый из которых заземлен через постоянные интервалы, представляет собой, вместе с собственным заземлением подстанции, очень эффективный низкоомный заземлитель.



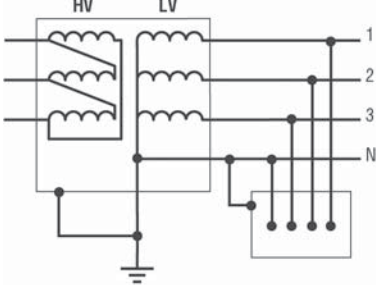
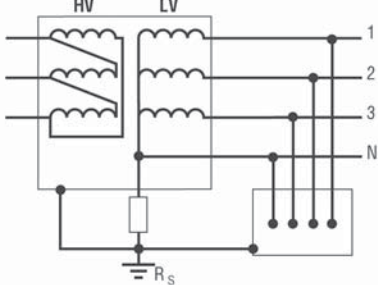
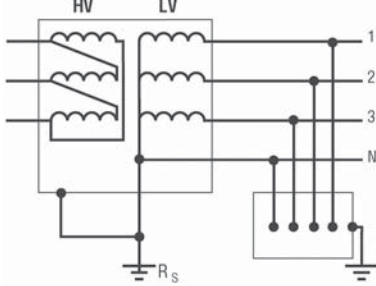
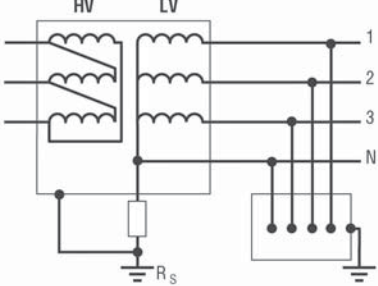
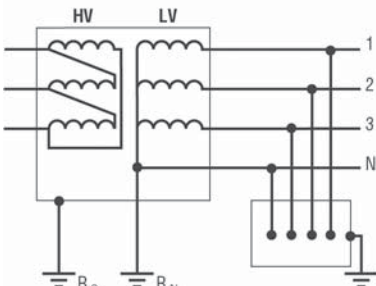
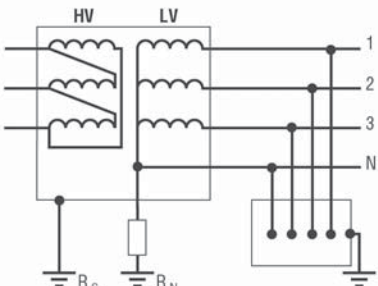
**Рис. В9:** Переносимый потенциал

(1) Остальные не заземляются. Отдельный случай ограничения тока короткого замыкания на землю, а именно, при помощи дугогасительной катушки, рассматривается в конце пункта 3.2



# 1 Электроснабжение при высоком напряжении

B9

Система заземления		Значение $R_s$
<b>A - TN-a</b> 		<b>Случаи А и В</b>  В данных случаях для $R_s$ не назначается определенных значений
<b>B - IT-a</b> 		
<b>C - TT-a</b> 		<b>Случаи С и D</b>  $R_s \leq \frac{U_w - U_0}{I_m}$ Где $U_w$ = номинальное выдерживаемое напряжение при номинальной частоте для низковольтного оборудования на установках потребителя $U_0$ = фазное напряжение на установке потребителя $I_m$ = максимальное значение в сети высокого напряжения (на стороне высокого напряжения) тока замыкания на землю
<b>D - IT-b</b> 		
<b>E - TT-b</b> 		<b>Случаи Е и F</b>  $R_s \leq \frac{U_{ws} - U}{I_m}$ Где $U_{ws}$ = выдерживаемое напряжение на номинальной частоте для низковольтного оборудования на подстанции (так как открытые проводящие части этого оборудования заземлены через $R_s$ ) $U$ = фазное напряжение на подстанции для TT(s) системы, и линейное напряжение для IT(s) системы $I_m$ = максимальное значение в сети высокого напряжения (на стороне высокого напряжения) тока замыкания на землю
<b>F - IT-c</b> 		

В случае Е и F низковольтные заземляющие провода (связывающие открытые проводящие части) на подстанции заземлены через заземлитель подстанции, и поэтому только низковольтное оборудование подстанции может быть подвергнуто перенапряжению.

В случае Е и F низковольтные заземляющие провода (связывающие открытые проводящие части) на подстанции заземлены через заземлитель подстанции, и поэтому только низковольтное оборудование подстанции может быть подвержено перенапряжению.

## Примечание:

- Для систем заземлений TN-a и IT-a, все открытые проводящие части высокого и низкого напряжений на подстанции и на установках потребителя, вместе с нейтралью низкого напряжения, заземлены через сеть заземлителей подстанции.
- Для систем TT-a и IT-b, все открытые проводящие части высокого и низкого напряжений на подстанции заземлены через сеть заземлителей подстанции. Корпуса присоединены к отдельному заземляющему устройству.
- Для систем TT-b и IT-c, нейтраль низкого напряжения трансформатора заземлена отдельно, вне зоны действия заземлителя подстанции. Значения  $U_w$  и  $U_{ws}$  для большинства случаев указаны (в МЭК 60364-4-44), как значение  $U_0 + 1200$  В, где  $U_0$  – номинальное фазное напряжение рассматриваемой низковольтной сети.

Рис. В10: Максимальное заземляющее сопротивление  $R_s$  на ВН/НН подстанции, обеспечивающее безопасность во время короткого замыкания на землю в высоковольтном оборудовании при различных системах заземления

Комбинированное использование ограничения токов замыкания на землю, установок выравнивания потенциалов и низкоомного заземления подстанции приводит к значительному снижению перенапряжений и ограничению напряжения на изоляции фазы относительно земли во время высоковольтного короткого замыкания, описанного выше.

## Ограничение токов замыкания на землю в сети высокого напряжения (на стороне высокого напряжения) и заземляющего сопротивления подстанции

Другая широко используемая система заземления показана на схеме С рис. В10. Видно, что в системе TT, заземляющая установка абонента (будучи изолированной от заземляющей установки подстанции) представляет собой удаленную землю.

Это означает, что, хотя выносимый потенциал не будет влиять на междуфазную изоляцию оборудования абонента, изоляция всех трех фаз относительно земли будет подвержена перенапряжению

В этом случае методика заключается в уменьшении сопротивления заземлителя подстанции до значения, при котором стандартное значение кратковременного (5 с) выдерживаемого напряжения при замыкании на землю для низковольтного оборудования и устройств не будет превышено.

Практические значения, принятые одной национальной электроснабжающей организацией для систем электроснабжения на напряжении 20 кВ следующие:

- максимальный ток в нейтрали при коротком замыкании на землю в воздушных линиях электропередач с нейтралью или смешанных (воздушнокабельные линии) сетях составляет 300 А;
- максимальный ток замыкания на землю в подземных кабельных сетях с нейтралью составляет 1000 А.

Формула для определения максимального значения заземляющего сопротивления  $R_s$  на подстанции, при котором гарантировано, что низковольтное выдерживаемое напряжение не будет превышено, имеет следующий вид:

$$R_s = \frac{U_w - U_0}{I_m} \text{ в } \Omega \text{ (см. случаи C и D на рис. B10),}$$

где:

$U_w$  = наименьшее стандартное значение (в вольтах) кратковременного (5 с) выдерживаемого напряжения для установок и устройств потребителя =  $U_0 + 1200 \text{ В}$  (МЭК 60364-4-44);

$U_0$  = фазное напряжение (в вольтах) в месте подвода низкого напряжения потребителя;

$I_m$  = максимальный ток замыкания на землю высоковольтной сети (в амперах). Этот максимальный ток замыкания на землю  $I_m$  есть векторная сумма максимального тока замыкания на землю в нейтрали и суммарного несимметричного емкостного тока в сети.

Третья разновидность системы заземления, которая в стандарте МЭК 60364 называется системой IT, используется, главным образом, там, где бесперебойное энергоснабжение является очень важным, например, в больницах, непрерывном производстве и т.д. Этот принцип заключается в том, что питание поступает от незаземленного источника. Как правило, это трансформатор, вторичная обмотка которого не заземлена или заземлена через высокое сопротивление ( $\geq 1000 \text{ Ом}$ ). В этих случаях пробой изоляции на землю в цепях низкого напряжения, питаемых от вторичных обмоток, приведет к отсутствию или возникновению пренебрежимо малого тока короткого замыкания, протекание которого допустимо в течение некоторого времени до тех пор, пока не будет возможным отключить неисправную цепь для проведения ремонтных работ.

#### **Схемы В, D и F (рис. B10)**

Схемы представляют собой системы IT, в которых сопротивления (примерно 1000 Ом) включены в заземленный нейтральный провод.

Однако, если убрать эти резисторы, тем самым, делая систему незаземленной, к ней применимы следующие параграфы.

#### **Схема В (рис. B10)**

Проводники всех фаз и нейтральный провод «плавают» относительно земли, к которой они подключены через (как правило, очень высокие) сопротивления изоляции и (очень маленькие) емкости между проводами под напряжением и заземленными металлическими частями. Полагая, что изоляция идеальна, все проводники фаз низкого напряжения и нейтральный провод путем электростатической индукции получают потенциал, близкий к потенциалу эквипотенциальных проводников. На практике наиболее вероятно то, что из-за большого количества каналов утечки на землю всех проводов под напряжением от нескольких параллельно работающих установок, система будет вести себя также, как в случае присутствия заземляющего резистора, т.е. все провода получают потенциал земли подстанции. В этих случаях перенапряжения, действующие на изоляцию низкого напряжения, малы или отсутствуют.

#### **Схемы D и F (рис. B10)**

В этих случаях, высокий потенциал системы заземления подстанции действует на изолированные фазы низкого напряжения и нейтральный провод:

- через емкостное сопротивление между обмотками низкого напряжения трансформатора и его баком;
- через емкостное сопротивление между эквипотенциальными проводами на подстанции и жилами низковольтных распределительных кабелей, исходящих от подстанции;
- через каналы утечки тока в изоляции, в каждом случае.

В местах вне зоны действия системы заземления подстанции, существуют емкостные сопротивления между проводами и землей, имеющей нулевой потенциал (емкостные сопротивления между жилами несущественны – все жилы получают одинаковый потенциал).

В результате получается преимущественно емкостной делитель напряжения, в котором каждая «емкость» шунтируется сопротивлениями (каналов утечки).

Как правило, емкость кабелей низкого напряжения и установочных проводов относительно земли много больше, а сопротивления изоляции относительно земли много меньше, чем емкость и сопротивления соответствующих параметров на подстанции, поэтому большинство перенапряжений возникают на подстанции между обмоткой низкого напряжения трансформатора и его баком.



Таким образом, мало вероятно, что повышение потенциала на установках потребителя будет проблемой там, где уровень тока короткого замыкания на землю в сети высокого напряжения ограничен, как указывалось выше.

Все трансформаторы, заземленные по системе IT, с изолированной или заземленной через высокое сопротивление нейтралью, как правило, оборудованы устройствами ограничения перенапряжений, которые автоматически подключают нейтраль напрямую к земле, если уровень перенапряжения приблизится к уровню прочности изоляции низковольтной сети.

Помимо ситуаций, указанных выше, существуют несколько других ситуаций, в которых могут возникнуть эти перенапряжения. Эти ситуации описаны в разделе 3.1.

Такой тип замыкания на землю случается очень редко, а когда он происходит, он быстро обнаруживается и устраняется автоматическим размыканием выключателя в правильно спроектированной и сконструированной установке.

Безопасность в ситуациях, связанных с повышенными потенциалами, полностью зависит от обеспечения правильно организованных зон выравнивания потенциалов, которые основаны на применении крупноячеистой решетки взаимосвязанных неизолированных медных проводов, подключенных к вертикально расположенным омедненным<sup>(1)</sup> стальным стержням.

Критерий эквипотенциальности, который необходимо соблюдать, описан в главе F, посвященной защите от поражения электрическим током при косвенном прикосновении, а именно: потенциал между двумя неизолированными металлическими частями к которым возможно прикосновения одновременно любой частью тела, ни при каких обстоятельствах не должен превышать 50 В в сухой среде, или 25 В во влажной среде.

Особое внимание необходимо уделять границам эквипотенциальных зон, чтобы избежать резких градиентов потенциалов на поверхности земли, которые могут привести к возникновению опасных «шаговых напряжений».

Этот вопрос тесно связан с безопасным заземлением ограждений подстанций, и рассматривается дальше в разделе 3.1.

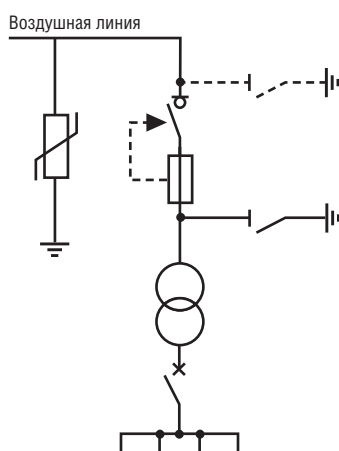


Рис. B11: Радиальная схема электроснабжения

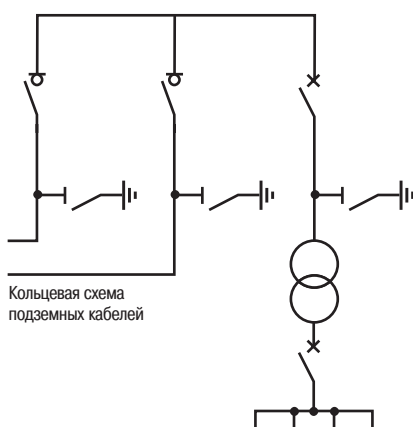


Рис. B12: Электроснабжение по кольцевой магистрали

(2) Кольцевая схема питания - это непрерывная распределительная магистраль, выполненная в виде замкнутого контура, которая начинается и заканчивается на одной системе шин. Начало и конец этой кольцевой магистрали подключаются к системе шин (каждый своим выключателем), часто, для повышения удобства эксплуатации шины секционируются нормально включенным секционным выключателем. При этом начало и конец кольцевой магистрали подсоединяются к разным секциям шин. Связь между двумя подстанциями системы электроснабжения (interconnector) - это непрерывный фидер без отпаек, соединяющий шины двух подстанций с выключателями на каждом конце.

Связь между несколькими подстанциями системы (interconnector-distributor) - это магистраль, связывающая одну или более распределительных подстанций [РП] системы.

## 1.2 Различные способы подключения ВВ электроснабжения

В зависимости от типа высоковольтной сети применяются нижеследующие способы организации подачи питания.

### Радиальная схема электроснабжения

Подстанция питается от одной линии питания от высоковольтного РУ (кабель или воздушная линия).

В общем случае, трансформатор подключается к устройству ввода, содержащему комбинацию из выключателя нагрузки /разъединителя с плавким предохранителем и заземляющих разъединителей, как показано на рис. B11.

В некоторых странах «подстанция» состоит из столбового трансформатора без высоковольтной коммутационной аппаратуры или предохранителей (на столбе). Такой тип высоковольтного энергоснабжения широко используется в сельских районах.

Защитные и коммутирующие устройства находятся на расстоянии от трансформатора, и обычно управляют главной воздушной линией, от которой отходят несколько линий энергоснабжения абонентов.

### Электроснабжение по кольцевой схеме питания

Установки кольцевой схемы питания обычно соединяются, образуя высоковольтную кольцевую схему<sup>(2)</sup> или магистраль, связывающая одну или более РП-системы<sup>(2)</sup> так, что шины установок кольцевой схемы проводят полный ток кольцевой схемы или ток этой магистрали (см. рис. B12).

РУ ВН подстанции, получающей питание от кольцевой схемы, состоит из трех ячеек, образующих единый агрегат, а именно:

- 2 вводных ячейки, каждая из которых содержит выключатель нагрузки/разъединитель и заземляющий разъединитель;
- 1 выходная ячейка общей защиты, содержащая выключатель нагрузки и высоковольтные предохранители, или комбинированный выключатель нагрузки с плавким предохранителем, или автоматический выключатель и разъединитель, вместе с заземляющим разъединителем цепи в каждом случае. Все выключатели нагрузки и заземляющие разъединители имеют номинальные параметры, рассчитанные для режимов включения на короткое замыкание.

Такая схема питания предоставляет пользователю питание от двух источников, таким образом, значительно уменьшая нарушение электроснабжения из-за сбоев системы или операций электроснабжающей организации. Главным образом, установки с кольцевой схемой питания применяются в высоковольтных подземных кабельных сетях общего пользования на городской территории.

### Электроснабжение по двойной магистрали питания

Там, где возможно подключение питания высокого напряжения по двум линиям или кабелям, имеющим начало от одной и той же шины подстанции, часто используется высоковольтное распределительное устройство, подобное устройству кольцевой схемы питания (см. [рис. В13](#)).

Главным различием в работе между устройствами этих схем является то, что входные цепи здесь взаимно блокируются, и поэтому одновременно может быть включен только один вводной выключатель, т.е. его включение предотвращает включение другого.

При потере питания, включенный выключатель должен отключиться, а другой (до этого момента отключенный) выключатель на вводной линии может быть включен.

Последовательность включения/отключения выключателей может быть реализована вручную или автоматически.

Такой тип распределительной схемы используется, главным образом, в сетях с высокой плотностью нагрузки и на быстро растущих городских территориях, питаемых от высоковольтных подземных кабельных сетей.

## 1.3 Некоторые эксплуатационные аспекты работы распределительных сетей ВН

### Воздушные линии

Сильные ветры, обледенение и т.п. могут привести к соприкосновению проводов воздушных линий, тем самым, вызывая мгновенное (то есть, недолговременное) короткое замыкание. Пробой изоляции из-за повреждений керамических или стеклянных изоляторов, вызванных частицами, находящимися в воздухе, из-за небрежного обращения с оружием или из-за сильно загрязненных поверхностей изоляторов может привести к короткому замыканию на землю.

Многие из этих аварийных режимов самоустраиваются. Например, в сухих условиях поврежденный изолятор очень часто может продолжать работать, не обнаруживая свое повреждение, но во время грозы его пробой на землю (например, на металлическую несущую конструкцию) очень вероятен. Более того, загрязненные поверхности обычно вызывают пробой на землю только во влажных условиях.

Канал прохождения тока короткого замыкания практически всегда принимает форму электрической дуги, интенсивное тепловыделение от которой высушивает каналы прохождения тока и, до некоторой степени, восстанавливает их изоляционные свойства. За это время защитные устройства устранения короткого замыкания обычно успевают сработать, т.е. происходит перегорание предохранителей или отключение выключателя.

Опыт показывает, что в большинстве случаев, восстановление питания путем замены предохранителей или повторным включением выключателя проходит успешно.

По этой причине существует возможность значительно улучшить бесперебойность питания высоковольтных воздушных распределительных сетей путем применения схем автоматического повторного включения (АПВ) выключателей в начале данных сетей.

Такие автоматические схемы позволяют осуществлять несколько операций повторного включения, если первая попытка не удастся, с регулируемым временем задержки между последовательными попытками (чтобы произошла деионизация воздуха в месте короткого замыкания), до срабатывания блокирующего устройства автоматического выключателя после всех (обычно трех) неудачных попыток.

Бесперебойность электроснабжения достигаются и путем дистанционного управления секционными выключателями и автоматическими разъединителями, работающими совместно с выключателем автоматического повторного выключения.

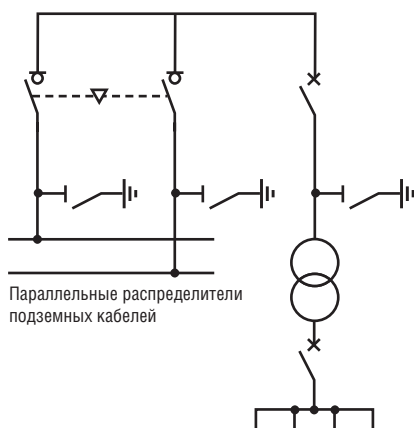
Последняя схема проиллюстрирована последовательностями, показанными на [рис. В14](#) на следующей странице.

Принцип действия заключается в следующем: если после двух попыток автоматического повторного выключения (АПВ) выключатель отключается, короткое замыкание считается долговременным, и, пока источник отключен, линия обесточена, линейный выключатель отключен, для того, чтобы изолировать часть сети до третьей попытки АПВ.

В этом случае возможны два варианта:

- изолируемая линейным выключателем сеть (система);
- короткое замыкание в секции, находящейся выше по цепи линейного сетевого выключателя.

В этом случае выключатель отключится и заблокируется. Таким образом, схема сетевого линейного выключателя предоставляет возможность восстановления подачи питания некоторым потребителям в случае возникновения долговременного короткого замыкания.



Параллельные распределители  
подземных кабелей

Рис. В13: Электроснабжение от двойной магистрали

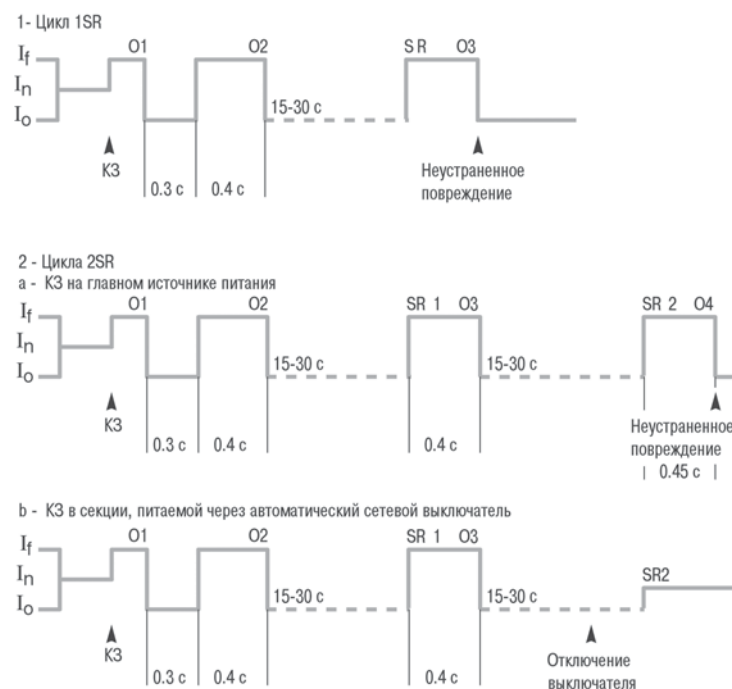


Рис. B14: Циклы автоматического повторного включения выключателя, управляющего высоковольтным радиальным распределителем

Несмотря на то, что эти меры значительно улучшили надежность питания от высоковольтных воздушных линий, потребители должны, там где это необходимо, применять свои собственные устройства, противодействующие возникновению мгновенных перебоев питания (между повторными включениями), например:

- бесперебойный резервный источник питания;
- освещение, не требующее охлаждения перед повторным включением.

## Подземные кабельные сети

Короткие замыкания в подземных кабельных сетях иногда вызваны плохим качеством работы монтеров-кабельщиков или кабелеукладчиков, но в большинстве случаев связаны с повреждениями, нанесенными инструментами, например, киркой, пневматической дрелью или землеройной машиной, используемыми другими коммунальными службами.

Пробой изоляции иногда происходит в вводно-кабельных шкафах из-за перенапряжений, в особенности, в тех местах высоковольтной системы, где воздушная линия соединяется с подземным кабелем. В этом случае, перенапряжение обычно возникает из-за электромагнитных возмущений в атмосфере с учетом эффекта отражения электромагнитных волн, они в соединительной коробке «В-Л-Кабель» (где резко изменяется волновое сопротивление цепи) могут достигать значений, при которых происходит пробой изоляции. В таких местах часто устанавливаются устройства защиты от перенапряжений, такие как разрядники.

Короткие замыкания в кабельных сетях возникают реже, чем в воздушных линиях, но они практически всегда являются долговременными, что требует больше времени для их обнаружения и ремонта, чем в воздушных линиях.

При возникновении короткого замыкания в кольцевой схеме питания, подачу питания всем потребителям можно быстро восстановить, когда выявлена поврежденная часть кабеля.

Однако, если короткое замыкание возникнет в радиальной линии (фидере), задержка в его обнаружении и выполнении ремонтных работ может занять несколько часов, и окажет влияние на всех потребителей, находящихся ниже по цепи от места возникновения короткого замыкания. В случае, если бесперебойное питание очень важно для всех или нескольких установок, необходимо обеспечить резервный источник питания. Оборудование резервного источника питания описано в главе E, разделе 1.4.

## Дистанционное управление высоковольтными сетями

Дистанционное управление высоковольтными линиями питания полезно для уменьшения времени простоя в случае возникновения короткого замыкания кабеля, так как оно предоставляет собой быстрое и эффективное средство для образования кольцевой схемы питания. Это достигается при помощи телеуправляемых выключателей с моторным приводом, установленных на некоторых подстанциях в составе кольцевой схемы и связанных с соответствующими центрами дистанционного управления. На подстанцию с дистанционным управлением всегда можно подать питание через дистанционную команду, тогда как остальным абонентам придется ожидать последующих ручных операций.

Централизованное дистанционное управление, основанное на системе SCADA (диспетчерское управление и сбор данных) и современных работах в области информационных технологий, находит все более широкое применение в странах, в которых сложность сильно взаимосвязанных систем оправдывает затраты.

## 2 Процедура создания новой подстанции

В14

Крупные потребители электроэнергии, как правило, питаются от сети высокого напряжения.

В сетях низкого напряжения на 120/208 В (3 фазы, 4 провода), нагрузка в 50 кВА может считаться «большой», тогда как в 3-фазной сети на 240/415 В «крупный» потребитель может иметь нагрузку, превышающую 100 кВА. Оба типа сетей низкого напряжения широко применяются по всему миру. Кстати, МЭК рекомендует использовать в качестве «мирового» стандарта напряжение 230/400 В для 3-фазных 4-проводных сетей. Это компромиссный уровень, который позволит существующим сетям, работающим на напряжениях 220/380 В и 240/415 В, или близко к этим значениям, соответствовать стандарту, просто за счет использования соответствующих отпайек (имеющихся на стандартных распределительных трансформаторах) и переключателя отпайек (без нагрузки).

Расстояние, на которое требуется передача электроэнергии, является еще одним фактором, учитываемым при выборе сети высокого или низкого напряжения. Наглядным примером является обслуживание небольших, но удаленно расположенных сельских потребителей.

Решение выбора сети питания низкого или высокого напряжения будет зависеть от местных условий и соображений, описанных выше, и обычно принимается поставщиками энергии для данного района.

Когда принято решение о питании от высоковольтной сети, имеется два широко распространенных метода действий:

**1-** Поставщик электроэнергии строит стандартную подстанцию близко к месту расположения потребителя, но понижающий трансформатор (ы) расположен(ы) внутри помещений потребителя, близко к центру нагрузки.

**2-** Потребитель сам строит и оснащает подстанцию на собственной территории, к которой поставщик энергии производит подключение высоковольтной линии.

При методе **1** поставщик энергии владеет подстанцией, кабелями, ведущими к трансформатору, самим трансформатором и помещением для его размещения, куда поставщик имеет неограниченный доступ.

Помещение для трансформатора сооружается потребителем (согласно планам и требованиям, предоставленным поставщиком) и включают в себя цоколи, маслоотводы, стены и потолки в противопожарном исполнении, вентиляцию, освещение и системы заземления; все это должно быть одобрено представителем поставщика.

Структура тарифов покрывает согласованную часть затрат, требуемых для предоставления услуг. Независимо от выбранного метода, при разработке концепции и реализации проекта должны применяться одни и те же принципы. Примечания ниже относятся к методу **2**.

Потребитель должен предоставить поставщику определенные данные на самой ранней стадии проекта.

### 2.1 Предварительная информация

Перед началом любых переговоров и обсуждений с представителями поставщика, потребитель должен иметь следующие данные:

#### Максимальная ожидаемая потребность в мощности (кВА)

Определение этого значения описано в главе В, и оно должно учитывать возможность дополнительного увеличения нагрузки в будущем. Коэффициенты, которые нужно знать на данном этапе:

- коэффициент использования оборудования ( $k_u$ );
- коэффициент одновременности нагрузки ( $k_s$ ).

#### Планы территории с указанием высотных отметок и места предлагаемого размещения подстанции

На планах должны быть ясно указаны средства доступа к будущей подстанции, с указанием размеров и возможных ограничений, то есть, размеры входных коридоров и высота потолка, возможные ограничения по весовой нагрузке, принимая во внимание, что:

- персонал поставщика энергии должен иметь свободный и неограниченный доступ к высоковольтному оборудованию подстанции в любое время;
- доступ в подстанцию разрешен только квалифицированному и уполномоченному персоналу;
- иногда поставщики энергии или действующие правила требуют, чтобы часть установки, управляемая поставщиком, была расположена отдельно от части установки, управляемой потребителем.

#### Требуемая степень бесперебойности питания

Потребитель должен оценить последствия перебоев в поставке электроэнергии, в длительности перебоев, соотнесенной с:

- производственными потерями;
- безопасностью персонала и сохранностью оборудования.

Поставщик энергии должен предоставить специальную информацию предполагаемому потребителю.

Поставщик должен официально утвердить оборудование, устанавливаемое на подстанции и предлагаемые методы его монтажа.

После испытаний и проверки подстанции независимым органом, выдается сертификат, разрешающий ввод подстанции в эксплуатацию.

### 2.2. Изучение проекта

На основе информации, предоставленной потребителем, поставщик электроэнергии должен указать:

**Тип предлагаемого электропитания и определить:**

- тип сети питания: воздушная линия или подземный кабель;
- детали подключения : одна линия питания, кольцевая схема или параллельные линии питания;
- предельную мощность (разрешенную системой) подключаемой нагрузки и уровень тока короткого замыкания.

**Номинальное и максимальное напряжение**

Самое высокое напряжение для оборудования, существующее или будущее, в зависимости от планов развития системы

**Детали учета потребления, которые указывают:**

- стоимость подключения к сети питания;
- детали тарифов: тарифы на потребление и за установленную мощность.

### 2.3 Реализация

Перед началом любых работ по установке должно быть получено официальное согласие от поставщика энергии. Запрос на согласие поставщика должен включать следующую информацию, основанную на предварительном обмене документацией, который был описан выше:

- расположение предполагаемой подстанции;
- однолинейную схему цепей питания и соединений, вместе с предложениями по цепям заземления;
- полное детальное описание электрооборудования, устанавливаемого на подстанции, включая его характеристики;
- план расположения оборудования и устройств измерения энергии;
- предпринятые меры для увеличения коэффициента мощности, если такое потребуются;
- предпринятые меры для организации резервного аварийного питания (высоковольтного или низковольтного), если таковое потребуется.

### 2.4 Ввод в эксплуатацию

Если по требованиям контролирующих органов необходимо проведение испытаний электрооборудования, то после их успешного завершения выдается разрешение на подключение электроустановки к сети питания. Если таких испытаний не требуется, то рекомендуется провести следующие проверочные испытания:

- измерение сопротивления заземляющих электродов;
- проверку целостности цепей заземления и уравнивания потенциалов;
- наружный осмотр и проверку всех высоковольтных устройств;
- проверку изоляции высоковольтного оборудования;
- проверку трансформаторного масла (и масла распределительных устройств, если имеется) на диэлектрическую прочность;
- проверку и испытание низковольтного оборудования подстанции;
- проверку всех внутренних блокировок (механические ключи и электрические блокировки) и последовательности всех автоматических операций;
- проверку правильности работы защитных реле и их уставок.

Также необходимо проверить, что оборудование установлено полностью, чтобы любая, должным образом выполненная, операция могла завершиться полностью и безопасно. После получения сертификата соответствия (если требуется):

- персонал поставщика подает питание на высоковольтное оборудование и проверяет правильность работы устройств учета электроэнергии;
- подрядчик отвечает за испытание и подключение низковольтного оборудования.

Когда подстанция полностью введена в действие:

- подстанция и все оборудование принадлежит потребителю;
- поставщик осуществляет эксплуатационный контроль над высоковольтным распределительным оборудованием подстанции, например, над обоими вводными выключателями и высоковольтным выключателем трансформатора, в случае устройства кольцевой схемы питания, вместе со всеми связанными с ним высоковольтными заземляющими разъединителями;
- персонал поставщика имеет неограниченный доступ к высоковольтному оборудованию;
- абонент имеет независимый контроль только над высоковольтным выключателем трансформатора(ов), отвечает за техническое обслуживание всего оборудования подстанции и должен подавать запрос поставщику на отключение и заземление коммутационной аппаратуры, в целях проведения работ по техобслуживанию. Поставщик должен выдать письменное разрешение на проведение работ по техобслуживанию персоналом потребителя, вместе с ключами от открытых разъединителей и других элементов, которые были отсоединены от сети.



Защита от поражения электрическим током и перенапряжений тесно связана с обеспечением эффективного заземления (с малым сопротивлением) и с эффективным применением принципов выравнивания потенциалов.

Предмет защитных мер в электроэнергетике очень обширен: он включает в себя все аспекты безопасности персонала, защиту от повреждения и разрушения собственности, производства и оборудования.

Различные аспекты защиты можно классифицировать следующим образом:

- защита персонала и животных от опасностей перенапряжения и поражения электрическим током, возгораний, взрывов, отравления токсичными газами и т.д.;
- защита производства, оборудования и компонентов сети питания от коротких замыканий, атмосферных воздействий (молнии) и нестабильности сети питания (потеря синхронизма) и т.д.;
- защита персонала и оборудования от опасностей сбоев в работе системы электроснабжения, путем использования электрических и механических блокировок. Все классы коммутационных устройств (включая, например, устройства регулирования напряжения под нагрузкой на трансформаторах и т.п.) имеют ясно определенные операционные ограничения. Это означает, что порядок, в котором различные типы переключателей могут быть безопасно разомкнуты, или замкнуты, существенно важен. Чтобы обеспечить строгое соблюдение правильных операционных последовательностей, часто используются ключи блокировки и аналогичные цепи электрического управления.

Полное описание многочисленных схем защиты, доступных инженерам электросетей, находится за рамками данного Руководства, но мы надеемся, что нижележащие разделы, описывающие общие принципы защиты, будут полезны. Хотя некоторые из описываемых защитных устройств имеют общее применение, описание в основном будет касаться тех устройств, которые широко используются в высоковольтных и низковольтных сетях, как указано в пункте 1.1 данной главы.

### 3.1 Защита от поражения электрическим током

Защитные меры от поражения электрическим током учитывают две основных опасности:

- Контакт с активным проводом, то есть, находящимся под напряжением по отношению к земле при нормальных обстоятельствах. Это называется «прямым прикосновением».
- Контакт с токоведущей частью оборудования, которая обычно не находится под напряжением, но которая в данный момент стала токоведущей из-за неисправности в изоляции оборудования. Это называется «косвенным прикосновением».

Следует заметить, что существует третий тип опасности поражения током, который может иметься вблизи от высоковольтных или низковольтных (или смешанных) электродов заземления, по которым проходит ток замыкания на землю. Эта опасность возникает из-за разности потенциалов на поверхности почвы и называется «шаговым напряжением». При этом ток входит в тело через одну ногу и выходит через другую, что особенно опасно для четвероногих животных. Вариантом этой опасности является «напряжение прикосновения», например, когда заземленная металлическая часть расположена в области, где существует разность потенциалов.

Прикосновение к этой части оборудования может привести к прохождению тока через руку и обе ноги.

Животные со сравнительно большим расстоянием между передними и задними ногами особенно чувствительны к шаговому напряжению, имеются случаи смерти скота от разности потенциалов, возникающей из-за недостаточно низкого сопротивления электрода заземлителя нейтрали в сети 230/240 В.

Описанные выше проблемы разности потенциалов обычно не встречаются в электроустановках, расположенных в зданиях, при условии, что проводники системы уравнивания потенциалов правильно соединяют все открытые металлические части оборудования и все внешние металлические конструкции (которые не являются частью оборудования, например, стальные рамы и т.д.) с защитным заземляющим проводником.

#### Защита от прямого прикосновения

Главной формой защиты от прямого прикосновения является размещение всех токоведущих частей в корпусах из изоляционного материала или в металлических заземленных корпусах, их расположение вне пределов досягаемости (за изолированными барьерами или на столбах), либо путем установки ограждений.

Там, где изолированные токоведущие части закрыты в металлический кожух, например, трансформаторы, электродвигатели и многие бытовые приборы, металлический кожух должен быть подсоединен к системе защитного заземления.

Для высоковольтных КРУ, стандарт МЭК 62271-200 (комплектные распределительные устройства и механизмы управления переменного тока в металлическом кожухе, рассчитанные на номинальные напряжения от 1 до 52 кВ включительно) определяет минимальный индекс защиты (кодировка IP), равный IP2X, который обеспечивает защиту от прямого прикосновения. Более того, металлический кожух должен обладать электрической непрерывностью и оборудование, размещаемое внутри кожуха не должно соприкасаться с его (кожуха) внутренней поверхностью. Надлежащее заземление кожуха улучшает электрическую защиту операторов при нормальных рабочих условиях.

Для низковольтных приборов заземление реализуется через третий штырь в 3-штыревых вилках и розетках. Полное или даже частичное повреждение изоляции металла может (в зависимости от соотношения сопротивления утечки, через изоляцию к сопротивлению металлического кожуха на землю) поднять напряжение кожуха до опасного уровня.

### Защита от косвенного прикосновения

Когда человек дотрагивается до металлического кожуха аппарата с неисправной изоляцией, как описано выше, он совершает косвенное прикосновение.

Косвенное прикосновение характеризуется тем, что присутствует утечка тока на землю (через защитный заземляющий провод), параллельно с током, протекающим через человека.

#### В случае наличия повреждения изоляции низковольтной сети

Многочисленные тесты показали что, если потенциал металлического кожуха не превышает 50 В<sup>(1)</sup> по отношению к земле или любому проводящему материалу в пределах досягаемости, он опасности не представляет.

#### Опасность косвенного прикосновения в случае повреждения изоляции высоковольтной сети

Если произошло повреждение изоляции аппарата между высоковольтным проводником и металлическим кожухом, обычно невозможно ограничить скачок напряжения кожуха значением 51 В или менее, просто путем уменьшения заземляющего сопротивления. Подходящим решением в этом случае будет создание эквипотенциальной ситуации, как описано в пункте 1.1 «Системы заземления».

## 3.2 Защита трансформатора и линий

### Общие положения

Электрооборудование и цепи подстанции должны быть защищены, чтобы избежать или контролировать повреждения, вызываемые сверхтоками и/или сверхнапряжениями. Все оборудование, обычно используемое в электроустановках, имеет стандартные значения допустимых кратковременных перегрузок по току и напряжению. Роль защитной системы — обеспечить, чтобы эти допустимые пределы никогда не превышались. В общем случае это значит, что условия повреждения должны быть ликвидированы как можно скорее, с обязательным обеспечением взаимодействия между устройствами защиты, расположенными выше и ниже относительно защищаемого оборудования. Это означает, что если в сети имеется повреждение, обычно его одновременно регистрируют несколько устройств защиты, но только одно устройство должно действовать.

Такими устройствами могут быть:

- плавкие предохранители (ПП), ликвидирующие ток повреждения напрямую, или с помощью механического отключающего устройства, которое отключает связанный с ним трехфазный выключатель нагрузки;
- реле, которые действуют опосредованно на отключающую катушку выключателя.

### Защита трансформатора

#### Перенапряжения в системе электроснабжения

Иногда в сети питания могут возникать перенапряжения:

- Атмосферные перенапряжения  
Атмосферные перенапряжения вызываются ударом молнии, попадающей на линию или рядом с воздушной линией электропередач.
- Коммутационные перенапряжения, являющиеся следствием эксплуатационных переключений в системе электроснабжения.

Внезапное изменение установившихся рабочих условий в электрической цепи вызывает различные кратковременные явления. Обычно это броски напряжения, высокочастотные или с затухающими колебаниями.

Для обоих типов бросков напряжения устройством защиты от перенапряжения обычно является варистор (на основе оксида цинка).

В большинстве случаев, защита от перенапряжения не действует на коммутационную аппаратуру.

#### Токковые перегрузки

Перегрузка трансформатора часто случается из-за одновременного потребления тока множеством небольших нагрузок или увеличением потребления полной мощности (кВА) всей электроустановкой, что вызвано расширением предприятия, постройкой новых зданий и т.д. Увеличение нагрузки повышает температуру обмоток и изоляционного материала. В результате, повышение температуры ведет к снижению срока службы оборудования. Устройства защиты от перегрузки могут располагаться на стороне первичной или вторичной обмотки трансформатора.

Защита от перегрузки трансформатора обеспечивается электронным реле, которое отключает выключатель на стороне вторичной обмотки трансформатора. Такие реле, обычно называемые реле цифровой перегрузки, искусственно рассчитывают температуру, учитывая постоянную времени обмотки трансформатора.

(1) В сухих местах, 25 В - во влажных местах (ванные комнаты и т.д.).

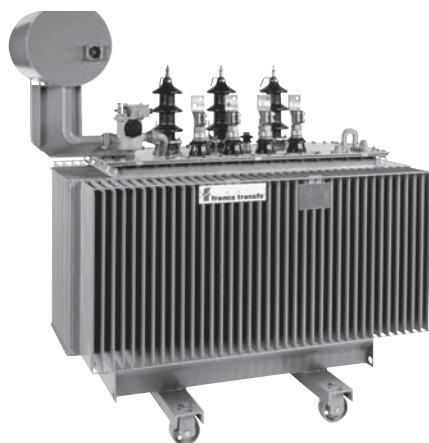


Рис. 15: Трансформатор с расширительным баком для масла

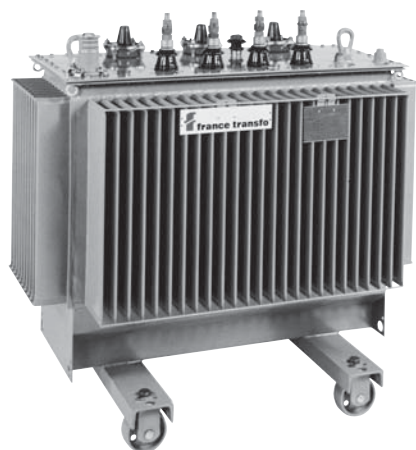


Рис. 16: Трансформатор с полным заполнением маслом

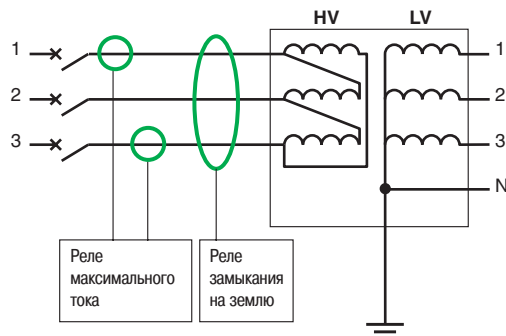


Рис. 17: Защита от КЗ на высоковольтной обмотке трансформатора

Некоторые из них способны учитывать эффект гармонических токов, вызываемых нелинейными нагрузками (выпрямители, компьютерное оборудование, преобразователи скорости вращения и т.д.). Реле этого типа также способны предсказать время, через которое произойдет отключение по перегрузке и время ожидания после отключения. Эти данные очень полезны для операций по снижению нагрузке.

Дополнительно, масляные трансформаторы часто имеют термостаты с двумя установленными значениями, для сигнализации и отключения.

Сухие трансформаторы используют датчики температуры, встроенные в самую горячую часть изоляции обмотки в целях сигнализации и отключения.

### Внутренние повреждения

Для трансформаторов с расширительным баком для масла и воздушной подушкой, защита от внутренних повреждений обеспечивается устройствами, которые монтируются на трансформатор, а именно, классическими механическими газовыми реле (реле Buchholz) (см. рис. 15). Эти реле могут обнаружить медленное накопление газов, возникающих в результате начального искрения при пробое изоляции обмотки или из-за поступления (входа) воздуха в результате утечки масла. Этот первый уровень обнаружения обычно приводит к срабатыванию сигнализации, но если условия продолжают ухудшаться, второй уровень обнаружения приводит к отключению автоматического выключателя (AB), расположенного выше.

Функция обнаружения резкого подъема масла в реле Buchholz «мгновенно» отключает вышеразмещенный выключатель, если в трубке, соединяющей главный бак масла с баком расширителя, произойдет резкий подъем уровня масла (масляная волна).

Такая волна может возникать из-за резкого подъема масла, вызванного быстро образовавшимся газовым пузырем, который появился в результате тока короткого замыкания под маслом.

В настоящее время имеются трансформаторы с полным заполнением маслом мощностью до 10 MVA, имеющие специальные радиаторы - охладители масла.

Расширение масла не сопровождается чрезмерным подъемом давления, благодаря эффекту «растягивания мхов» радиаторных элементов. Полное описание этих трансформаторов дано в разделе 4.4 (см. рис. 16).

Очевидно, устройства Buchholz, о которых речь шла выше, не могут быть применены в такой конструкции, однако, были разработаны их современные заменители, которые измеряют:

- накопление газа;
- повышение давления;
- повышение температуры.

Первые два условия отключают вышеразмещенный выключатель, а третье условие отключает выключатель, расположенный ниже относительно трансформатора.

### Внутреннее короткое замыкание между фазами

Внутреннее КЗ между фазами могут обнаружить и ликвидировать следующие устройства:

- 3 плавких предохранителя на первичной обмотке трансформатора или
- реле максимального тока, которое размыкает выключатель выше от трансформатора.

### Внутреннее короткое замыкание фаза-земля

Это наиболее распространенный тип внутреннего повреждения. Оно может быть обнаружено с помощью реле замыкания на землю. Ток КЗ можно вычислить, суммируя 3 фазных тока первичной обмотки (если используются 3-фазные трансформаторы) или используя специальный трансформатор нулевой последовательности.

Если нужна большая чувствительность, предпочтительнее использовать специальные трансформаторы тока нулевой последовательности. В этом случае можно использовать только два трансформатора тока (см. рис.17).

### Защита цепей

Защита цепей, расположенных на стороне низкого напряжения трансформатора, должна удовлетворять требованиям стандарта МЭК 60364.

### Различие между устройствами высокого и низкого напряжения для защиты трансформатора

Подстанция потребителя электроэнергии с измерением энергии на стороне низкого напряжения требует селективной работы высоковольтных предохранителей, или выключателей и низковольтных автоматических выключателей, или предохранителей. Номинал высоковольтных предохранителей должен выбираться в соответствии с характеристиками трансформатора.

Характеристики отключения низковольтного автоматического выключателя должны быть такими, чтобы в условиях перегрузки или КЗ ниже от выключателя, он отключался бы достаточно быстро, чтобы предотвратить воздействие сверхтока на высоковольтные предохранители и выключатель.

Кривые зависимости времени отключения предохранителей, выключателя ВН и выключателей НН даны на графиках зависимости времени отключения устройств и тока, проходящего через них. Обе



кривые имеют общую обратно зависимую характеристику "время/ток" (с резким разрывом в кривой выключателя при значении тока, превышающим значение, при котором происходит «мгновенное» отключение).

Типичный вид этой зависимости показан на **Рис. 18**.

■ Чтобы обеспечить селективность:

Кривая предохранителя ВН должны находиться выше и правее кривой автоматического выключателя.

■ Чтобы предохранители не срабатывали (то есть, не перегорали):

Все части минимальной преддуговой кривой предохранителя должны располагаться правее кривой выключателя в 1,35 раз и более (например, там, где в момент времени  $T$ , кривая выключателя проходит через точку 100 А, кривая предохранителя должна проходить через точку 135 А или выше и т.д.), а все части кривой предохранителя должны располагаться выше кривой выключателя в 2 раза и более (например, там, где при значении тока  $I$  кривая выключателя проходит через точку 1,5 с, кривая предохранителя при том же значении тока должна проходить через точку, соответствующую 3 с или более и т.д.).

Коэффициенты 1,35 и 2 основаны на стандартных максимальных допусках, применяемых при изготовлении плавких предохранителей (ПП) и высоковольтных автоматических выключателей.

Чтобы сравнить две кривые, высоковольтные токи нужно конвертировать в эквивалентные низковольтные токи, и наоборот.

Там, где используется низковольтный выключатель с плавким предохранителем, также должно обеспечиваться подобное разделение кривых высоковольтного и низковольтного предохранителей.

■ Чтобы не срабатывала защита высоковольтного автоматического выключателя:

Все части минимальной преддуговой кривой предохранителя должны располагаться правее кривой выключателя в 1,35 раз и более (например, там, где в момент времени  $T$ , кривая низковольтного автоматического выключателя проходит через точку 100 А, кривая высоковольтного выключателя должна проходить через точку 135 А или выше, и т.д.), а все части кривой высоковольтного автоматического выключателя должны располагаться выше кривой низковольтного (время низковольтного выключателя должно быть менее или равно значению времени высоковольтного минус 0,3 с).

Коэффициенты 1,35 и 0,3 основаны на стандартных максимальных допусках для высоковольтных трансформаторов тока, реле защиты высоковольтного оборудования и низковольтных автоматических выключателей. Чтобы сравнить две кривые, высоковольтные токи нужно конвертировать в эквивалентные низковольтные токи, и наоборот. Эти требования проиллюстрированы на **рис. B19**.

Там, где используется низковольтный выключатель с ПП, также должно обеспечиваться подобное разделение кривых высоковольтного и низковольтного предохранителей.

## Выбор устройства защиты на стороне первичной обмотки трансформатора

Как объяснено выше, при малых значениях величины тока срабатывание (уставки) защиты может быть реализована плавкими предохранителями или выключателем.

Когда величина тока уставки срабатывания велика, защита осуществляется выключателем АВ, который обеспечивают более чувствительную защиту трансформатора, чем плавкие предохранители. Также, при применении выключателей, легче реализовать дополнительные меры защиты (защита от тока короткого замыкания на землю, защита от тепловой перегрузки).

## 3.3 Блокировки и обусловленные операции

Механические и электрические блокировки входят в состав механизмов и цепей управления оборудованием подстанций, как и меры защиты от неправильных действий обслуживающего персонала.

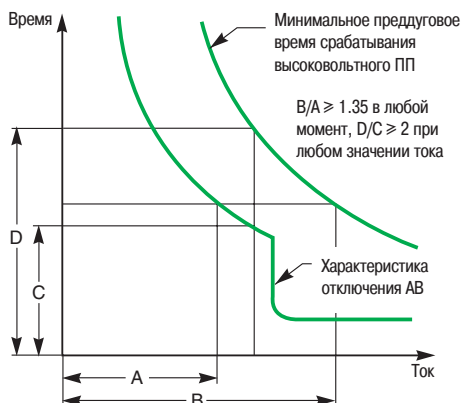
Механическая защита от нарушения требуемой последовательности воздействия на устройства, расположенные в разных местах, обеспечивается взаимоблокировкой устройств с передачей ключа.

Целью схемы защиты является предотвращения любого неправильного действия персонала. Некоторые из этих операций могут повлечь за собой опасность для персонала, а другие могут привести к повреждению электрооборудования.

### Основные блокировки

Основные функции блокировок могут быть представлены в одном функциональном блоке; некоторые из этих функций обязательны, согласно стандарту МЭК 62271-200, а другие могут быть реализованы по выбору пользователя.

Для получения доступа к высоковольтной коммутационной аппаратуре требуется совершить ряд операций в установленном порядке. Чтобы привести систему к ее прежнему состоянию, необходимо выполнить операции в обратном порядке. В дополнение к правильному выполнению процедур, нужную последовательность операций могут обеспечить специальные блокировки. После этого



**Рис. B18:** Селективность в работе высоковольтного ПП и низковольтного автоматического выключателя, установленных для защиты трансформатора



**Рис. B19:** Работа высоковольтного плавкого предохранителя и низковольтного автоматического выключателя

отсек, куда совершается доступ, будет иметь статус «доступен по блокировке» или «доступен по процедуре». Даже для пользователей, правильно выполняющих строгие процедуры, использование блокировок обеспечивает дополнительную защиту персонала.

### **Взаимоблокировка устройств ключом**

Кроме блокировок на отдельном функциональном устройстве (также см. п. 4.2), наиболее широко используемая форма блокировки устройств основана на принципе передачи ключа.

Принцип основан на возможности передачи одного или нескольких ключей (без которых невозможно выполнить те или иные операции) только при выполнении определенных условий.

Например: запрет или разрешение на работу одного или нескольких ключей.

Эти условия можно комбинировать в уникальные или обязательные последовательности, таким образом, гарантируя безопасность персонала и оборудования путем недопущения ошибочных действий персонала.

Несоблюдение правильной последовательности операций в обоих случаях может иметь очень серьезные последствия, как для персонала, так и для оборудования.

**Примечание:** важно продумать схему блокировки устройств на стадии проектирования понижающей подстанции. Таким образом, оборудование будет изготовлено и установлено правильным образом, с обеспечением совместимости ключей и устройств блокировки.

### **Надежность электроснабжения**

Для конкретного распределительного щита определение доступных отсеков, а также условий доступа к ним, и классификация перерывов в электроснабжении приведены в стандарте МЭК 62271-200. Использование блокировок, устройств или только правильных процедур не оказывает никакого влияния на непрерывность поставки энергии. Только запрос на доступ к конкретной части оборудования, при нормальных рабочих условиях, приводит к появлению ограничивающих, более или менее строгих условий относительно непрерывности поставки энергии.

### **Взаимоблокировки устройств в подстанциях**

В распределительной понижающей подстанции, которая включает в себя:

- одну вводную ячейку высокого напряжения или две вводных ячейки (от параллельных фидеров), или две ячейки (вводная/отходящая) для кольцевой схемы;
- ячейку защиты трансформатора, которая может включать в себя комбинированный выключатель нагрузки / разъединитель с высоковольтными предохранителями и заземляющий разъединитель, или выключатель и разъединитель, вместе с заземляющим разъединителем;
- отсек трансформатора.

Блокировки устройств позволяют осуществить доступ и действия с различными ячейками в следующих условиях:

#### **Основные блокировки, встроенные в функциональные блоки**

- Работа выключателя нагрузки/ вводного разъединителя:
  - если дверца ячейки закрыта и связанный с ней заземляющий разъединитель отключен.
- Работа линейного разъединителя до выключателя для защиты трансформатора:
  - если дверца ячейки закрыта и
  - если выключатель и заземляющий разъединитель(и) отключены.
- Включение заземляющего разъединителя.
  - если соответствующий вводной (линейный) разъединитель(и) отключен(ы)<sup>(1)</sup>.
- Доступ к отсекам каждой ячейки, если были предусмотрены блокировки:
  - если разъединитель линии данной ячейки отключен, а заземляющий разъединитель(и) включен(ы).
- Закрытие дверцы каждого доступного отсека, если были предусмотрены блокировки:
  - если заземляющий разъединитель(и) отсека включен(ы).

#### **Функциональные взаимоблокировки устройств, включающие в себя несколько функциональных блоков или единиц оборудования**

- Доступ к клеммам понижающего трансформатора:
  - если выключатель начального функционального блока разомкнут, а его заземляющий разъединитель замкнут. Учитывая возможность обратного тока со стороны низкого напряжения, необходимо обратить внимание на состояние главного выключателя цепи низкого напряжения.

### **Практический пример**

В подстанции потребителя электроэнергетики с измерением потребления на стороне низкого напряжения наиболее часто используется следующая схема блокировок: высокое напряжение/ низкое напряжение/трансформатор.

Целью блокировки является:

(1) Если заземляющий разъединитель стоит на входной цепи, связанные с ним разъединители находятся на обоих концах цепи и надлежащим образом заблокированы. В такой ситуации используется блокировка ключом нескольких устройств.

■ предотвращение доступа в трансформаторный отсек, если заземляющий разъединитель не был перед этим замкнут.

■ предотвращение включения заземляющего разъединителя в распределительной и защитной панели трансформатора, если автоматический выключатель низкого напряжения не был перед этим заблокирован в положении отключен.

Доступ к клеммам высокого или низкого напряжения трансформатора, защищенного со стороны высокого напряжения коммутационной и защитной аппаратурой, содержащей высоковольтный выключатель нагрузки/вводной разъединитель, плавкие предохранители, и заземляющий разъединитель, должен выполняться в строгом соответствии с процедурой, которая была описана выше, и проиллюстрирована на **рис. В20**.

**Примечание:** Трансформатор в этом примере снабжен вторичными кабельными вводами для высокого напряжения, которые можно удалить, только разблокировав устройство блокировки, общее для вводов всех трех фаз.<sup>(1)</sup>

Высоковольтный выключатель нагрузки механически связан с высоковольтным заземляющим разъединителем, так, что только один из выключателей может быть включен, то есть включение одного выключателя автоматически блокирует включение другого.

## Процедура отключения и заземления силового трансформатора и снятия высоковольтных защищенных кабельных вводов (или их защитной крышки)

### Начальные условия

- Высоковольтный выключатель-разъединитель нагрузки/ и низковольтный автоматический выключатель цепи включены.
- Высоковольтный заземляющий разъединитель зафиксирован в отключенном положении ключом «О»
- Ключ «О» заблокирован при включенном положении низковольтного выключателя.

### Шаг 1

- Отключите низковольтный выключатель и зафиксируйте его в отключенном положении ключом «О».
- Ключ «О» при этом разблокируется.

### Шаг 2

- Отключите высоковольтный выключатель.
- Проверьте, что индикаторы наличия напряжения не горят, когда высоковольтный выключатель отключен.

### Шаг 3

- Разблокируйте высоковольтный заземляющий разъединитель ключом «О» и включите его.
- Ключ «О» при этом блокируется.

### Шаг 4

Крышка отсека высоковольтных плавких предохранителей теперь может быть удалена (то есть, ключ освобождается при включении высоковольтного заземляющего разъединителя). На этой панели расположен ключ «S», и он удерживается, когда включен высоковольтный выключатель.

- Поверните ключ «S», чтобы зафиксировать высоковольтный выключатель в отключенном положении.
- Ключ «S» теперь разблокирован.

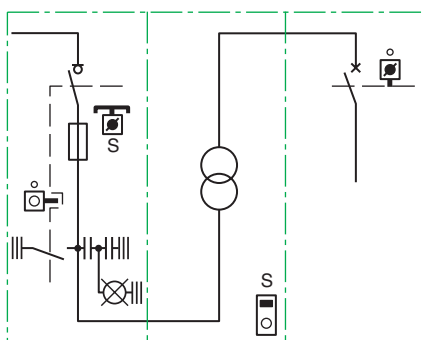
### Шаг 5.

Ключ «S» позволяет удалить общее устройство блокировки вторичных высоковольтных кабельных вводов на трансформаторе или общую защитную клеммную крышку, если она имеется. В обоих случаях, обнажение одной или более клемм приведет к блокированию ключа «S».

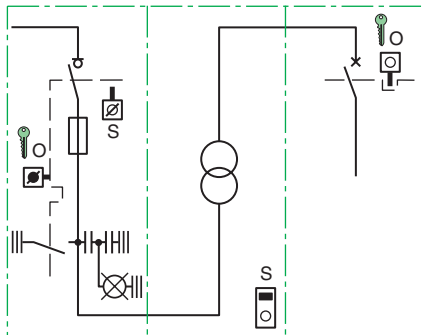
Результат вышеописанной процедуры будет следующим:

- Высоковольтный выключатель зафиксирован в отключенном положении ключом «S».
- Ключом «S» запрещается блокировка клемм трансформатора, пока они открыты.
- Высоковольтный заземляющий разъединитель находится во включенном положении, но не зафиксирован, то есть его можно включить или отключить. При выполнении работ по техобслуживанию, обычно используется навесной замок, чтобы зафиксировать заземляющий разъединитель во включенном положении, ключ от замка находится у инженера, руководящего работами.
- Низковольтный автоматический выключатель фиксируется в отключенном положении ключом «О», который удерживается включенным высоковольтным заземляющим разъединителем. Таким образом, трансформатор надежно отсоединен и заземлен.

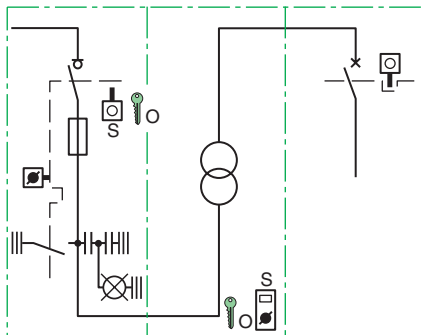
Можно отметить, что вводные выключатели нагрузки, расположенные на стороне высшего напряжения, могут оставаться под напряжением во время описанной процедуры, так как эти клеммы расположены в отдельном отсеке коммутационной аппаратуры, куда нет доступа. Любое другое техническое действие с открытыми клеммами в отсеке, где проводятся работы, требует дальнейшего снятия питания с оборудования и блокировок.



Выключатель высокого напряжения и АВ низкого напряжения включены



Высоковольтные плавкие предохранители доступны



Высоковольтные клеммы трансформатора доступны

### Легенда

- Ключ отсутствует
- Ключ свободен
- Ключ удерживается
- ▬ Панель или дверь

Рис. В20: Пример блокировки трансформатора ВН/НН

(1) Или может быть общая защитная крышка для трех клемм.

## 4 Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении

B22

### 4.1 Общие положения

Подстанция потребителя (абонента) с учетом энергии на стороне низкого напряжения представляет собой электроустановку, подсоединенную к системе электроснабжения с номинальным напряжением 1-35 кВ, с одним понижающим трансформатором, обычно не более 1250 кВА.

#### Функции

##### Подстанция

Все составные части подстанции располагаются в одном помещении, которое находится в уже существующем или в специально построенном здании, внешнем по отношению к основному зданию.

##### Подключение к высоковольтной сети

Подключение к высоковольтной сети может быть выполнено:

- по одному кабелю или по воздушной линии электропередач;
- через два выключателя нагрузки с механической взаимоблокировкой, подключенных к двум кабелям от дублирующих линий питания;
- через два выключателя нагрузки распреустройства кольцевой схемы.

##### Трансформатор

Так как использование трансформаторов на основе ПХБ<sup>(1)</sup> запрещено в большинстве стран, предпочтительными являются:

- масляные трансформаторы для подстанций наружной установки;
- сухие трансформаторы с литой изоляцией для внутренней установки, то есть в многоэтажных зданиях, публичных помещениях и т.д.

##### Снятие показаний

Для измерения потребления энергии в сети низкого напряжения можно использовать небольшие экономичные измерительные трансформаторы. Большинство тарифных планов учитывают потери в трансформаторах.

##### Цепи низкого напряжения

В цепи низкого напряжения должен быть установлен автоматический выключатель (AB), необходимый для отключения от сети, в целях:

- коммутации распределительного щита;
- защиты трансформатора от перегрузки и цепей, расположенных ниже, от коротких замыканий.

##### Однолинейные схемы

Схемы на следующей странице (см. **рис. B21**) представляют различные методы подключения к высоковольтной сети питания, а именно:

- одной линией;
- одной линией (с предусмотренным расширением до кольцевой схемы питания);
- двойное электроснабжение (от двух линий питания);
- кольцевая схема питания.

### 4.2 Выбор комплектных распреустройств (КРУ)

#### Стандарты и технические характеристики

Коммутационная аппаратура и оборудование, описанные ниже, предназначены для сетей номиналом 1-24 кВ и удовлетворяют следующим стандартам: МЭК 62271-200, 60265-1, 60694, 62271-102, 62271-105.

Также, внутренние законы могут требовать соответствия национальным стандартам:

- Франция: UTE
- Великобритания: BS
- Германия: VDE
- США: ANSI

#### Тип оборудования

В дополнение к устройствам кольцевой схемы, описанным в разделе 1.2, используя ячейки КРУ, можно создавать распреустройства для любой схемы подстанции с возможностью дальнейшего ее расширения.

Комплектные подстанции, состоящие из ячеек КРУ, особенно применимы для следующих случаев:

- открытая кольцевая или радиальная сеть;
- суровые климатические условия или высокое загрязнение среды (требуется комплексная изоляция);
- недостаточно места для «классических» распределительных щитов.

Данный тип оборудования характеризуется своими небольшими размерами, интегрированными функциями и операционной гибкостью.

(1) Полихлорированный бифенил

## 4 Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении

B23

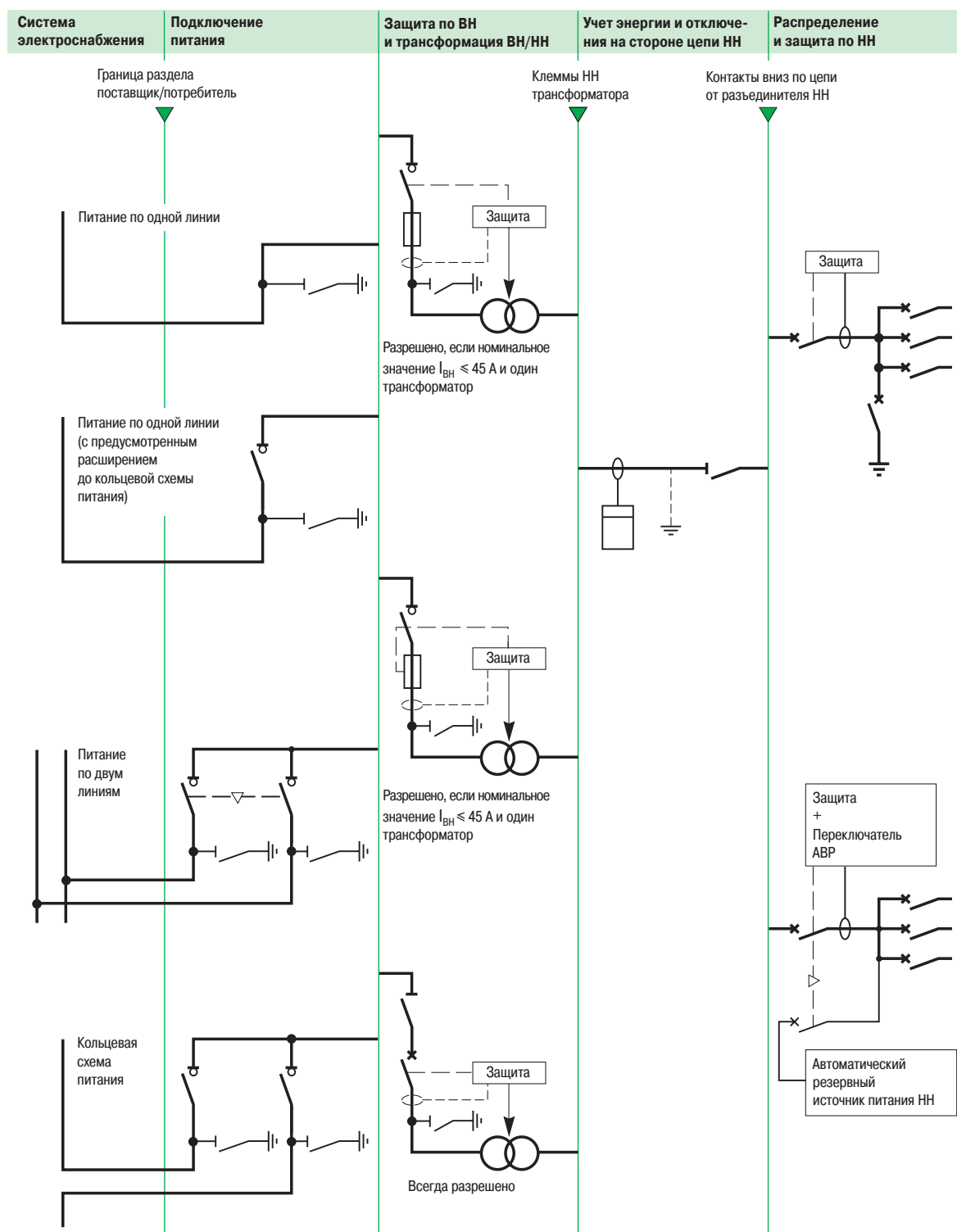


Рис. B21: Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении

## Операционная безопасность ячеек в металлическом корпусе

### Описание

Ниже дано описание ячейки современного выключателя-разъединителя нагрузки (см. **рис. B22**), который включает в себя наиболее современные разработки, позволяющие обеспечить:

- операционную безопасность;
- минимальные требования по месту размещения;
- возможность расширения и гибкость;
- минимальные требования к техническому обслуживанию.

Каждая ячейка включает в себя три отсека:

- Коммутационная аппаратура: выключатель нагрузки-разъединитель встроен в герметичный литой корпус из эпоксидного материала, рассчитанный на весь срок службы.
- Подключение: кабелем к контактам, расположенным на литом корпусе выключателя.
- Сборные шины: модульные, позволяющие собрать любое количество ячеек, образующих распределительный щит и низковольтный отсек для управления и сигнализации, в котором можно разместить аппаратуру автоматики и релейной защиты. При необходимости сверху существующего может быть смонтирован дополнительный отсек.

Кабельные подключения выполняются внутри кабельного отсека на передней части устройства, доступ в который осуществляется путем снятия передней панели отсека.

Отдельные ячейки соединяются электрически, используя готовые секции сборных шин. Сборка на месте осуществляется согласно инструкциям по сборке.

Управление распредустройством облегчается группировкой всех элементов управления и сигнализации на панели управления, расположенной на передней части устройства.

Основными принципами этого коммутационного оборудования являются: операционная безопасность, упрощенный монтаж и минимальные требования к техобслуживанию.

### Меры безопасности внутренней коммутационной аппаратуры

- Выключатель нагрузки-разъединитель полностью соответствует требованиям для «устройства с гарантированным отключением», как определено в стандарте МЭК 62271-102 (предусмотренные меры безопасности для внутренних/встроенных распредустройств).
- Функциональный блок включает в себя основные блокировки, определенные в стандарте МЭК 62271-200 (комплектные распределительные устройства (КРУ) в металлическом кожухе и механизмы управления):
  - ☐ включение этого выключателя невозможно, если не отключен заземляющие силовые и заземляющие разъединители;
  - ☐ включение заземляющего разъединителя возможно только тогда, когда выключатель нагрузки-разъединитель отключен.
- Доступ к кабельному отсеку, который является единственным отсеком, куда имеется доступ пользователя во время работы, защищен следующими блокировками:
  - ☐ открывание панели доступа к кабельному отсеку<sup>(1)</sup> возможно только тогда, когда заземляющий разъединитель включен;
  - ☐ выключатель нагрузки-разъединитель зафиксирован в положении «отключен», когда вышеупомянутая панель доступа открыта. После этого возможно отключить заземляющий разъединитель, например, чтобы провести испытания (проверку) электрической прочности кабелей.

Таким образом, в распредустройстве можно проводить работы без обесточивания сборных шин и кабелей, за исключением блока, где имеется доступ к кабелям. Он удовлетворяет требованиям «Потери непрерывности энергоснабжения» класса LSC2A, как определено в стандарте МЭК 62271-200.

Кроме блокировок, описанных выше, каждая панель КРУ включает в себя:

- встроенные приспособления для навесных замков на рукоятках управления;
- 5 комплектов крепежных отверстий для возможного использования в будущем дополнительных замков.

### Операции

- Ручки управления, рычаги, используемые для операций переключения сгруппированы все вместе на панели, имеющей понятные пиктограммы.
- Рычаги включения идентичны для всех устройств (кроме тех, которые имеются на автоматическом выключателе).
- Операция включения рычагом требует очень небольшого физического усилия.
- Отключение или включение выключателя нагрузки / разъединителя может быть выполнено рычагом или кнопкой для автоматического выключателя.
- Положения выключателей (отключен, включен, взведено) ясно указаны пиктограммами.



Рис. B22: Высоковольтная ячейка с выключателем нагрузки

(1) Там, где используются высоковольтные предохранители, они расположены в этом отсеке.



### 4.3 Выбор высоковольтного оборудования для подключения трансформатора

Обычно применяются три типа коммутационной аппаратуры:

- выключатель нагрузки и отдельные плавкие предохранители ВН;
- комбинация: высоковольтный выключатель нагрузки / плавкие предохранители ВН;
- выключатель.

Для оптимального выбора нужно учитывать несколько параметров:

- ток первичной обмотки трансформатора;
- изоляционная среда трансформатора;
- положение подстанции относительно центра нагрузки;
- номинальное значение мощности трансформатора в кВА;
- расстояние от КРУ до трансформатора;
- использование отдельных защитных реле (в отличие от реле прямого действия).

**Примечание:** предохранители, используемые в комбинации выключатель нагрузки / предохранители, имеют бойки, которые обеспечивают отключение 3-полюсного выключателя нагрузки, при срабатывании одного (или более) предохранителя(ей).

### 4.4 Выбор понижающего трансформатора

#### Характеристики трансформатора

Трансформатор характеризуется, в частности, своими электрическими параметрами, а также технологией изготовления и условиями использования.

#### Электрические характеристики

- Номинальная мощность ( $P_n$ ): условная полная мощность в кВА, на которой основаны конструкция трансформатора и другие величины расчетных параметров, используемых при проектировании. Испытания производителя и гарантии относятся именно к этому значению.
- Частота: сети, описанные в данном Руководстве, работают на частоте 50 или 60 Гц.
- Номинальные первичное и вторичное напряжения: для первичной обмотки, способной работать на нескольких уровнях напряжения, должно быть дано значение мощности кВА, соответствующее каждому уровню напряжения. Второе номинальное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора — это значение напряжения холостого хода.
- Номинальные уровни изоляции характеризуются величинами напряжений, которые используются при испытаниях изоляции повышенным напряжением промышленной частоты, а также высоковольтными импульсами напряжения, имитирующими разряд молнии. При уровнях напряжения, описанных в данном Руководстве, перенапряжения, вызванные операциями коммутации, обычно гораздо меньше, чем вызываемые молнией, поэтому отдельные испытания для волн перенапряжений, вызванных операциями коммутации, не проводятся.
- Переключатель отпаек без нагрузки обычно позволяет установить уровни напряжения до  $\pm(2-5\%)$  от номинального напряжения первичной обмотки трансформатора. Напряжение с трансформатора должно быть снято, перед тем как работать с этим переключателем.
- Схемы и группы соединения обмоток трансформатора обозначены стандартными символами для звезды, треугольника и звезды с внутренними соединениями (зигзаг) (и их комбинациями для трансформаторов специального исполнения, например, 6- или 12-фазные трансформаторы для питания выпрямителей), а также с помощью буквенно-цифровой кодировки, рекомендованной МЭК. Этот код читается слева направо, первая буква относится к обмотке с самым высоким напряжением, вторая — к обмотке с напряжением, следующим по величине.
- Заглавные буквы относятся к обмотке с самым высоким напряжением:
  - D** = треугольник
  - Y** = звезда
  - Z** = звезда с внутренними соединениями (или зигзаг)
  - N** = нейтраль, выведенная на клемник
- Строчные буквы используются для вторичных обмоток:
  - d** = треугольник
  - y** = звезда
  - z** = звезда с внутренними соединениями (или зигзаг)
  - n** = нейтраль, выведенная на клемник
- Число от 1 до 11, соответствующее делению на циферблате часов (вместо 12 используется 0) которое следует за любой парой букв, указывает на сдвиг по фазе, если таковой имеется, возникающий во время трансформации.

Очень распространенной схемой соединения обмоток в распределительных трансформаторах является схема Dyn 11, в которой соединение высоковольтной обмотки выполнено по схеме «треугольник», а вторичной обмотки — по схеме «звезда», нейтраль которой выведена на клемник. Сдвиг по фазе трансформатора составляет  $+30^\circ$ , то есть, фаза 1 вторичного напряжения на «11 часах», а фаза 1 первичного напряжения — на «12 часах», как показано на рис. В34 стр. В36. Все комбинации соединения обмотки по схемам «треугольник», «звезда» и «зигзаг» образуют сдвиг по фазе, который (если он не равен нулю), составляет либо  $30^\circ$ , либо кратное значение.

«Часовая кодировка» подробно описана в стандарте МЭК 60076-4.

### Характеристики, связанные с технологией и применением трансформатора

Этот список не является исчерпывающим:

- Выбор технологии.
- Изоляционной средой является:
  - жидкость (минеральное масло) или
  - твердая эпоксидная смола и воздух.
- Для внутренней и наружной установки
- Высота над уровнем моря ( $\leq 1000$  м стандартно).
- Температура (МЭК 60076-2).
- Максимальная температура окружающего воздуха:  $40^{\circ}\text{C}$ ;
  - максимальная средняя суточная температура окружающего воздуха:  $30^{\circ}\text{C}$ ;
  - максимальная средняя годовая температура окружающего воздуха:  $20^{\circ}\text{C}$ .

Для нестандартных рабочих условий, прочтите пункт «Влияние средней температуры и высоты на номинальный ток», стр. С7.

### Описание технологий изоляции

В настоящее время имеется два основных класса распределительных трансформаторов:

- сухого типа (литая изоляция);
- жидкого типа (с заполнением маслом).

#### Трансформаторы сухого типа

Обмотки этих трансформаторов изолированы смолой, заливаемой под вакуумом (метод запатентован основными производителями).

Рекомендуется выбирать трансформатор, согласно стандарту МЭК 60076-11, учитывая следующее:

- класс окружающей среды E2 (чистая конденсация и/или высокий уровень загрязнения);
- климатические условия класса C2 (применение, транспортировка и хранение до  $-25^{\circ}\text{C}$ );
- пожароустойчивость (трансформаторы, подтверждающиеся пожарной безопасностью с низкой возгораемостью и самозатухающие в течение определенного времени).

Следующее описание относится к процессу, разработанному ведущим Европейским производителем в этой области.

Для герметизации обмотки используется три компонента:

- эпоксидная смола на основе бифенола А, с вязкостью, которая обеспечивает полную пропитку обмотки;
- ангидридный отвердитель, модифицированный в целях достижения такой степени вязкости в корпусе, которая позволит избежать образования трещин во время температурных циклов, присутствующих при нормальном режиме работы;
- порошковая добавка из тригидрата алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и кварца, которая улучшает механические и тепловые свойства изолятора, а также придает исключительные внутренние качества изоляции при высокой температуре.

Эта трехкомпонентная система изоляции позволяет получить изоляцию Класса F ( $\Delta\theta = 100\text{ K}$ ), с отличными качествами пожаробезопасности и немедленного самозатухания. Такие трансформаторы классифицируются как невозгораемые.

Такая изоляция обмотки не содержит галогенных компонентов (хлора, брома и т.д.) или других компонентов, способных выделить коррозионные или токсичные загрязнители. Таким образом, гарантируется высокая степень безопасности персонала в аварийных ситуациях, особенно в случае пожара.

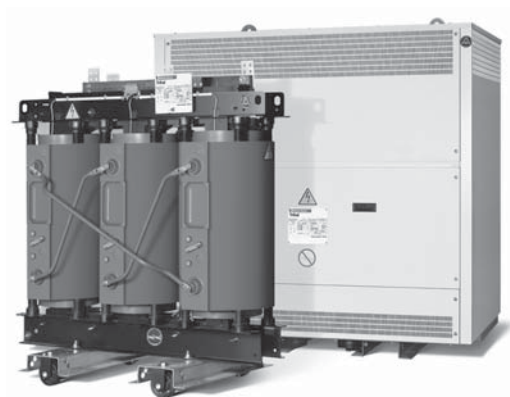
Такой трансформатор хорошо работает в агрессивных промышленных средах, пыльных, влажных и т.д. (см. **рис В23**).

#### Трансформаторы с заполнением жидкостью

Наиболее распространенной изоляционной/охлаждающей жидкостью в трансформаторах является минеральное масло. Минеральные масла описаны в стандарте МЭК 60296. Так как они воспламеняемы, во многих странах обязательными являются меры безопасности, особенно при внутренней установке. Блок DGPT (обнаружение газа, повышенного давления и температуры) обеспечивает защиту масляных трансформаторов. В случае обнаружения отклонения блок DGPT очень быстро отключает высоковольтное питание трансформатора прежде, чем ситуация становится опасной.

Минеральное масло подвержено биологическому старению и не содержит ПХБ (полихлорированный бифенил), что было причиной запрета аскарила или пиралена. По запросу, минеральное масло может быть заменено альтернативной изоляционной жидкостью, путем внесения необходимых изменений в трансформатор и принятия соответствующих дополнительных мер безопасности, если необходимо.

Изоляционная жидкость также действует в качестве охлаждающей среды, она расширяется при увеличении нагрузки и/или температуры окружающей среды, поэтому все трансформаторы с заполнением жидкостью должны быть спроектированы так, чтобы предоставить дополнительный объем для жидкости без чрезмерного давления в баке.



**Рис. В23:** Трансформатор сухого типа



## 4 Подстанция потребителя с учетом на низком напряжении

B27

Ограничение давления обычно достигается двумя способами:

- Герметичный бак с полным заполнением (до 10 МВА в настоящее время)

Разработанный ведущим французским производителем в 1963 г., этот метод был принят к национальному использованию в 1972 г., а сейчас применяется во всем мире (см. **рис. B24**).

Расширение жидкости компенсируется эластичной деформацией маслоохлаждающих секций, присоединенных к баку.

Технология «полного заполнения» имеет много важных преимуществ над другими методами:

- полностью исключено окисление диэлектрической жидкости (атмосферным кислородом);
- нет необходимости в устройстве осушения воздуха, а также в последующем техобслуживании (проверка и замена влагопоглотителя);
- нет необходимости проводить испытания электрической прочности жидкости в течение 10 лет;
- возможна упрощенная защита от внутренних повреждений, посредством устройства DGPT;
- простота установки: облегченные и уменьшенные габариты (по сравнению с баками с расширителем для масла), хороший доступ к высоко- и низковольтным клеммам;
- немедленное обнаружение (даже малых) утечек масла; вода не может попасть внутрь бака.

- Расширитель для масла с воздушной подушкой при атмосферном давлении

Расширение изолирующей жидкости сопровождается повышением уровня жидкости в расширительном баке, который смонтирован над главным баком трансформатора, как показано на **рис. B25**. Пространство над жидкостью в расширительном баке может быть заполнено воздухом, который затягивается, когда уровень жидкости падает, и частично выпускается при подъеме уровня жидкости. Когда воздух затягивается из окружающей атмосферы, он проходит через сальник, перед тем, как попасть в осушительное устройство (обычно содержащее кристаллы силикагеля), и затем уже попадает в расширительный бак. В некоторых моделях больших трансформаторов пространство между маслом и баком занято герметичным воздушным компенсатором, так что изоляционная жидкость никогда не приходит в контакт с атмосферой. Воздух входит и выходит из деформирующегося воздушного компенсатора через сальник и осушитель, как это было описано выше. Расширительный бак обязателен для трансформаторов номиналом выше 10 МВА (что в настоящее время является верхним пределом для трансформаторов с полным заполнением).

### Выбор технологии

Как обсуждается выше, можно выбрать трансформатор с жидким диэлектриком или сухой трансформатор. Для номинальных мощностей до 10 МВА можно выбрать герметичные трансформаторы в качестве альтернативы трансформаторам с расширительным баком.

Выбор зависит от ряда факторов, включая:

- Безопасность людей в непосредственной близости от трансформатора. Может потребоваться учитывать местные правила и официальные рекомендации.
- Экономические соображения с учетом относительных преимуществ каждого оборудования.

Правила, влияющие на выбор:

- Сухой трансформатор:
    - В некоторых странах требуется использовать сухой трансформатор в многоэтажных жилых зданиях.
    - Использование сухих трансформаторов не ограничивается в других ситуациях.
  - Трансформаторы с жидкой изоляцией:
    - Как правило, трансформатор этого типа запрещается использовать в многоэтажных жилых зданиях.
    - Изолирующие жидкости, монтажные ограничения или минимальная защита от риска зависят от класса используемой изоляции.
    - Некоторые страны, в которые широко распространено использование жидких диэлектриков, определяют несколько классов жидкости по ее пожарной безопасности. Последнее оценивается по двум критериям: температура вспышки и минимальная теплотворность. Основные классы приводятся на **рис. B26**, на котором для удобства используются коды классов.
- В качестве примера, французский стандарт определяет условия монтажа трансформаторов с жидким диэлектриком. Пока не установлен эквивалентный стандарт ИЕС. Французский стандарт нацелен на обеспечение безопасности людей и имущества и рекомендует, в частности, минимальные меры против риска пожара.



Рис. B24: Герметичный бак с полным заполнением



Рис. B25: Расширитель для масла с воздушной подушкой при атмосферном давлении

Код	Жидкий диэлектрик	Температура вспышки (°C)	Мин. теплотворность (МДж/кг)
01	Минеральное масло	<300	-
K1	Углеводороды с высокой плотностью	>300	48
K2	Эфиры	>300	34-37
K3	Силиконы	>300	27-28
L3	Изолирующие галогенные жидкости	-	12

Рис. B26: Классы жидких диэлектриков

Основные меры предосторожности, которые необходимо соблюдать, указаны на **Рис. B27**.

- Для жидких диэлектриков класса L3 не требуется принятия специальных мер.
- Для диэлектриков классов O1 и K1 указываемые меры применяются только при наличии более 25 литров жидкого диэлектрика в трансформаторе.
- Для диэлектриков классов K2 и K3 указываемые меры применяются только при наличии более 50 литров жидкого диэлектрика в трансформаторе.

Класс жидкого диэлектрика	Количество литров, выше которого меры требуются	Объекты					
		Помещение или огражденная площадка, зарезервированное для квалифицированного персонала и отделенное от любого другого здания расстоянием D			Площадка с доступом только для обученного персонала, отделенная от рабочих зон огнестойкими (2 часа) стенами		Другие помещения или объекты <sup>(2)</sup>
		D > 8 м	4 м < D < 8 м	D < 4 м <sup>(1)</sup> в направлении занятых зон	Без проемов	С проемами	
O1 K1	25	Без спец. мер	Огнестойкий (1 час) щит	Огнестойкая (2 часа) стена напротив соседнего здания	Меры (1+2) или 3 или 4	Меры (1 + 2 + 5) или 3 или (4 + 5)	Специальные меры (1A + 2 + 4) <sup>(3)</sup> или 3
K2 K3	50	Без спец. мер		Огнестойкий (1 час) щит	Без спец. мер	Меры 1A или 3 или 4	Меры 1 или 3 или 4
L3		Без спец. мер					

**Мера 1:** Меры, обеспечивающие полную локализацию диэлектрика при его утечке из трансформатора (приямки, пороги вокруг трансформатора, защита кабельных траншей, каналов и т.д. в течение строительства).

**Мера 1 A:** В дополнение к мере 1, устранение возможности распространения пожара при воспламенении жидкости (все горючие материалы должны быть перемещены на расстояние не менее 4 м от трансформатора или не менее 2 м при установке огнестойкого [1 час] щита)

**Мера 2:** Обеспечение быстрого и естественного тушения горячей жидкости (слой галечника в приямке).

**Мера 3:** Автоматическое устройство (реле давления, термореле или газовое реле) для отключения основного источника питания и сигнализации при появлении газа в расширительном баке трансформатора.

**Мера 4:** Автоматические пожарные детекторы в непосредственной близости от трансформатора для отключения основного источника питания и сигнализации.

**Мера 5:** Автоматическое закрытие огнестойкими (минимум 0,5 часа) щитами всех проемов (вентиляционные решетки и т.д.) в стенах и потолке помещения подстанции.

**Примечания:**

(1) Огнестойкая (2 часа) дверь не считается таким проемом.

(2) Трансформаторное помещение, прилегающее к цеху и отделенное от него стенами, огнестойкость которого не рассчитано на 2 часа.

(2) Зоны, расположенные посередине цехов, материал, размещенный (или нет) в защитном контейнере.

Необходимо, чтобы оборудование было размещено в помещении с прочными стенами, только с отверстиями, необходимыми для вентиляции.

Рис. B27: Меры безопасности, рекомендуемые для электроустановок, использующих жидкие диэлектрики классов O1, K1, K2 или K3

**Определение оптимальной мощности**

**Завышение номинальной мощности трансформатора**

Это приводит к следующему:

- Чрезмерные капиталовложения и излишне высокие потери холостого хода, но
- Снижение нагрузочных потерь.

**Занижение номинальной мощности трансформатора**

Это приводит к следующему:

- Пониженный КПД при полной нагрузке (максимальный КПД при 50-70% полной нагрузке), работа в оптимальном режиме не достигается.
- Долговременная перегрузка вызывает тяжелые последствия для:
  - трансформатора из-за раннего старения изоляции обмоток (это может привести к повреждению изоляции и выходу из строя трансформатора)
  - установки, если перегрев трансформатора вызывает его отключение защитой.

**Определение оптимальной мощности**

Чтобы выбрать оптимальную номинальную мощность (кВА) для трансформатора, необходимо выполнить следующее:

- Составить перечень мощностей установленных ЭП (оборудования), как описывается в Главе А.
- Определить коэффициент использования для каждого ЭП.
- Определить продолжительность включения установки с учетом продолжительности нагрузок или перегрузок.
- В обоснованных случаях, обеспечить компенсацию реактивной мощности в следующих целях:
  - Снижение штрафов в случае тарифов, частично основанных на максимальной потребляемой мощности (кВА)
  - Снижение стоимости заявленного максимума нагрузки ( $P(\text{кВА}) = P(\text{кВт})/\cos \varphi$ ).
- Выбор из диапазона доступных стандартных мощностей трансформатора с учетом всех возможных будущих расширений установки.

Необходимо обеспечить соответствующее охлаждение трансформатора.

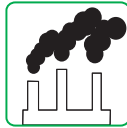


Рис. B28: SM6 — ячейка КРУ в металлической оболочке

### 4.5 Инструкции по использованию оборудования высокого напряжения

Цель данной главы состоит в обеспечении общих рекомендаций по предотвращению значительного ухудшения рабочих характеристик оборудования высокого напряжения на объектах, подверженных влажности и загрязнению.

#### Нормальные рабочие условия для оборудования высокого напряжения в помещениях

Все оборудование высокого напряжения соответствует специальным нормам и стандарту МЭК 62271-1 («Общие технические требования к высоковольтным комплектным распределительным устройствам»), которые определяют нормальные условия эксплуатации такого оборудования. Например, в отношении влажности, стандарт указывает:

Правила определения сырых помещений:

- Среднее значение относительной влажности, измеренное за 24 часа, не превышает 90%;
  - Среднее значение давления водяного пара, измеренное за 24 часа, не превышает 22 кПа;
  - Среднее значение относительной влажности, измеренное за один месяц, не превышает 90%;
  - Среднее значение давления водяного пара, измеренное за один месяц, не превышает 18 кПа;
- При этих условиях может возникать конденсация.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1:** Конденсация может ожидаться при внезапных колебаниях температуры в период высокой влажности.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2:** Чтобы выдерживать последствия высокой влажности и конденсации, такие как повреждение изоляции или коррозия металлических частей, следует использовать распределительное устройство, рассчитанное на такие условия.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3:** Конденсация может предотвращаться за счет специальной конструкции здания или жилья, посредством соответствующей вентиляции и отопления или использования оборудования для осушения воздуха.

Как указывается в стандарте, конденсация может возникать время от времени даже при нормальных условиях. Стандарт не указывает специальных мер по предотвращению конденсации для помещений подстанции.

#### Использование при тяжелых условиях

При определенных тяжелых условиях по влажности и загрязнению, значительно выходящих за вышеуказанные нормальные условия использования, даже правильно спроектированная электроустановка может подвергаться быстрой коррозии металлических частей и ухудшению поверхности изолирующих частей.

#### Меры по устранению конденсации

- Тщательная разработка вентиляции подстанции или приспособление ее к рабочим условиям.
- Предотвращение колебаний температуры.
- Устранение источников влажности в окружающей среде подстанции.
- Установка системы кондиционирования воздуха.
- Обеспечение разводки кабелей в соответствии с применяемыми правилами.

#### Меры по устранению загрязнения

- Обеспечение вентиляционных отверстий подстанции перегородками шевронного типа для снижения поступления пыли и загрязняющих веществ.
- Поддержание минимального уровня вентиляции подстанции, требуемого для отвода тепла трансформатора, для снижения поступления пыли и загрязняющих веществ.
- Использование ячеек высокого напряжения с достаточно высокой степенью защиты (IP).
- Использование систем кондиционирования с фильтрами для ограничения поступления пыли и загрязняющих веществ.
- Регулярная очистка металла и изолирующих частей от всех следов загрязнения.

#### Вентиляция

Как правило, вентиляция подстанции требуется для отвода теплоты, выделяемой трансформаторами, обеспечения сушки после особо влажных периодов.

Однако, ряд исследований показывает, что избыточная вентиляция может значительно увеличивать конденсацию.

Вентиляция должна поддерживаться на минимальном требуемом уровне.

Более того, вентиляция не должна вызывать внезапные колебания температуры, которые могут привести к достижению точки росы.

По этой причине:

При возможности, следует использовать естественную вентиляцию. Если необходима принудительная вентиляция, вентиляторы должны работать непрерывно для предотвращения колебаний температуры.

Рекомендации по определению отверстий подстанции для впуска и выпуска воздуха приводятся ниже.

## Методы расчета

Имеется ряд методов расчета для оценки требуемого размера вентиляционных отверстий подстанции при проектировании новых подстанций или модификации существующих подстанций, для которых возможны проблемы с конденсацией. Основной метод основан на рассеиваемой мощности трансформатора.

Требуемые площади поверхностей вентиляционных отверстий  $S$  и  $S'$  могут быть оценены с помощью следующих формул.

$$S \geq \frac{1.8 \times 10^{-4} P}{\sqrt{H}} \quad \text{и} \quad S' \geq 1.10 \times S$$

где:

$S$  = Площадь нижнего вентиляционного отверстия (впуск воздуха) [ $\text{м}^2$ ] (за вычетом поверхности решетки)

$S'$  = Площадь верхнего вентиляционного отверстия (выпуск воздуха) [ $\text{м}^2$ ] (за вычетом поверхности решетки)

$P$  = Общая рассеиваемая мощность [Вт]

$P$  есть сумма мощности, рассеиваемой:

- Трансформатором (потери холостого хода и нагрузочных)
- Низковольтным распределительным устройством
- Распределительным устройством высокого напряжения

$H$  = Высота между средними точками вентиляционных отверстий [м] **См. рис. В29**

### Примечание:

Эта формула действительна для среднегодовой температуры  $20^\circ\text{C}$  и максимальной высоты над уровнем моря 1000 м.

Необходимо отметить, что эти формулы позволяют определить только один порядок величины сечений  $S$  и  $S'$ , которые считаются тепловыми сечениями, т.е., полностью открытыми и только необходимыми для отвода теплоты, образующейся внутри подстанции высокого/низкого напряжения.

Конечно, фактические сечения больше в зависимости от принятого технологического решения.

Действительно, реальный воздушный поток значительно зависит от следующего:

- форма отверстий и степень защиты ячеек (IP): металлическая решетка, штампованные отверстия, шевронные жалюзи,...
- размер внутренних компонентов и их положение относительно отверстий:
- положение и размеры трансформатора и/или маслоблорника, канал потока между компонентами,...
- и физические параметры и характеристики окружающей среды: температура окружающей среды, высота над уровнем моря, величина повышения температуры.

Понимание и оптимизация физических явлений требуют точных анализов потоков на основе законов аэродинамики с использованием специального аналитического программного обеспечения.

Пример:

Рассеиваемая мощность трансформатора = 7970 Вт

Рассеиваемая мощность низковольтного распределительного устройства = 750 Вт

Рассеиваемая мощность распределительного устройства высокого напряжения = 300 Вт

Высота между средними точками вентиляционных отверстий – 1,5 м.

Расчет:

Рассеиваемая мощность  $P = 7970 + 750 + 300 = 9020$  Вт

$$S = \frac{1.8 \times 10^{-4} P}{\sqrt{1.5}} = 1.32 \text{ м}^2 \quad \text{и} \quad S' = 1.1 \times 1.32 = 1.46 \text{ м}^2$$

## Расположение вентиляционных отверстий

Чтобы максимизировать отвод теплоты, выделяемой трансформатором, посредством естественной конвекции, вентиляционные отверстия должны располагаться сверху и внизу стенки около трансформатора. Теплота, рассеиваемая распределительным устройством высокого напряжения, пренебрежимо мала. Чтобы предотвратить конденсацию, вентиляционные отверстия подстанции должны располагаться как можно дальше от распределительного устройства высокого напряжения (**см. рис. В30**).

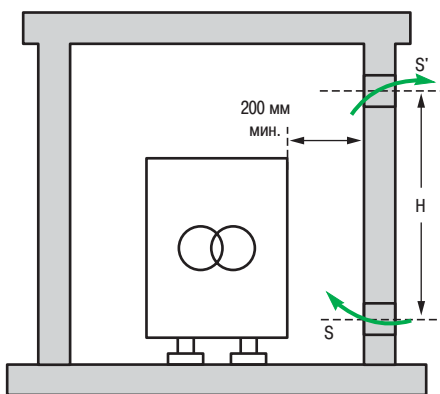


Рис. В29 : Естественная вентиляция

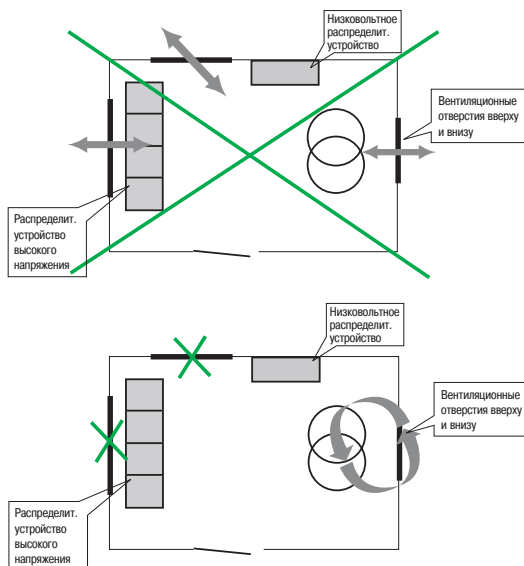


Рис. В30 : Расположение вентиляционных отверстий

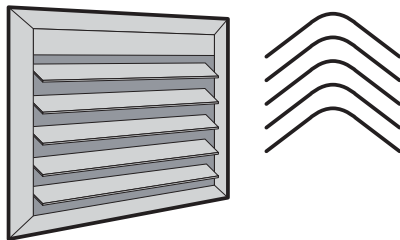


Рис. B31 : Перегородка с шевронными пластинами

### Тип вентиляционных отверстий

Чтобы снизить поступление пыли, загрязнений, тумана и т.д., вентиляционные отверстия подстанции должны обеспечиваться перегородками с шевронными пластинами. Необходимо обеспечить ориентацию перегородок в правильном направлении (см. рис. B31).

### Колебания температуры внутри ячеек

Чтобы снизить колебания температуры, необходимо установить противоконденсационные подогреватели внутри ячеек высокого напряжения, если средняя относительная влажность может сохраняться высокой в течение длительного периода времени. Подогреватели должны работать непрерывно — 24 часа в сутки круглый год. Нельзя подсоединять их к системе регулирования температуры, поскольку это может привести к колебаниям температуры и конденсации, а также сокращению срока службы нагревательных элементов. Необходимо проверить, что подогреватели рассчитаны на соответствующий срок службы (как правило, достаточны стандартные версии).

### Колебания температуры внутри подстанции

Следующие меры могут приниматься для снижения колебаний температуры внутри подстанции.

- Улучшение теплоизоляции подстанции для снижения воздействия колебаний наружной температуры на температуру внутри подстанции.
- При возможности не следует использовать отопление подстанции. Если отопление необходимо, обеспечьте, чтобы система регулирования и/или термостат были достаточно точными и рассчитанными на предотвращение чрезмерных скачков температуры (например, не более 1 °C). При отсутствии достаточно точной системы регулирования температуры, отопление должно быть непрерывным — 24 часа в сутки круглый год.
- Необходимо устранить поступление холодного воздуха из кабельных траншей под ячейками или из проемов в подстанции (под дверями, стыки крыши и т.д.).

### Окружающая среда подстанции и влажность

Разные факторы снаружи подстанции могут влиять на влажность внутри нее.

- Растения
- Следует избегать чрезмерного количества растений вокруг подстанции.
- Гидроизоляция подстанции

Крыша подстанции не должна протекать. Необходимо избегать использования плоских крыш, гидроизоляцию которых трудно реализовать и поддерживать.

- Влага от кабельных траншей
- Необходимо поддерживать кабельные траншеи в сухом состоянии при любых условиях. Отчасти, решение состоит в добавлении песка на дно траншей.

### Защита от загрязнения и очистка

Чрезмерное загрязнение способствует образованию токов утечки, и перекрытию изоляторов. Чтобы предотвратить ухудшение работы оборудования высокого напряжения из-за загрязнения, можно защитить оборудование от загрязнения или регулярно очищать оборудование от загрязнений.

### Защита

Закрытое распределительное устройство среднего напряжения может защищаться корпусами, обеспечивающими высокую степень защиты (IP).

### Очистка

Если не обеспечивается полная защита от загрязнения, оборудование среднего напряжения подлежит регулярной очистке для предотвращения постепенного ухудшения его работы из-за загрязнения.

Очистка — это важный процесс. Использование ненадлежащих продуктов может привести к необратимому повреждению оборудования.

За процедурами очистки обращайтесь к представителю компании Schneider Electric.

## 5 Подстанция потребителя с учетом на высоком напряжении

В32

Подстанция потребителя с учетом на стороне ВН представляет собой электроустановку, подсоединенную к сети питания с номинальным напряжением 1-35 кВ, с понижающим трансформатором мощностью свыше 1250 кВА или несколькими трансформаторами меньшей мощности. Номинальный ток высоковольтного КРУ обычно не превышает 400 А.

### 5.1 Общие положения

#### Функции

##### Подстанция

В зависимости от сложности электроустановки и способа распределения нагрузки, подстанция:

- может находиться в одном помещении, в котором размещаются высоковольтное распределительное устройство и измерительные панели, а также трансформатор(ы) и главные распределительные устройства НН;
- или может подавать питание на одну или более трансформаторных подстанций, где также находятся КРУ, на которые подается высоковольтное питание от КРУ главной подстанции, как это было описано выше.

Подстанции могут быть:

- внутренней установки;
- наружной установки, в соответствующих корпусах.

##### Подключение к высоковольтной сети

Подключение к высоковольтной сети может быть выполнено:

- по специальному кабелю или по воздушной линии электропередач;
- через два выключателя нагрузки с механической взаимоблокировкой, установленных на два кабеля дублирующих линий питания;
- через два выключателя нагрузки кольцевой линии.

##### Учет энергии

Перед установкой подстанции должно быть достигнуто соглашение с поставщиком энергии относительно организации учета энергии.

Панель учета встраивается в высоковольтное КРУ. Трансформаторы напряжения и тока, обладающие необходимой точностью измерений, могут быть включены в главный отсек вводного выключателя или (в случае трансформатора напряжения) могут устанавливаться отдельно в измерительной панели.

##### Трансформаторные камеры

Если установка включает в себя некоторое количество трансформаторных камер, высоковольтное питание от главной подстанции может подаваться через простые радиальные линии питания, ведущие прямо к трансформаторам, или через дублирующие линии питания, ведущие к каждой камере, или через кольцевую схему, согласно желаемой степени непрерывности питания.

В двух последних случаях, в каждой трансформаторной камере потребуется установка устройства кольцевой схемы питания, которое состоит из 3 ячеек.

##### Местные аварийные генераторы

Аварийные резервные генераторы предназначены для обеспечения питанием важных абонентов, в случае исчезновения напряжения (отключения) в системе электроснабжения.

##### Конденсаторы

Конденсаторы устанавливаются, в соответствии с требованиями:

- ступенями из высоковольтных батарей конденсаторов в главной подстанции;
- или на линиях низкого напряжения в трансформаторных подстанциях

##### Трансформаторы

В целях дополнительного обеспечения бесперебойности питания, трансформаторы можно установить так, чтобы обеспечить автоматическое включение резервного трансформатора или их параллельную работу.

##### Однолинейные схемы

Схемы, показанные на **рис. В29** на следующей странице представляют:

- Различные методы подключения к высоковольтной сети питания; может использоваться один из 4 методов:
  - ☐ подключение к одной линии;
  - ☐ подключение к одной линии (с возможностью расширения до кольцевой схемы питания);
  - ☐ двойное электроснабжение (от двух дублирующих линий питания);
  - ☐ кольцевая схема питания.
- Общая схема защиты при измерении ВН и НН.
- Защита отходящих высоковольтных цепей
- Защита распределительных сетей НН.



## 5 Подстанция потребителя с учетом на высоком напряжении

B33

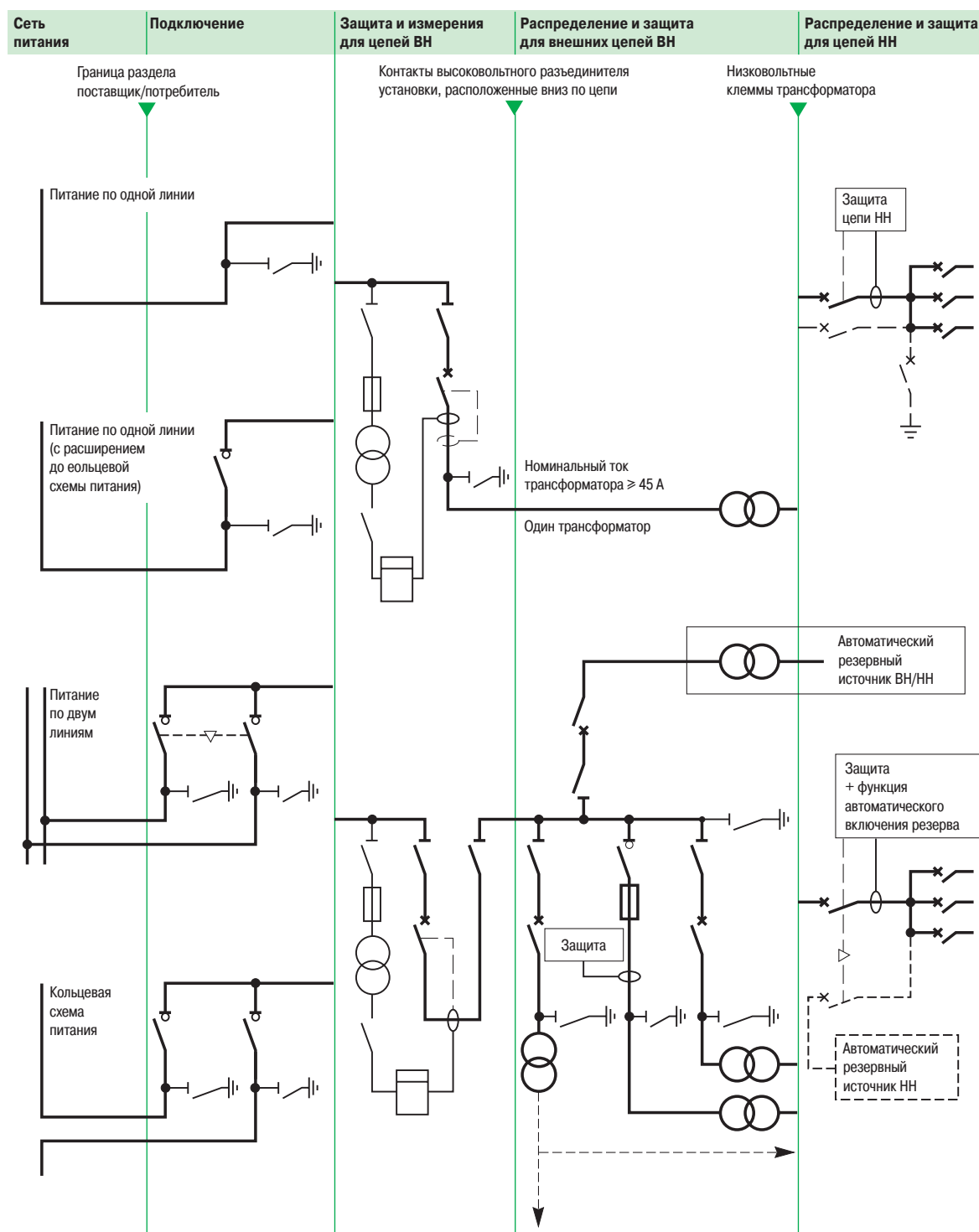


Рис. B32: Подстанция потребителя с учетом на стороне ВН

### 5.2 Выбор ячейек

Подстанция с учетом энергии на стороне ВН включает в себя, в дополнение к ячейкам, описанным в п. 4.2, ячейки, специально предназначенные для учета энергии, и, при необходимости, автоматического или ручного переключения с одного источника питания на другой.

#### Измерения и общая защита

Выполнение этих двух функций достигается совместным действием двух ячейек:

- ячейки трансформатора напряжения (ТН);
- ячейки главного высоковольтного автоматического выключателя, в которую встроены трансформаторы тока (ТТ) в целях измерения и защиты.

Общая защита обычно предусматривает максимальную токовую защиту (перегрузка или КЗ) и защиту от КЗ на землю. Обе схемы используют защитные реле, которые печатаются поставщиком энергии.

#### Подстанции с генераторами

##### Отдельная работа генератора

Если электроустановка требует высокой надежности питания, можно использовать резервный генератор среднего напряжения. В этом случае электроустановка должна включать систему автоматического включения резерва (АВР). Во избежание параллельной работы генератора с внешней сетью, необходима специальная ячейка с автоматическим переключением (см. **рис. В33**).

##### ■ Защита

Для защиты генератора предусмотрены специальные защитные устройства. Необходимо отметить, что так как в связи с тем, что мощность короткого замыкания при питании от генератора очень мала, по сравнению с мощностью короткого замыкания при питании от сети, необходимо обращать особое внимание на селективность (избирательность) защиты.

##### ■ Управление

Для управления генератором используется автоматический регулятор напряжения (АРН), который реагирует на снижение напряжения на клеммах генератора и автоматически увеличивает ток возбуждения генератора до того момента, пока напряжение не восстановится до нормального уровня. Когда генератор должен работать параллельно с другими генераторами, АРН переключается на «режим параллельной работы», при котором в цепь управления АРН добавляются компоненты для обеспечения удовлетворительного распределения реактивной мощности между параллельно включенными генераторами.

Когда несколько генераторов работают параллельно под управлением АРН, увеличение тока возбуждения одного из них (например в результате переключения его АРН в режим ручного управления) практически не оказывает влияния на уровень напряжения. Фактически, данный генератор будет просто работать при меньших значениях коэффициента мощности (увеличение кВА ведет к увеличению вырабатываемого тока), чем ранее.

Коэффициент мощности других устройств автоматически увеличится, и требования нагрузки к коэффициенту мощности будут удовлетворены, как раньше.

##### Генератор, работающий параллельно с основной сетью питания

Чтобы подсоединить генераторы (генераторные агрегаты) к сети, обычно требуется согласие поставщика электроэнергии. Оборудование (ячейки, защитные реле) должны быть согласованы с поставщиком электроэнергии.

Следующие замечания представляют собой некоторые основные соображения, которые необходимо учитывать для защиты и управления генератором.

##### ■ Защита

Чтобы изучить вопрос о присоединении генераторного агрегата, поставщику энергии требуются следующие данные:

- ☐ отдаваемая в сеть мощность;
- ☐ способ (метод) подключения;
- ☐ ток короткого замыкания генератора;
- ☐ несбалансированное напряжение генератора.

В зависимости от способа (метода) подключения, требуется функция защитного отключения цепи:

- ☐ максимальная токовая защита и защита минимального и максимального напряжения;
- ☐ защита по минимальной/максимальной частоте;
- ☐ защита от максимального напряжения нулевой последовательности;
- ☐ быстросрабатывающее АВР;
- ☐ токовая направленная защита.

По причинам безопасности, отключающее устройство также должно иметь функции разъединителя цепи (то есть, обеспечивать полное разъединение всех токоведущих проводов между генератором и сетью питания).

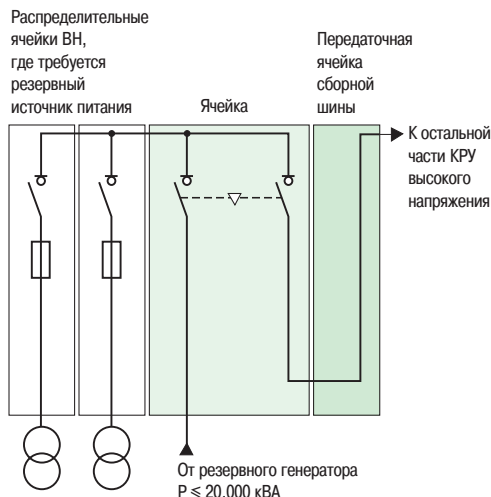


Рис. В33: Часть высоковольтного КРУ, включая резервный источник тока



### ■ Управление

Используется, когда генераторы потребительской подстанции работают параллельно с основным источником питания, например, когда напряжение сети питания снижается в рабочем порядке (высоковольтные сети обычно работают в пределах допуска  $\pm 5\%$  от номинального напряжения или даже более, если того требует система нагрузки). АРН, настроенный, например, на поддержание напряжения  $\pm 3\%$  от номинала, немедленно предпримет попытку поднять напряжение, увеличив ток возбуждения генератора.

Вместо поднятия напряжения, генератор просто будет работать с более низким коэффициентом мощности, чем прежде, увеличив, таким образом, выработку тока. Это будет продолжаться до тех пор, пока, в конце концов, генератор не будет отключен своим реле защиты по максимальному току. Это хорошо известная проблема, и обычно она решается путем перевода АРН в режим поддержания «постоянства коэффициента мощности».

Удовлетворяя заданным условиям, АРН автоматически отрегулирует ток возбуждения в соответствии с напряжением, которое существует в сети питания, одновременно поддерживая коэффициент мощности генератора постоянным (согласно значению, заданному управляющим устройством АРН).

В случае, когда генератор разъединяется с сетью питания, АРН должен автоматически (быстро) переключиться на режим «постоянного напряжения».

## 5.3 Параллельная работа трансформаторов

Необходимость параллельной работы двух или более трансформаторов часто обусловлена:

- ростом нагрузки, которая превышает мощность существующего трансформатора;
- недостатком места (высоты) для одного большого трансформатора;
- мерами безопасности (возможность отказа обоих трансформаторов одновременно очень мала);
- применением трансформаторов стандартного размера во всей электроустановке.

### Полная мощность (кВА)

Значение полной мощности (кВА), при параллельной работе двух трансформаторов с одинаковым номиналом мощности кВА, равно сумме отдельных мощностей, при условии равенства сопротивлений и коэффициентов трансформации по напряжению.

Трансформаторы неодинакового номинала мощности разделяют нагрузку практически (но не точно) пропорционально своим номиналам, при условии, что их коэффициенты трансформации по напряжению равны или почти равны. В таких случаях обычно достигается более 90% от суммы двух мощностей.

Рекомендуется, чтобы трансформаторы, различающиеся по номинальной мощности более чем в 2 раза, не работали параллельно в постоянном режиме (согласно требованиям ПТЭ ЭУ потребителей П.2.1.19 соотношение мощностей трансформаторов работающих параллельно должно быть не более 1:3).

### Условия, необходимые для параллельной работы

Все параллельные устройства должны питаться от одной сети.

Циркулирующий ток между вторичными цепями параллельных трансформаторов, будет пренебрежительно малым при условии:

- вторичные кабельные соединения трансформаторов до точки параллельного включения имеют приблизительно равные длины и характеристики;
- производитель трансформаторов полностью информирован о режиме предполагаемого применения трансформаторов и учитывает при изготовлении нижеследующее:
  - конфигурации обмотки («звезда», «треугольник», «зигзаг») нескольких трансформаторов имеют одинаковый фазовый сдвиг между напряжениями первичной и вторичной обмотки;
  - сопротивления короткого замыкания равны или отличаются не более чем на 10%;
  - разница напряжений между соответствующими фазами не должна превышать 0,4%;
  - вся возможная информация по условиям использования, ожидаемым циклам нагрузки должна быть доведена до производителя, с целью оптимизации потерь, связанных с нагрузкой и при холостом ходе.

## Типичные группы соединения обмоток

Как описано в разделе 4.4 «Электрические характеристики» соотношения между первичной, вторичной и третичной обмотками зависят от:

- типа схемы соединения обмоток («треугольник», «звезда», «зигзаг»);
- соединения обмоток фаз

В зависимости от того, какие концы обмотки образуют точку «звезды», например соединение обмотки в «звезду» будет давать напряжение, на  $180^\circ$  сдвинутое по фазе относительно напряжения, которое имелось бы, если бы в точку «звезды» были соединены противоположные концы обмотки. Подобный сдвиг фаз на  $180^\circ$  может происходить при соединении фазных обмоток в «треугольник», а при соединении в «зигзаг» возможны четыре комбинации.

- Фазовых сдвигов вторичных фазовых напряжений по отношению к соответствующим первичным фазовым напряжениям.

Как уже было отмечено, этот сдвиг (если не равен нулю) всегда будет кратен  $30^\circ$  и зависит от двух факторов, отмеченных выше, а именно, типа обмоток и соединения (т.е. полярности) фазовых обмоток.

В настоящее время самой распространенной конфигурацией обмоток трансформатора является обмотка трансформатора Дуп11 (см. **рис. В34**).

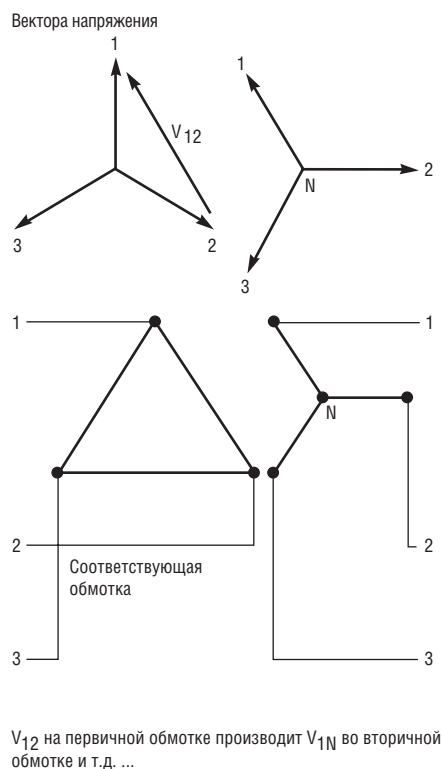


Рис. В34: Фазовый сдвиг в трансформаторе Дуп 11

## 6 Создание распределительных понижающих подстанций

B37

Понижающие подстанции проектируются в соответствии с величиной нагрузки и типом сети питания.

Подстанции могут устанавливаться в общественных местах, таких как парки, жилые районы, а также внутри частных владений, при этом персонал поставщика энергии должен иметь неограниченный доступ к подстанции. Это требование обычно обеспечивается установкой подстанции таким образом, чтобы стена с дверью, через которую происходит доступ персонала, располагалась на границе частных владений.

### 6.1 Различные типы подстанций

Подстанции могут быть разделены по типу учета энергии (на стороне ВН или НН) и по типу подключения (через воздушную ЛЭП или подземный кабель). По типу установки подстанции могут быть:

- внутренней установки, в помещении, специально построенном для этих целей;
- наружной установки, при этом подстанция может устанавливаться:
  - в специально предназначенном для этого корпусе, в который помещается оборудование внутренней установки (КРУ и трансформатор);
  - на земле, с использованием оборудования наружной установки (КРУ и трансформаторы);
  - на помосте с опорой на столбах, с использованием специального оборудования наружной установки (КРУ и трансформаторы).

Комплектные подстанции заводского изготовления представляют собой самый простой, быстрый и экономный способ установки.

### 6.2 Подстанция внутренней установки

#### Концепция

На **рис. В35** показано типовое расположение оборудования, рекомендуемое для подстанции с учетом энергии на стороне НН.

**Примечание:** при использовании сухих трансформаторов с изоляцией из эпоксидной смолы (с «литой» изоляцией) противопожарный маслосборник не применяется. Однако, необходимо предусмотреть периодическую чистку.

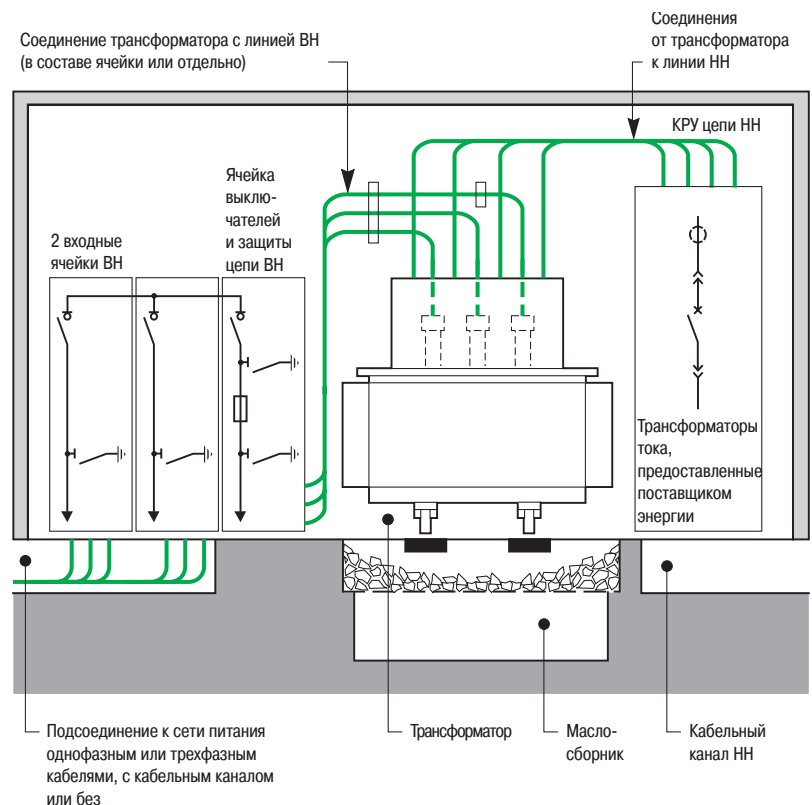


Рис. В35: Типовое расположение ячеек КРУ с учетом энергии на стороне НН

### Подключение к сети питания и соединения между оборудованием

#### Высокое напряжение

- Подсоединение к сети ВН производится поставщиком энергии, и он несет за это ответственность.
- Соединения между высоковольтным КРУ и трансформаторами могут быть выполнены:
  - короткими медными шинами, где трансформатор помещается в отсек, образующий часть высоковольтного КРУ;
  - однофазными экранированными кабелями с синтетической изоляцией, с возможным использованием втычных кабельных вводов трансформатора.

#### Низкое напряжение

- Соединения между низковольтными кабельными вводами трансформатора и распределительным устройством низкого напряжения могут быть выполнены:
  - однофазными кабелями;
  - медными шинами (круглого или прямоугольного сечения), с термоусаживающейся изоляцией.

#### Учет энергии (см. рис. В36)

- Измерительные трансформаторы тока обычно устанавливаются в защитном кожухе низковольтных кабельных вводов трансформатора, кожух опечатывается поставщиком энергии.
- В качестве альтернативы, трансформаторы тока могут быть установлены в опечатанный отсек в главной распределительной панели низкого напряжения.
- Счетчики устанавливаются на панели, которая не подвержена вибрации.
- Счетчики устанавливаются как можно ближе к трансформаторам тока
- Доступ к счетчикам имеется только у поставщика энергии.

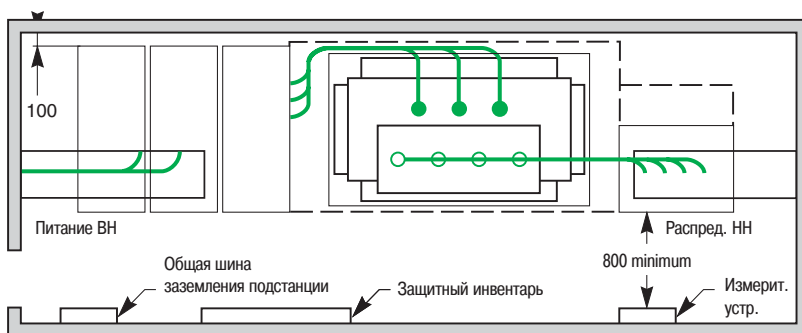


Рис. В36: Типовой план подстанции с учетом энергии на стороне НН

### Цепи заземления

Подстанция должна включать в себя:

- заземляющий электрод для всех открытых токоведущих частей электрооборудования установки и незащищенных внешних металлических частей, включая:
  - защитные металлические экраны;
  - арматурные стержни в бетонном основании подстанции.

### Освещение подстанции

Питание цепей освещения может быть сделано от точки, расположенной выше или ниже по цепи от главного входного автоматического выключателя НН. В обоих случаях должна быть обеспечена соответствующая максимальная токовая защита. Для цепей аварийного освещения рекомендуется применять отдельную цепь (или цепи).

Рабочие выключатели, кнопки и т.д. обычно расположены непосредственно возле входов.

Осветительные приборы установлены таким образом, что:

- ключи управления КРУ и указатели положения выключателей адекватным образом освещены;
- все измерительные шкалы, таблички с инструкциями и т.д. можно легко прочитать.

### Оборудование для работы и обеспечения безопасности

Оборудование, необходимое для безопасности эксплуатации подстанции в соответствии с местными правилами безопасности:

- изоляционная подставка и/или диэлектрический коврик (резиновый или синтетический);
- пара диэлектрических перчаток, которые хранятся в специальном конверте;
- указатель напряжения для использования на высоковольтном оборудовании;
- заземляющие устройства (в соответствии с типом распределительного устройства);

- средства пожаротушения, на основе порошка или углекислого газа;
- предупредительные знаки, знаки привлечения внимания и сигнализация безопасности:
- на внешней стороне двери доступа должна висеть табличка с надписью «Опасно» и запретом входа, вместе с инструкциями по оказанию первой помощи лицам, пострадавшим от электрического тока.

## 6.3 Подстанция наружной установки

### Открытая подстанция со сборными корпусами

Сборная подстанция высокого/низкого напряжения, отвечающая требованиям МЭК 62271-202, включает:

- оборудование в соответствии с нормами МЭК
- корпус, прошедший типовые испытания, т.е., в процессе его проектирования прошел ряд испытаний (см. Рис. В37):
- Степень защиты
- Функциональные испытания
- Температурный класс
- Невоспламеняющиеся материалы
- Механическая прочность корпуса
- Уровень шума
- Уровень изоляции
- Испытание на воздействие внутренней дуги
- Проверка цепи заземления
- Маслоудерживающая способность,...

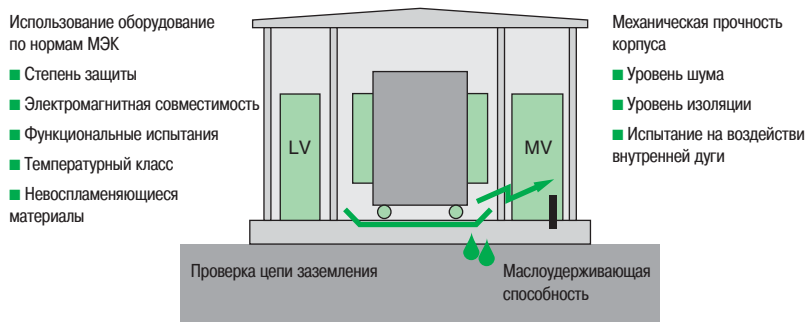


Рис. В37: Подстанция, прошедшая типовые испытания по стандарту МЭК 62271-202

#### Основные преимущества:

- Безопасность:
- Для людей и персонала благодаря высокому воспроизводимому уровню качества
- Рентабельность:
- Изготовление, оснащение и испытание на заводе
- Срок поставки.
- Поставка в состоянии готовности к подсоединению

Стандарт ИЕС 62271-202 включает четыре основные конструкции (см. Рис. В38)

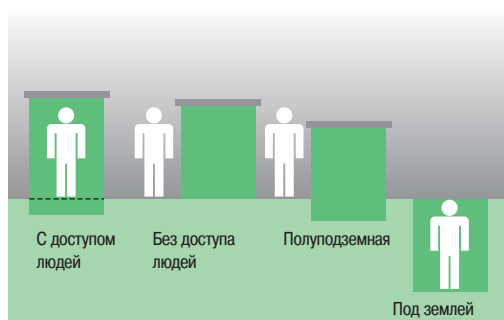
- Подстанция с доступом людей
- Защита от плохих погодных условий
- Подстанция без доступа людей
- Экономия места и наружные работы
- Полуподземная подстанция
- Не нарушает общий эстетический вид (малозаметна)
- Подземная подстанция
- Не выделяется из общей обстановки

#### Открытые подстанции без корпусов (см. рис. В39)

Открытые подстанции широко распространены в некоторых странах и обеспечиваются защитой от атмосферных воздействий.

Такие подстанции включают огороженную зону, в которой установлены три или более железобетонных цоколя для следующего оборудования:

- Блок ввода или один или несколько выключателей с плавким предохранителем или автоматических выключателей
- Один или несколько трансформаторов, и
- Одно или несколько распределительных устройств низкого напряжения.



a -



b -



Рис. В38: Четыре конструкции по стандарту МЭК 62271-202; две из них [a] подстанция среднего/низкого напряжения с доступом людей; [b] полуподземная подстанция среднего/низкого напряжения

## Мачтовая подстанция

### Область применения

Эти подстанции используются, в основном, для питания отдельных сельских потребителей от воздушных распределительных сетей высокого напряжения.

### Конструкция

Как правило, на этих подстанциях защита трансформатора обеспечивается с помощью плавких предохранителей.

Обеспечиваются также молниеотводы для защиты трансформатора и людей (см. Рис. В40).

### Общая схема расположения оборудования

Как указывалось ранее, местоположение подстанции должно обеспечивать легкий доступ не только для персонала, но и для перемещения оборудования (например, подъем трансформатора) и маневрирования тяжелых грузовых автомобилей.



Рис. В39: Подстанция наружной установки без корпуса

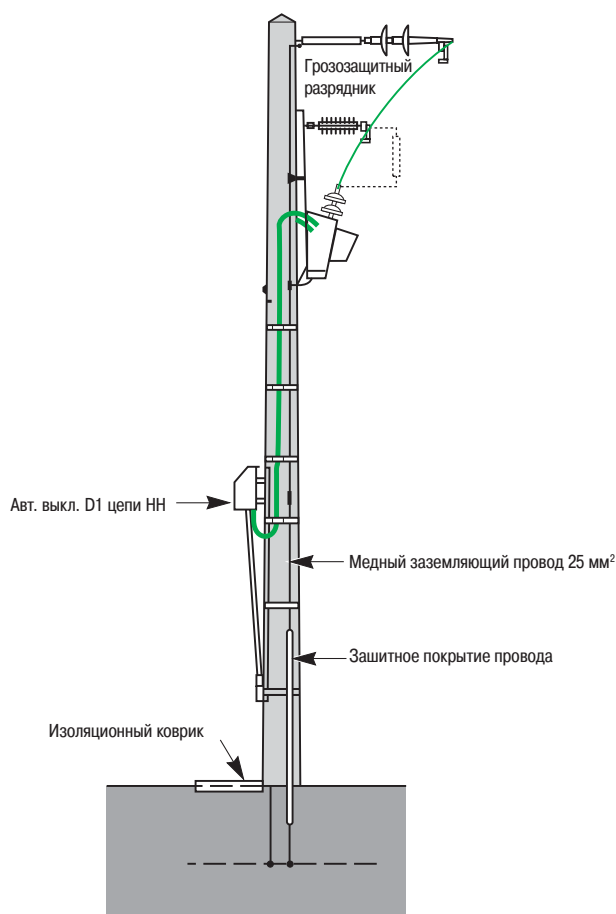


Рис. В40: Трансформаторная столбовая подстанция

## Глава С

# Подключение к низковольтной распределительной сети

Содержание		
1	Низковольтные сети электроснабжения	C2
	1.1 Низковольтные потребители	C2
	1.2 Низковольтные распределительные сети	C10
	1.3 Присоединение потребителей к сети	C11
	1.4 Качество электроэнергии	C15
2	Тарифы и учет	C16

C1

# 1 Низковольтные сети электроснабжения

С2

Самые распространенные низковольтные системы электроснабжения охватывают диапазон от однофазных сетей напряжением 120 В до трехфазных четырехпроводных сетей напряжением 240/415 В. Питание нагрузок мощностью до 250 кВА может осуществляться от низковольтных сетей электроснабжения, а при уровнях нагрузки, соответствующих предельным возможностям низковольтных сетей, поставщиками электроэнергии обычно предлагается питание на высоком напряжении. В соответствии с международным стандартом МЭК 60038, рекомендуемым напряжением для трехфазных четырехпроводных низковольтных распределительных систем является 230/400 В.

## 1.1 Низковольтные потребители

В Европе до 2008 года продлен период перехода на допустимое отклонение напряжения «230 В/400 В +10%/-10%».

По определению, к низковольтным потребителям относятся те потребители, нагрузки которых могут удовлетворительно питаться от низковольтной распределительной сети, расположенной в их населённом пункте.

Напряжение локальной низковольтной сети электроснабжения может составлять 120/208 В или 240/415 В, что соответствует нижнему или верхнему пределам наиболее распространенных уровней трехфазного напряжения, или же иметь некоторый промежуточный уровень (рис. С1).

В соответствии с международным стандартом МЭК 60038, рекомендуемым напряжением для трехфазных четырехпроводных низковольтных систем электроснабжения является 230/400 В.

Питание нагрузок мощностью до 250 кВА может осуществляться от низковольтных сетей электроснабжения, а при уровнях нагрузки, соответствующих предельным возможностям низковольтных сетей, поставщиками электроэнергии обычно предлагается питание на высоком напряжении.

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Австралия	50 ± 0,1	415/240 (a) 240 (k)	415/240 (a) 440/250 (a) 440 (m)	22,000 11,000 6,600 415/240 440/250
Австрия	50 ± 0,1	230 (k)	380/230 (a) (b) 230 (k)	5,000 380/220 (a)
Азербайджан	50 ± 0,1	208/120 (a) 240/120 (k)	208/120 (a) 240/120 (k)	
Алжир	50 ± 1,5	220/127 (e) 220 (k)	380/220 (a) 220/127 (a)	10,000 5,500 6,600 380/220 (a)
Ангола	50	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)
Антигуа и Малые Антильские острова	60	240 (k) 120 (k)	400/230 (a) 120/208 (a)	400/230 (a) 120/208 (a)
Аргентина	50 ± 2	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	
Армения	50 ± 5	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Афганистан	50	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)
Бангладеш	50 ± 2	410/220 (a) 220 (k)	410/220 (a)	11,000 410/220 (a)
Барбадос	50 ± 6	230/115 (j) 115 (k)	230/115 (j) 200/115 (a) 220/115 (a)	230/400 (g) 230/155 (j)
Бахрейн	50 ± 0,1	415/240 (a) 240 (k)	415/240 (a) 240 (k)	11,000 415/240 (a) 240 (k)
Беларусь	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Бельгия	50 ± 5	230 (k) 230 (a) 3N, 400	230 (k) 230 (a) 3N, 400	6,600 10,000 11,000 15,000
Болгария	50 ± 0,1	220	220/240	1,000 690 380
Боливия	50 ± 0,5	230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a)
Ботсвана	50 ± 3	220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)



# 1 Низковольтные сети электроснабжения

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Бразилия	60	220 (k) 127 (k)	220/380 (a) 127/220 (a)	13,800 11,200 220/380 (a) 127/220 (a)
Бруней	50 ± 2	230	230	11,000 68,000
Великобритания (без Северной Ирландии)	50 ± 1	230 (k)	400/230 (a)	22,000 11,000 6,600 3,300 400/230 (a)
Великобритания (включая Северную Ирландию)	50 ± 0,4	230 (k) 220 (k)	400/230 (a) 380/220 (a)	400/230 (a) 380/220 (a)
Венгрия	50 ± 5	220	220	220/380
Вьетнам	50 ± 0,1	220 (k)	380/220 (a)	35,000 15,000 10,000 6,000
Гамбия	50	220 (k)	220/380	380
Гана	50 ± 5	220/240	220/240	415/240 (a)
Германия	50 ± 0,3	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	20,000 10,000 6,000 690/400 400/230
Гибралтар	50 ± 1	415/240 (a)	415/240 (a)	415/240 (a)
Гонконг	50 ± 2	220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	11,000 386/220 (a)
Гренада	50	230 (k)	400/230 (a)	400/230 (a)
Греция	50	220 (k) 230	6,000 380/220 (a)	22,000 20,000 15,000 6,600
Грузия	50 ± 0,5	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Дания	50 ± 1	400/230 (a)	400/230 (a)	400/230 (a)
Джибути	50		400/230 (a)	400/230 (a)
Доминиканская республика	50	230 (k)	400/230 (a)	400/230 (a)
Египет	50 ± 0,5	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	66,000 33,000 20,000 11,000 6,600 380/220 (a)
Замбия	50 ± 2,5	220 (k)	380/220 (a)	380 (a)
Зимбабве	50	225 (k)	390/225 (a)	11,000 390/225 (a)
Израиль	50 ± 0,2	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	22,000 12,600 6,300 400/230 (a)
Индия	50 ± 1,5	440/250 (a) 230 (k)	440/250 (a) 230 (k)	11,000 400/230 (a) 440/250 (a)
Индонезия	50 ± 2	220 (k)	380/220 (a)	150,000 20,000 380/220 (a)
Иордания	50	380/220 (a) 400/230 (k)	380/220 (a)	400 (a)
Ирак	50	220 (k)	380/220 (a)	11,000 6,600 3,000 380/220 (a)
Иран	50 ± 5	220 (k)	380/220 (a)	20,000 11,000 400/231 (a) 380/220 (a)

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Ирландия	50 ± 2	230 (k)	400/230 (a)	20,000 10,000 400/230 (a)
Исландия	50 ± 0,1	230	230/400	230/400
Испания	50 ± 3	380/220 (a) (e) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220/127 (a) (e)	15,000 11,000 380/220 (a)
Италия	50 ± 0,4	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a)	20,000 15,000 10,000 400/230 (a)
Йемен	50	250 (k)	440/250 (a)	440/250 (a)
Кабо-Верде		220	220	380/400
Казахстан	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Камбоджа	50 ± 1	220 (k)	220/300	220/380
Камерун	50 ± 1	220/260 (k)	220/260 (k)	220/380 (a)
Канада	60 ± 0,02	120/240 (j)	347/600 (a) 80 (f) 240 (f) 120/240 (j) 120/208 (a)	7200/12,500 347/600 (a) 120/208 600 (f) 480 (f) 240 (f)
Катар	50 ± 0,1	415/240 (k)	415/240 (a)	11,000 415/240 (a)
Кения	50	240 (k)	415/240 (a)	415/240 (a)
Кипр	50 ± 0,1	240 (k)	415/240	11,000 415/240
Киргизия	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Китай	50 ± 0,5	220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)
Колумбия	60 ± 1	120/240 (g) 120 (k)	120/240 (g) 120 (k)	13,200 120/240 (g)
Конго	50	220 (k)	240/120 (j) 120 (k)	380/220 (a)
Кувейт	50 ± 3	240 (k)	415/240 (a)	415/240 (a)
Лаос	50 ± 8	380/220 (a)	380/220 (a)	380/220 (a)
Латвия	50 ± 0,4	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Лесото		220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)
Ливан	50	220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)
Ливия	50	230 (k) 127 (k)	400/230 (a) 220/127 (a) 230 (k) 127 (k)	400/230 (a) 220/127 (a)
Литва	50 ± 0,5	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Люксембург	50 ± 0,5	380/220 (a)	380/220 (a)	20,000 15,000 5,000
Мавритания	50 ± 1	230 (k)	400/230 (a)	400/230 (a)
Мадагаскар	50	220/110 (k)	380/220 (a)	35,000 5,000 380/220
Македония	50	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	10,000 6,600 380/220 (a)
Малави	50 ± 2,5	230 (k)	400 (a) 230 (k)	400 (a)
Малайзия	50 ± 1	240 (k) 415 (a)	415/240 (a)	415/240 (a)

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)

# 1 Низковольтные сети электроснабжения

C5

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Мали	50	220 (k) 127 (k)	380/220 (a) 220/127 (a) 220 (k) 127 (k)	380/220 (a) 220/127 (a)
Мальта	50 ± 2	240 (k)	415/240 (a)	415/240 (a)
Марокко	50 ± 5	380/220 (a) 220/110 (a)	380/220 (a)	225,000 150,000 60,000 22,000 20,000
Мартиника	50	127 (k)	220/127 (a) 127 (k)	220/127 (a)
Мексика	60 ± 0,2	127/220 (a) 220 (k) 120 (l)	127/220 (a) 220 (k) 120 (l)	13,800 13,200 277/480 (a) 127/220 (b)
Мозамбик	50	380/220 (a)	380/220 (a)	6,000 10,000
Молдавия	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Непал	50 ± 1	220 (k)	440/220 (a) 220 (k)	11,000 440/220 (a)
Нигер	50 ± 1	230 (k)	380/220 (a)	15,000 380/220 (a)
Нигерия	50 ± 1	230 (k) 220 (k)	400/230 (a) 380/220 (a)	15,000 11,000 400/230 (a) 380/220 (a)
Нидерланды	50 ± 0,4	230/400 (a) 230 (k)	230/400 (a)	25,000 20,000 12,000 10,000 230/400
Новая Зеландия	50 ± 1,5	400/230 (e) (a) 230 (k) 460/230 (e)	400/230 (e) (a) 230 (k)	11,000 400/230 (a)
Норвегия	50 ± 2	230/400	230/400	230/400 690
Объединенные Арабские Эмираты	50 ± 1	220 (k)	415/240 (a) 380/220 (a) 220 (k)	6,600 415/210 (a) 380/220 (a)
Оман	50	240 (k)	415/240 (a) 240 (k)	415/240 (a)
Острова Фиджи	50 ± 2	415/240 (a) 240 (k)	415/240 (a) 240 (k)	11,000 415/240 (a)
Пакистан	50	230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a)
Папуа-Новая Гвинея	50 ± 2	240 (k)	415/240 (a) 240 (k)	22,000 11,000 415/240 (a)
Парагвай	50 ± 0,5	220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	22,000 380/220 (a)
Польша	50 ± 0,1	230 (k)	400/230 (a)	1,000 690/400 400/230 (a)
Португалия	50 ± 1	380/220 (a) 220 (k)	15,000 5,000 380/220 (a) 220 (k)	15,000 5,000 380/220 (a)
Россия	50 ± 0,2	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Руанда	50 ± 1	220 (k)	380/220 (a)	15,000 6,600 380/220 (a)
Румыния	50 ± 0,5	230 (k)	440/220	1,000 690/400 400/230
Самоа		400/230		

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Сан-Марино	50 ± 1	230/220	380	15,000 380
Саудовская Аравия	60	220/127 (a)	220/127 (a) 380/220 (a)	11,000 7,200 380/220 (a)
Свазиленд	50 ± 2,5	230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	11,000 400/230 (a)
Северная Корея	60 +0, -5	220 (k)	220/380 (a)	13,600 6,800
Сейшелы	50 ± 1	400/230 (a)	400/230 (a)	11,000 400/230 (a)
Сенегал	50 ± 5	220 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220/127 (k)	90,000 30,000 6,600
Сент-Люсия	50 ± 3	240 (k)	415/240 (a)	11,000 415/240 (a)
Сербия и Черногория	50	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	10,000 6,600 380/220 (a)
Сингапур	50	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a)	22,000 6,600 400/230 (a)
Сирия	50	220 (k) 115 (k)	380/220 (a) 220 (k) 200/115 (a)	380/220 (a)
Словакия	50 ± 0,5	230	230	230/400
Словения	50 ± 0,1	220 (k)	380/220 (a)	10,000 6,600 380/220 (a)
Соломоновы Острова	50 ± 2	240	415/240	415/240
Сомали	50	230 (k) 220 (k) 110 (k)	440/220 (j) 220/110 (j) 230 (k)	440/220 (g) 220/110 (g)
Судан	50	240 (k)	415/240 (a) 240 (k)	415/240 (a)
США, Детройт (штат Мичиган)	60 ± 0,2	120/240 (j) 120/208 (a)	480 (f) 120/240 (h) 120/208 (a)	13,200 4,800 4,160 480 (f) 120/240 (h) 120/208 (a)
США, Лос-Анджелес (штат Калифорния)	60 ± 0,2	120/240 (j)	4,800 120/240 (g)	4,800 120/240 (g)
США, Майами (штат Флорида)	60 ± 0,3	120/240 (j) 120/208 (a)	120/240 (j) 120/240 (h) 120/208 (a)	13,200 2,400 480/277 (a) 120/240 (h)
США, Нью-Йорк (штат Нью-Йорк)	60	120/240 (j) 120/208 (a)	120/240 (j) 120/208 (a) 240 (f)	12,470 4,160 277/480 (a) 480 (f)
США, Питтсбург (штат Пенсильвания)	60 ± 0,03	120/240 (j)	265/460 (a) 120/240 (j) 120/208 (a) 460 (f) 230 (f)	13,200 11,500 2,400 265/460 (a) 120/208 (a) 460 (f) 230 (f)
США, Портленд (штат Орегона)	60	120/240 (j)	227/480 (a) 120/240 (j) 120/208 (a) 480 (f) 240 (f)	19,900 12,000 7,200 2,400 277/480 (a) 120/208 (a) 480 (f) 240 (f)
США, Сан-Франциско (штат Калифорния)	60 ± 0,08	120/240 (j)	277/480 (a) 120/240 (j)	20,800 12,000 4,160 277/480 (a) 120/240 (g)

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)

# 1 Низковольтные сети электроснабжения

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение, В	Коммерческое напряжение, В	Промышленное напряжение, В
США, Толедо (штат Огайо)	60 ± 0,08	120/240 (j) 120/208 (a)	277/480 (c) 120/240(h) 120/208 (j)	12,470 7,200 4,800 4,160 480 (f) 277/480 (a) 120/208 (a)
США, Шарлот (штат Северная Каролина)	60 ± 0,06	120/240 (j) 120/208 (a)	265/460 (a) 120/240 (j) 120/208 (a)	14,400 7,200 2,400 575 (f) 460 (f) 240 (f) 265/460 (a) 120/240 (j) 120/208 (a)
Сьерра Леоне	50 ± 5	230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	11,000 400
Таджикистан	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Таиланд	50	220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Танзания	50	400/230 (a)	400/230 (a)	11,000 400/230 (a)
Того	50	220 (k)	380/220 (a)	20,000 5,500 380/220 (a)
Тунис	50 ± 2	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	30,000 15,000
				10,000 380/220 (a)
Туркменистан	50	380/220 (a) 220 (k) 220/127 (a) 127 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Турция	50 ± 1	380/220 (a)	380/220 (a)	15,000 6,300 380/220 (a)
Уганда	+ 0,1	240 (k)	415/240 (a)	11,000 415/240 (a)
Украина	+ 0,2 /- 1,5	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)
Уругвай	50 ± 1	220 (b) (k)	220 (b) (k)	15,000 6,000 220 (b)
Филиппины	60 ± 0,16	110/220 (j)	13,800 4,160 2,400 110/220 (h)	13,800 4,160 2,400 440 (b) 110/220 (h)
Финляндия	50 ± 0,1	230 (k)	400/230 (a)	690/400 (a) 400/230 (a)
Фолклендские острова	50 ± 3	230 (k)	415/230 (a)	415/230 (a)
Франция	50 ± 1	400/230 (a) 230 (a)	400/230 690/400 590/100	20,000 10,000 230/400
Хорватия	50	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a)
Чад	50 ± 1	220 (k)	220 (k)	380/220 (a)
Чехия	50 ± 1	230	500 230/400	400,000 220,000 110,000 35,000 22,000 10,000 6,000 3,000
Чили	50 ± 1	220 (k)	380/220 (a)	380/220 (a)

Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений (продолжение на след. стр.)

Страна	Частота (Гц) + отклонение (%)	Бытовое напряжение (В)	Коммерческое напряжение (В)	Промышленное напряжение (В)
Швейцария	50 ± 2	400/230 (a)	400/230 (a)	20,000 10,000 3,000 1,000 690/500
Швеция	50 ± 0,5	400/230 (a) 230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	6,000 400/230 (a)
Шри-Ланка	50 ± 2	230 (k)	400/230 (a) 230 (k)	11,000 400/230 (a)
Эстония	50 ± 1	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a) 220 (k)	380/220 (a)
Эфиопия	50 ± 2,5	220 (k)	380/231 (a)	15,000 380/231 (a)
Южная Африка	50 ± 2,5	433/250 (a) 400/230 (a) 380/220 (a) 220 (k)	11,000 6,600 3,300 433/250 (a) 400/230 (a) 380/220 (a)	11,000 6,600 3,300 500 (b) 380/220 (a)
Южная Корея	60	100 (k)	100/200 (j)	
Ямайка	50 ± 1	220/110 (g) (j)	220/110 (g) (j)	4,000 2,300 220/110 (g)
Япония (восточная часть)	50 +0,1 -0,3	200/100 (h)	200/100 (h) (до 50 кВт)	140,000 60,000 20,000 6,000 200/100 (h)

Схемы соединений

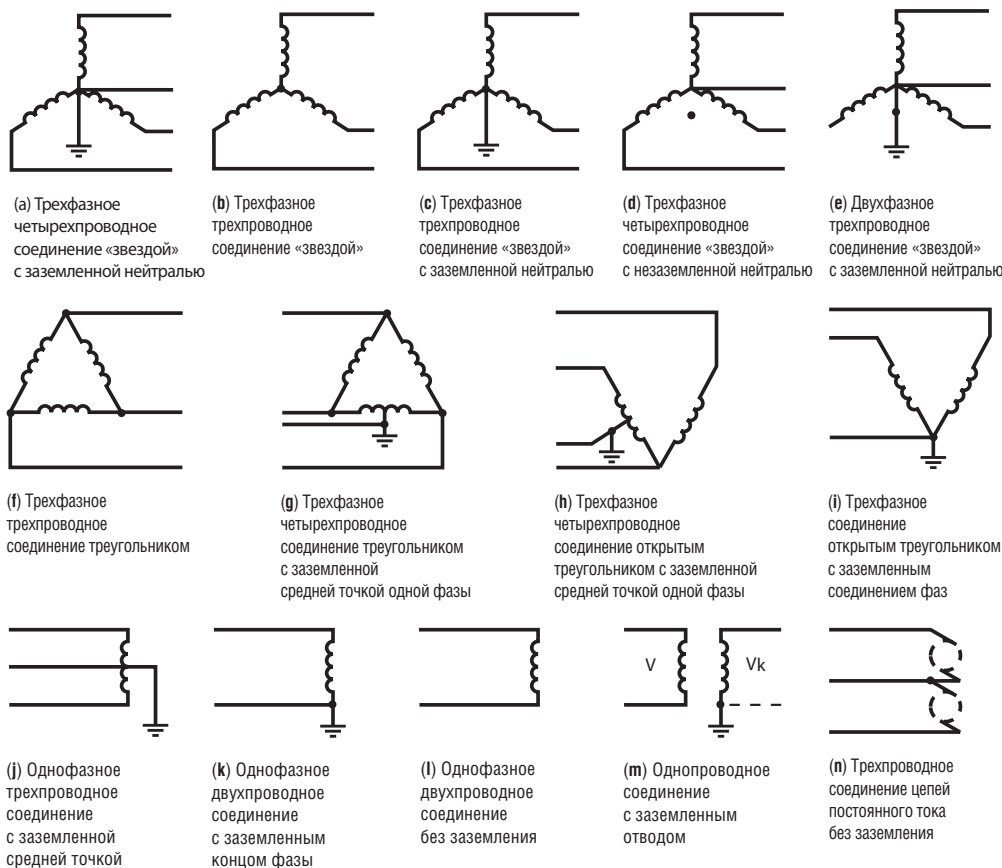


Рис. С1: Напряжение локальных низковольтных распределительных сетей и соответствующие схемы соединений

## Бытовые и коммерческие потребители

Назначение низковольтной распределительной сети — обеспечить присоединение потребителей к силовому подземному кабелю или воздушной линии электропередач.

Номинальный ток распределительных сетей определяется количеством присоединяемых потребителей и номинальной величиной электрической мощности каждого потребителя.

Имеются два основных ограничивающих параметра распределительной сети:

- максимальный ток, который она может длительно пропускать;
- максимальная длина кабеля, при которой при передаче максимального тока не превышает максимально допустимое падение напряжения.

Эти параметры означают, что величина нагрузок, которые могут быть присоединены к низковольтным распределительным системам, ограничены.

Для диапазона низковольтных систем, перечисленных во втором параграфе подпункта 1.1 — от однофазных напряжением 120 В до трехфазных напряжением 240/415 В — максимально допустимые электрические нагрузки, подключаемые к низковольтной распределительной сети, могут составлять величины<sup>1)</sup>, указанные на **рис. C2**.

Система	Максимально допустимый ток в расчете на один ввод (А)	кВА
120 В, 1-фазная 2-проводная	60	7,2
120/240 В, 1-фазная 3-проводная	60	14,4
120/208 В, 3-фазная 4-проводная	60	22
120/208 В, 3-фазная 4-проводная	120	80
220/380 В, 3-фазная 4-проводная	120	83
240/415 В, 3-фазная 4-проводная	120	86

**Рис. C2:** Типичные максимально допустимые нагрузки, подключаемые к низковольтной распределительной сети

Правила эксплуатации, принятые различными поставщиками электроэнергии, заметно различаются, и поэтому трудно указать какие-то «стандартные» значения.

Должны учитываться следующие факторы:

- Мощность существующей распределительной сети, к которой должна быть подключена рассматриваемая новая нагрузка.
- Суммарная нагрузка, уже присоединенная к данной распределительной сети.
- Месторасположение новой нагрузки вдоль трассы распределительной сети, т.е. близко ли от подстанции или около дальнего конца этой сети и т.д.

Каждый случай должен рассматриваться индивидуально.

Указанные выше уровни нагрузок применимы ко всем бытовым потребителям и будут достаточны для электроустановок многих административных, коммерческих и аналогичных зданий.

## Малые и средние промышленные потребители (питание по выделенным низковольтным линиям непосредственно от подстанции высокого/низкого напряжения системы электроснабжения)

Малые и средние промышленные потребители тоже могут вполне удовлетворительно питаться от сетей низкого напряжения.

Для питания нагрузок, превышающих максимально допустимый предел по потребляемой мощности на один ввод от распределительной системы, обычно используется отдельный кабель, который может быть проложен от низковольтного распределительного щита с плавкими предохранителями или автоматами, установленного в подстанции системы электроснабжения общего пользования.

Максимально допустимая нагрузка, питание которой может быть обеспечено таким способом, обычно ограничена только наличием резервной мощности трансформатора на данной подстанции.

На практике же:

- большие электрические нагрузки (например, > 300 кВА) требуют соответственно кабелей большего сечения, поэтому, если центр нагрузки не расположен вблизи подстанции, такой способ может оказаться экономически невыгодным;
- многие сети энергоснабжения предпочитают обеспечивать питание нагрузок, потребляющих свыше 200 кВА (эта величина варьируется для разных поставщиков), на высоком напряжении.

По этим причинам выделенные низковольтные линии (напряжением от 220/380 В до 240/415 В) обычно используются для питания нагрузок, потребляющих от 80 до 250 кВА.

Потребители, питание которых обычно осуществляется от низковольтных сетей:

- жилые здания;
- магазины и коммерческие здания;
- небольшие фабрики, цеха и заправочные станции;
- рестораны;
- фермы и др.

(1) Величины, показанные на рис. C2, являются только ориентировочными. Для первых трех систем произвольно выбрано максимальное значение рабочего тока 60 А, поскольку для установленного допустимого отклонения напряжения в процентах меньшие падения напряжения допускаются при этих более низких напряжениях. Для второй группы систем тоже произвольно было выбрано максимальное допустимое значение тока 120 А.



В городах и больших населенных пунктах стандартные низковольтные распределительные кабели, защищенные предохранителем с помощью распределительных коробок, образуют сеть. В распределительных коробках некоторые перемычки удаляются, и поэтому каждая электрораспределительная линия, выходящая из подстанции, образует разветвленную расширяемую радиальную систему, как показано на **рис. С3**.

## 1.2 Низковольтные распределительные сети

В европейских странах стандартными напряжениями для трехфазных четырехпроводных систем электроснабжения приняты 220/380 В или 230/400 В. В настоящее время, в соответствии с новейшим международным стандартом МЭК 60038, многие страны переоборудуют свои низковольтные сети под номинальное напряжение 230/400 В. В городах и населенных пунктах средних и больших размеров используются подземные кабельные распределительные системы.

Распределительные понижающие подстанции, расположенные на расстоянии 500-600 метров друг от друга, обычно включают в себя:

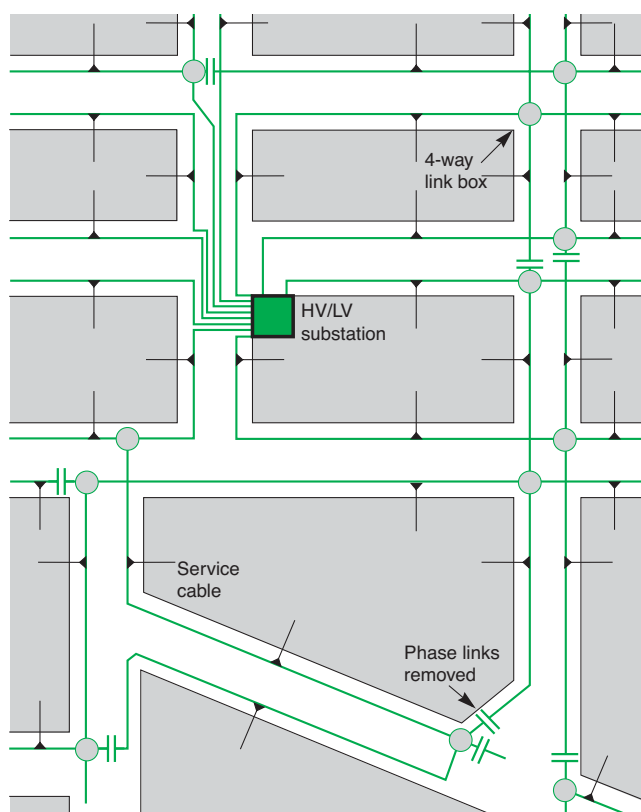
- Высоковольтное распределительное устройство состоящее, из трех или четырех шкафов, в которых устанавливаются:
  - Вводной и выходной выключатели нагрузки, образующие кольцевую магистраль;
  - Один или два выключателя (или комбинированных выключателя нагрузки (выключатель нагрузки с встроенным предохранителем)) для подключения трансформатора.
- Один или два трансформатора мощностью до 1000 кВА.
- Один или два распределительных щита на 6-8 отходящих линий с защитой плавкими предохранителями для трехфазной четырехпроводной низковольтной системы или с автоматическими выключателями в пластиковом корпусе, предназначенными для контроля и защиты 4-жильных отходящих распределительных кабелей.

Выход трансформатора соединяется с низковольтными шинами через выключатель нагрузки или просто через разъединительные вставки.

В районах с высокой плотностью нагрузки прокладывается сеть распределительных кабелей стандартных сечений, при этом обычно один кабель прокладывается вдоль каждого тротуара, а 4-сторонние распределительные коробки устанавливаются в люках на углах улиц, где два кабеля пересекаются.

Тенденция последнего времени – применение всепогодных наземных шкафов, устанавливаемых вплотную к стене или, по возможности, “заподлицо” со стеной.

Перемычки в распределительных коробках устанавливаются так, чтобы на выходе из подстанции распределительные кабели образовывали радиальные цепи с разомкнутыми концами (рис. С3). В том месте, где распределительная коробка объединяет распределительный кабель от одной подстанции с распределительным кабелем от соседней подстанции, перемычки между фазами удаляются или заменяются плавкими предохранителями, однако перемычка для нейтрали остается на месте.



**Рис. С3:** Одна из возможных схем построения низковольтной сети с радиальными разветвленными распределительными линиями путем удаления перемычек между фазами

# 1 Низковольтные сети электроснабжения

C11

В городских районах с меньшей плотностью электрических нагрузок обычно используется более экономичный вариант системы радиального распределения энергии, в котором по мере удаления от питающей электрической подстанции устанавливаются провода меньшего сечения.

Использование усовершенствованных методов с применением воздушного кабеля из изолированных скрученных проводов, установленного на опорах, является в настоящее время принятой практикой во многих странах.

В Европе каждая подстанция системы энергоснабжения способна обеспечить низковольтное питание района, расположенного в радиусе приблизительно 300 м. Системы, применяемые в странах Северной и Центральной Америки, состоят из высоковольтной сети, от которой много небольших понижающих трансформаторов питают каждый одного или нескольких потребителей по прямому питающему кабелю, идущему от трансформатора.

Ранее устройства ввода и счетчики электроэнергии устанавливались внутри здания потребителя. Современная тенденция состоит в том, чтобы размещать эти устройства вне здания в защищенном шкафу.

Такая схема позволяет создать очень гибкую систему, в которой целая подстанция может быть выведена из эксплуатации, а участок, который она обычно снабжала электроэнергией, будет обслуживаться из распределительных коробок соседних подстанций.

Кроме того, короткие участки силовых кабелей (между двумя распределительными коробками) могут быть отсоединены для поиска повреждений и ремонта.

В случае большой плотности нагрузки, подстанции располагаются ближе друг к другу, и иногда требуется применение трансформаторов мощностью до 1500 кВА.

В районах с меньшей плотностью нагрузки широко применяются другие схемы построения городской низковольтной распределительной сети на основе отдельно стоящих низковольтных распределительных стоек, установленных на земле в стратегических точках этой сети. Такая схема основана на принципе использования радиальных распределительных кабелей постепенно уменьшающегося сечения, у которых размер токоведущей жилы кабеля уменьшается по мере сокращения числа потребителей с удалением от подстанции.

В такой схеме несколько крупно-секционированных низковольтных радиальных фидеров питают от распределительного щита данной подстанции шины распределительной стойки, от которой распределительные кабели меньшего сечения снабжают энергией потребителей, непосредственно окружающих эту стойку.

В торговых городках, деревнях и сельских районах распределение энергии на протяжении многих лет традиционно основывалось на использовании неизолированных медных проводов, закрепленных на деревянных, бетонных или стальных опорах и питаемых от трансформаторов, установленных на опорах или земле.

В последние годы были разработаны низковольтные изолированные провода, из которых скручиванием получают двух- или четырехжильный самонесущий кабель для использования в воздушных линиях электропередачи. Они считаются более безопасными и визуально более подходящими, чем неизолированные медные провода.

Это в частности относится к случаям, когда провода крепятся к стенам (например, проводка под карнизом), где они вряд ли заметны.

Интересно, что аналогичные принципы были использованы при более высоких напряжениях, и сейчас на рынке имеются самонесущие жгуты из изолированных проводов для использования в высоковольтных наземных установках для работы при напряжении 24 кВ.

В случаях, когда для электроснабжения поселка используются несколько подстанций, соединение соответствующих фаз осуществляется на опорах, на которых встречаются низковольтные линии от разных подстанций.

Практика, принятая в странах Северной и Центральной Америки, разительно отличается от той, которая используется в Европе — низковольтные распределительные сети практически отсутствуют, и случаи подачи трехфазного питания к жилым помещениям в жилом районе редки.

Распределение электроэнергии эффективно осуществляется на высоком напряжении, и применяемый способ вновь отличается от стандартной европейской практики. Применяемая высоковольтная система представляет собой фактически трехфазную четырехпроводную систему, от которой однофазные распределительные сети (линейный и нулевой провода) подают питание на множество однофазных трансформаторов. Вторичные обмотки этих трансформаторов имеют выведенную среднюю точку для получения однофазного трехпроводного питания напряжением 120/240 В. Центральные провода являются нейтральными проводами низковольтной сети, которые вместе с нейтральными проводами высоковольтной сети глухо заземлены через определенные интервалы вдоль своей длины.

Каждый понижающий трансформатор обычно питает один или несколько домов с прилегающими постройками непосредственно с помощью радиального питающего кабеля (кабелей) или воздушной линии (линий) электропередачи.

В этих странах существует много других систем, но описанная выше является самой распространенной.

На **рис. C4**, приведенном на следующей странице, показаны основные особенности этих двух систем.

## 1.3 Присоединение потребителей к сети

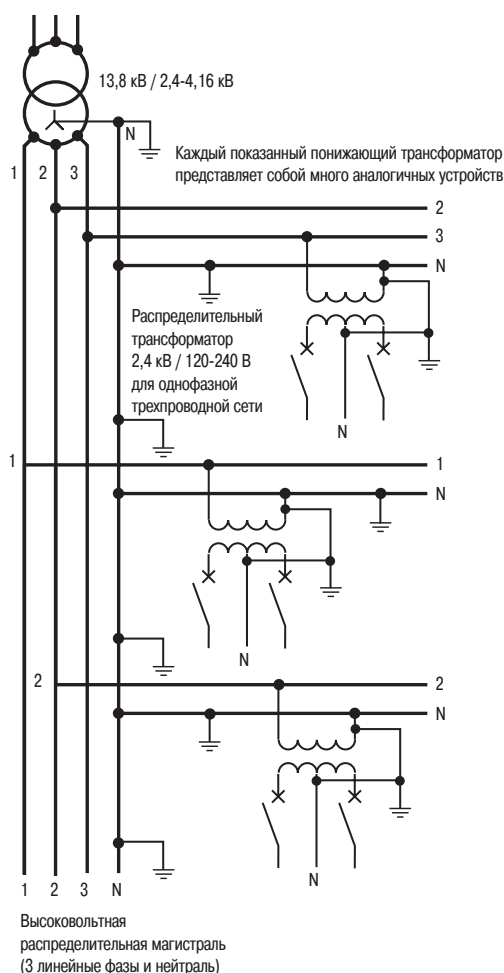
В прошлом подземные кабели или настенные изолированные провода от воздушной линии электропередачи неизменно оканчивались внутри помещений потребителя, где устанавливались вводная кабельная коробка, стандартные плавкие предохранители (не доступные для этого пользователя) и счетчики электроэнергии.

Тенденция последнего времени заключается в размещении этих вводных устройств по возможности в защищенном корпусе вне пределов здания.

Точкой присоединения потребителя к сети электроснабжения часто являются выходные клеммы счетчика(ов) электроэнергии или, в некоторых случаях, выходные клеммы главного автомата защиты электроустановки (в зависимости от принятой местной практики), к которым сотрудниками сети энергоснабжения после удовлетворительного испытания и проверки рассматриваемой установки делается подключение.

Типичная схема подключения показана на **рис. C5** (на следующей странице).

С12



**Примечание:** на подстанциях при первичных напряжениях свыше 72,5 кВ в некоторых европейских странах первичная обмотка включается по схеме «заземленная звезда», а вторичная — по схеме «треугольник». В этом случае на стороне вторичной обмотки подключается заземляющий реактор со схемой соединения обмоток в зигзаг, нейтраль которого через резистор соединяется с землей. Часто такой заземляющий реактор имеет вторичную обмотку для обеспечения этой подстанции низковольтным трехфазным питанием. В этом случае его называют «заземляющим трансформатором».

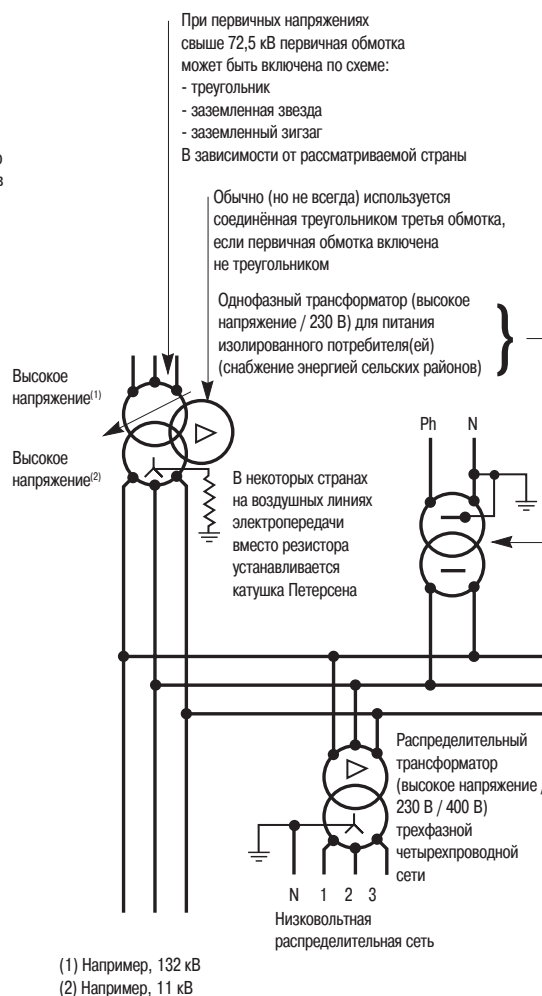


Рис. С4: Широко применяемые американские и европейские системы подключения потребителей к сети электроснабжения

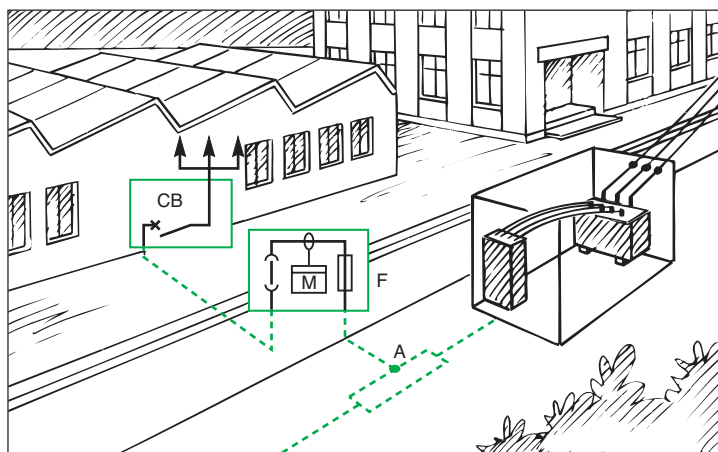


Рис. С5: Типичная схема подключения потребителей для систем с заземлением типа TT

# 1 Низковольтные сети электроснабжения

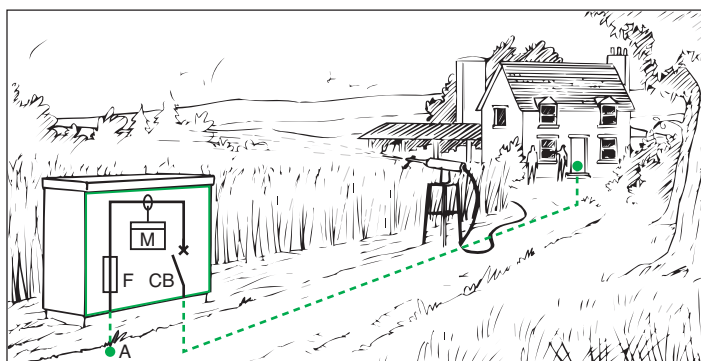
Низковольтные потребители обычно снабжаются электроэнергией по системам TN или TT, описанным в главах F и G. Главный автомат защиты электроустановки, питающейся от системы TT, должен обязательно включать в свой состав устройство защиты от утечек тока на землю. При использовании системы TN для максимальной токовой защиты требуется выключатель или плавкий предохранитель-выключатель нагрузки.

Применение автоматического выключателя в литом корпусе с функцией защиты от утечки токов на землю УЗО (устройство защитного отключения), является обязательным на вводе любой низковольтной электроустановки и является частью системы заземления типа TT. Причина использования этой функции и соответствующие уровни токов утечки, при которых срабатывает выключатель, рассматриваются в пункте 3 главы G.

Еще одной причиной использования такого выключателя в литом корпусе является то, что потребитель не может превысить заявленную им и отраженную в договоре с энергоснабжающей организацией максимальную величину потребляемой мощности, поскольку при превышении установленного уровня устройство защиты от перегрузки, настроенное и опломбированное энергоснабжающей организацией, отключит подачу питания. Включение и отключение выключателя в литом корпусе доступно пользователю без ограничений, поэтому если такой выключатель самопроизвольно сработал при перегрузке или из-за неисправности бытового электроприбора, питание может быть быстро восстановлено после устранения причины anomального выключения.

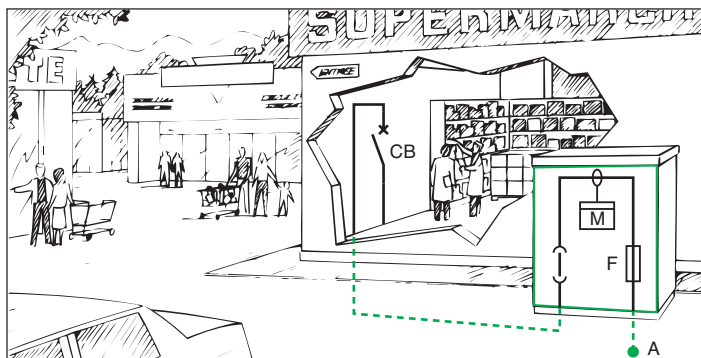
Для удобства и потребителя и контролера, считывающего показания счётчиков электроэнергии, счетчики размещают в настоящее время за пределами территории домовладения:

- в отдельно стоящей будке, закрепленной на столбе (рис. C6 и D7);
- внутри здания, но при этом кабельный ввод и плавкие предохранители, устанавливаемые энергоснабжающей организацией, должны располагаться в установленном «заподлицо» защищенном шкафу, к которому возможен доступ со стороны дороги общего пользования (см. рис. C8 на следующей странице);
- для частных бытовых пользователей оборудование, показанное в шкафу на рис. C5, размещается в защищенном шкафу, установленном вертикально на металлической раме в палисаднике или «заподлицо» на стене-ограде и доступном для уполномоченного персонала со стороны тротуара. На рис. C9 показана общая схема, в которой отключение цепи обеспечивается съёмными плавкими вставками.



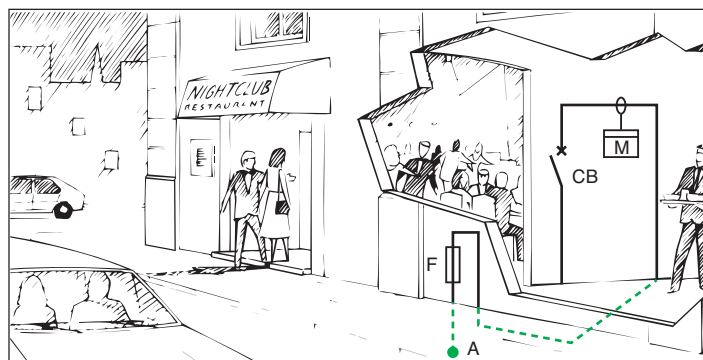
Для такого типа электроустановки часто требуется размещать главный автомат защиты на некотором расстоянии от места использования электроэнергии, например лесопилки, насосных станций и т.п.

Рис. C6: Типичная электроустановка сельского типа



Главный автомат защиты установки располагается на территории домовладения в случаях, когда он настроен на срабатывание при превышении заявленной величины потребляемой мощности

Рис. C7: Электроустановки полугородского типа (торговые центры и др.)



Питающий кабель заканчивается в установленном «заподлицо» настенном шкафу, в котором находятся разъединительные плавкие вставки, к которым возможен доступ со стороны дороги. Этот метод предпочтителен по эстетическим причинам, когда потребитель может обеспечить удобное расположение счетчика и главного автомата защиты.

Рис. С8: Подключение электроустановок в центре города

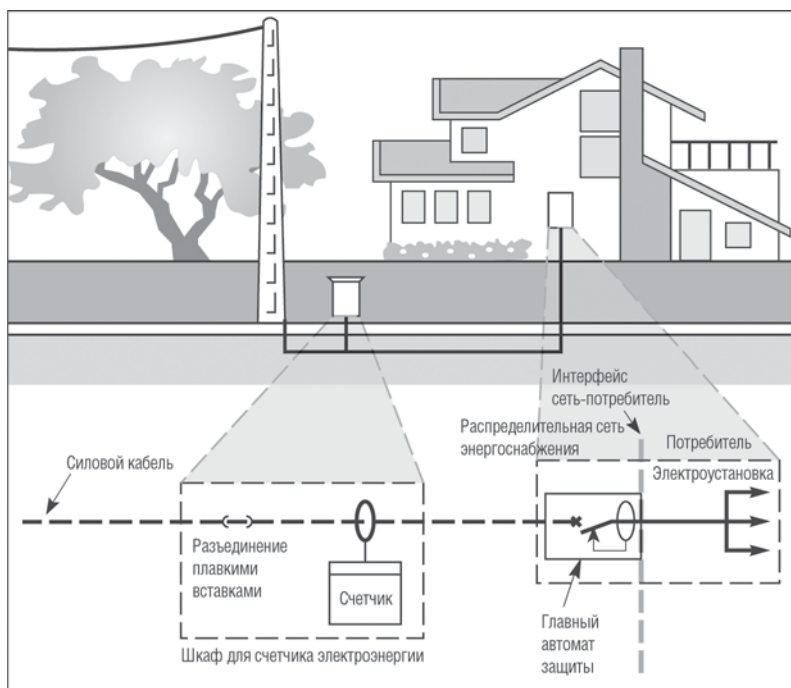


Рис. С9: Типичная схема подвода низковольтного питания к бытовым потребителям

В области электронного учета электроэнергии для энергоснабжающих организаций были разработаны эффективные методы измерения количества потребленной электроэнергии и выставления потребителям счетов на оплату потребленной электроэнергии, при этом либерализация рынка увеличила потребности в сборе большего объема данных со счетчиков. Например, системы электронного измерения могут также помочь энергоснабжающим компаниям понять графики потребления энергии потребителями. Аналогично, они будут полезны для развития каналов связи по ЛЭП и радиоканалам.

Если это экономически обосновано, применяются также системы предоплаты. Такие системы основаны на том, что потребители, сделавшие предоплату в специальных пунктах приема платежей, получают электронные карточки, с помощью которых информация, касающаяся этого платежа, передается на счетчики. Судя по всему, к настоящему времени основные вопросы для этих систем – безопасность и эксплуатационная совместимость – успешно решены. Привлекательность таких систем заключается в том, что они заменяют не только счетчики, но и системы выставления счетов, а также считывание показаний счетчиков контролерами и контроль за сбором платежей.

Необходимый уровень напряжения на входных клеммах питания потребителя важен для успешной работы оборудования и бытовых приборов. Фактические значения тока и соответствующие потери напряжения в типичной низковольтной сети показывают важность поддержания высокого коэффициента мощности как способа снижения потерь напряжения.

## 1.4 Качество поставляемой электроэнергии

В самом широком смысле качество электроэнергии в низковольтной распределительной сети означает:

- соответствие нормативным требованиям в отношении величины напряжения и частоты;
- отсутствие недопустимых колебаний и отклонений напряжения;
- бесперебойное снабжение электроэнергией, за исключением отключений на плановое техническое обслуживание, или отключений, вызванных системными неисправностями или другими чрезвычайными ситуациями;
- сохранение формы кривой напряжения, близкой к синусоидальной.

В данном подразделе будет рассмотрено только поддержание величины напряжения, остальные вопросы обсуждаются в подразделе 1.3 главы E.

В большинстве стран органы, отвечающие за электроснабжение, обязаны поддерживать уровень напряжения на входных клеммах потребителей в пределах  $\pm 5\%$  (или в некоторых случаях  $\pm 6\%$  и больше – см. таблицу D1) от заявленного номинального значения.

И вновь МЭК и большинство национальных стандартов рекомендуют, чтобы низковольтные приборы проектировались и испытывались на функционирование при изменениях напряжения в пределах  $\pm 10\%$  от номинального значения. Это оставляет запас на самые худшие условия 5%-й допустимой потери напряжения в сети электроустановки (например,  $-5\%$  на входных клеммах). Отклонения напряжения в типичной системе распределения электроэнергии происходят следующим образом: напряжение на высоковольтных клеммах понижающего трансформатора обычно поддерживается в пределах диапазона  $\pm 2\%$  с помощью автоматических переключателей (под нагрузкой) отпаяк трансформаторов на подстанциях, питающих эту высоковольтную сеть от распределительной сети более высокого напряжения.

Если рассматриваемый понижающий трансформатор расположен вблизи подстанции, этот 2%-й диапазон отклонений напряжений может приходиться на уровень напряжения, превышающий номинальную величину высокого напряжения. Например, в системе 20-кВ напряжение может составлять  $20,5 \text{ кВ} \pm 2\%$ . В этом случае в распределительном понижающем трансформаторе переключатель отпаяк должен быть установлен в положение  $+2,5\%$ .

И наоборот, в местах, удаленных от подстанций, возможна величина напряжения  $19,5 \text{ кВ} \pm 2\%$ , и в этом случае переключатель отпаяк должен быть установлен в положение  $-5\%$ .

Разные уровни напряжения в системе допустимы и зависят от схемы перетоков мощности. Кроме того, эти различия являются причиной использования термина «номинальное» применительно к напряжению в системе.

### Практическое применение

Если на понижающем трансформаторе правильно установлен переключатель отпаяк, напряжение на выходе ненагруженного трансформатора будет поддерживаться в пределах  $\pm 2\%$  от его выходного напряжения холостого хода.

Для того чтобы нагруженный трансформатор мог поддерживать необходимый уровень напряжения, выходное напряжение холостого хода должно быть максимально возможным, но не превышать верхний предел  $+5\%$  (эта величина взята для примера). В современной практике соотношение обмоток трансформатора обычно дает выходное напряжение холостого хода около 104% от номинального значения<sup>1</sup>, если к высоковольтной обмотке прикладывается номинальное напряжение или оно корректируется регулятором коэффициента трансформации в соответствии с описанным выше способом. В рассматриваемом случае это приведет к диапазону изменения напряжений от 102 до 106%.

Типичный трансформатор низковольтной распределительной сети имеет напряжение короткого замыкания  $-U_k\% = 5\%$ . Если предположить, что его активная составляющая напряжения имеет 0,1 от этой величины, то потеря напряжения в таком трансформаторе при полной нагрузке и коэффициенте мощности 0,8, составит:

$$\text{потеря напряжения } (\%) = R\% \cos \varphi + X\% \sin \varphi = 0,5 \times 0,8 + 5 \times 0,6 = 0,4 + 3 = 3,4\%$$

При этом диапазон напряжений на выходных клеммах полностью нагруженного трансформатора составит от  $(102 - 3,4) = 98,6\%$  до  $(106 - 3,4) = 102,6\%$ .

Тогда максимально допустимая потеря напряжения на распределительном кабеле составит  $98,6 - 95 = 3,6\%$ .

В практическом смысле это означает, что в трехфазной четырехпроводной распределительной сети напряжением 230/400 В кабель средних размеров с медными жилами сечением 240 мм<sup>2</sup> сможет обеспечить питание суммарной электрической нагрузки 292 кВА (при коэффициенте мощности 0,8), распределенной равномерно по длине кабеля 306 метров. Или же может быть обеспечено питание такой же нагрузки, расположенной на территории одного потребителя на расстоянии 153 метра от трансформатора при такой же потере напряжения и т.д.

Интересно, что согласно расчетам, приведенным в стандарте МЭК 60287 (1982 г.), максимальная мощность, передаваемая таким кабелем, составляет 290 кВА и поэтому диапазон допустимых напряжений в 3,6% не является чрезмерно ограничительным, т.е. такой кабель может полностью нагружаться для передачи мощности на расстояния, обычно требуемые в низковольтных распределительных системах.

Кроме того, отстающий коэффициент мощности 0,8 соответствует промышленным нагрузкам. В смешанных полупромышленных районах более типичным является значение этого коэффициента 0,85, а для расчетов применительно к жилым районам обычно используется значение 0,9. Поэтому приведенная выше потеря напряжения может рассматриваться как худший случай.

(1) Трансформаторы, спроектированные в соответствии со стандартом МЭК на напряжение 230/400 В будут иметь выходное напряжение холостого хода 420 В, т.е. 105% от номинального напряжения.



В данном справочнике не будут рассматриваться конкретные тарифы, поскольку в мире действует столько же различных структур тарифов, сколько существует энергоснабжающих компаний.

Некоторые из тарифов очень сложные по структуре, но определенные элементы являются для всех них общими и направленными на то, чтобы стимулировать потребителей контролировать потребление ими энергии так, чтобы снизить стоимость ее производства, передачи и распределения.

Имеются два основных метода, которые позволяют снизить стоимость электроэнергии, поставляемой потребителям:

- снижение потерь энергии при ее производстве, передаче и распределении. В принципе, минимальные потери в энергосистеме достигаются тогда, когда все ее компоненты функционируют при коэффициенте мощности 1,0;
- снижение пикового спроса на электроэнергию при одновременном увеличении спроса в периоды низкого энергопотребления, благодаря чему обеспечивается более полное использование генерирующей установки, и минимизируется степень ее резервирования.

### Снижение потерь

Хотя идеальное условие, указанное выше в первом способе снижения стоимости электроэнергии, не может быть реализовано на практике, многие структуры тарифов основаны частично как на величине максимума нагрузки кВА, так и на потребленных киловатт x часах. Поскольку при заданной нагрузке в киловаттах минимальное значение киловольт x амперов имеет место при коэффициенте мощности, равном единице, то потребитель может минимизировать свои затраты на оплату энергии, приняв меры по повышению коэффициента мощности своей нагрузки (этот вопрос рассматривается в главе К). Максимум нагрузки кВА, обычно используемый для тарифных целей, представляет собой наибольшее, среднее, за фиксированный промежуток времени (обычно 10, 30 или 60 минут) значение нагрузки в кВА, имевшее место в течение каждого расчетного периода. Этот принцип описан ниже в подразделе «Принцип учета максимального потребления электроэнергии».

### Снижение пикового спроса на электроэнергию

Вторая цель, т.е. снижение пикового спроса на электроэнергию при одновременном увеличении спроса в периоды низкого энергопотребления, привела к появлению тарифов, которые предлагают существенное снижение стоимости электроэнергии в:

- определенные часы в течение суток;
- определенные периоды года.

Простейшим примером является бытовой потребитель с водонагревателем накопительного типа (или комнатным электрообогревателем накопительного типа). Датчик электроэнергии имеет два цифровых регистра, один из которых работает днем, а другой (переключаемый таймером) — ночью. Контакт, управляемый этим таймером, замыкает цепь питания водонагревателя, и потребление им электроэнергии показывается регистром, к которому применяется сниженный тариф. Этот нагреватель может быть включен и выключен в любое время в течение дня, но учет энергии будет проводиться по обычному тарифу. Крупные промышленные потребители могут иметь три или четыре тарифа, действующие в разные периоды суток, и аналогичное число тарифов для разных периодов года. В таких схемах соотношение стоимостей киловатт x часа в периоды максимального и минимального спроса в течение года может достигать 10:1.

### Счетчики энергии

Следует отметить, что для реализации этого вида учета с использованием традиционного электромеханического оборудования необходимы высококачественные приборы и устройства. К настоящему времени внедрены в эксплуатацию последние разработки в области электронного учета, микропроцессоров и дистанционного телеуправления<sup>1</sup> из диспетчерского центра энергоснабжающей организации (призванный изменить распределение периодов пикового потребления по времени, на протяжении года и др.). Это позволило значительно облегчить применение рассмотренных выше принципов.

Как отмечалось выше, в большинстве стран некоторые тарифы частично основаны на учете не только потребленных киловатт x часов, но и потребленной полной мощности (кВА x ч) в течение расчетных (обычно трехмесячных) периодов. Максимальное потребление полной мощности, зафиксированное счетчиком, который будет описан ниже, представляет собой фактически максимальное среднее количество киловольт-амперов, зафиксированное в последующие интервалы на протяжении расчетного периода, т.е. максимум нагрузки в кВА.

(1) Система телеуправления представляет собой систему управления, в которой на соответствующих подстанциях в низковольтную сеть подается ток звуковой частоты (обычно 175 Гц). Этот сигнал передается в виде кодированных импульсов. В системе используются реле, настроенные на эту частоту сигнала и распознающие используемый код, которые срабатывают и инициируют выполнение требуемой функции. Предусмотрено до 960 дискретных управляющих сигналов.



На **рис. C10** показана типичная кривая спроса на электроэнергию для двухчасового периода, разделенного на 10-минутные интервалы. Счетчик измеряет среднее значение кВА в течение каждого из этих 10-минутных интервалов.



Рис. C10: Максимальное среднее значение мощности за двухчасовой период

### Принцип учета максимального потребления электроэнергии

Счетчик киловольт-ампер x часов во многом аналогичен счетчику киловатт x часов потребленной энергии с той разницей, что в нем соотношение фаз тока и напряжения было изменено с тем, чтобы он измерял киловольт-ампер x часы. Кроме того, вместо набора шкал декадных датчиков, используемых в обычном счетчике электроэнергии, данный прибор оснащен вращающимся стрелочным указателем. Когда этот указатель поворачивается, он измеряет киловольт-ампер x часы, перемещая перед собой красный индикатор. По окончании 10 минут стрелочный указатель поворачивается на определенную часть шкалы (он спроектирован так, что не сможет совершить полный оборот за 10 минут), а затем электрически сбрасывается в нулевое положение, чтобы начать новый 10-минутный цикл. Красный индикатор остается в положении, которое было достигнуто измерительным указателем, и это положение соответствует количеству киловольт-ампер x часов, потребленных нагрузкой в течение 10 минут. Вместо шкалы, градуированной в киловольт-ампер x часах, можно использовать градуировку в единицах средней мощности (кВА). Эта ситуация поясняется ниже.

Предположим, что точка, в которой остановился красный индикатор, соответствует 5 кВАч. Известно, что в течение 10 мин, т.е.  $\frac{1}{6}$  часа, имели место потоки реактивной мощности.

Если теперь 5 кВАч разделить на количество часов, то можно получить среднее количество киловольт-амперов за этот период.

В данном случае среднее количество киловольт-амперов за указанный период составит:

$$5 \cdot \frac{1}{\frac{1}{6}} = 5 \cdot 6 = 30 \text{ кВА}$$

Каждая точка шкалы будет аналогичным образом градуирована, т.е. среднее величина кВА будет в шесть раз больше, чем величина кВА x ч для данной точки. Аналогичное рассуждение можно применить к любому другому интервалу времени возврата указателя в исходное положение.

В конце расчетного периода красный индикатор будет находиться в максимальном из всех средних значений, зафиксированных за рассматриваемый отчетный период.

В начале каждого расчетного периода красный индикатор возвращается в нулевое положение. Описанные выше электромеханические счетчики в настоящее время быстро заменяются электронными приборами. Однако, основные принципы измерения, используемые в этих электронных счетчиках, остались такими же, что и описанные выше.



## Глава D

# Руководство по выбору архитектуры сети высокого и низкого напряжения

Содержание		
1	Преимущества для пользователя	D3
2	Упрощенный процесс проектирования архитектуры	D4
	2.1 Проектирование архитектуры	D4
	2.2 Полный процесс	D5
3	Характеристики электроустановки	D7
	3.1 Тип деятельности	D7
	3.2 Топология объекта	D7
	3.3 Компоновка	D7
	3.4 Надежность питания	D8
	3.5 Ремонтопригодность	D8
	3.6 Гибкость	D8
	3.7 Потребляемая мощность	D8
	3.8 Распределение нагрузки	D9
	3.9 Чувствительность к отключениям питания	D9
	3.10 Чувствительность к помехам	D9
	3.11 Способность цепей создавать помехи	D10
	3.12 Другие факторы или ограничения	D10
4	Технические характеристики	D11
	4.1 Окружающая среда, атмосфера	D11
	4.2 Сервисный показатель	D11
	4.3 Другие факторы	D12
5	Критерии оценки архитектуры	D13
	5.1 Длительность монтажа	D13
	5.2 Окружающая среда	D13
	5.3 Уровень профилактического техобслуживания	D14
	5.4 Эксплуатационная готовность	D14
6	Выбор основных элементов архитектуры	D15
	6.1 Подключение к питающей сети	D15
	6.2 Конфигурация схемы высокого напряжения	D16
	6.3 Число и расстановка трансформаторных подстанций высокого/низкого напряжения	D17
	6.4 Число трансформаторов высокого/низкого напряжения	D18
	6.5 Резервный генератор высокого напряжения	D18
7	Выбор архитектурных деталей	D19
	7.1 Компоновка	D19
	7.2 Централизованная или децентрализованная (распределенная) компоновка	D20
	7.3 Использование источников бесперебойного питания (ИБП)	D22
	7.4 Конфигурация цепей низкого напряжения	D22
8	Выбор оборудования	D25

D1

9	Рекомендации по оптимизации архитектуры	D26
	9.1 Работы на объекте	D26
	9.2 Окружающая среда	D26
	9.3 Объем профилактического техобслуживания	D28
	9.4 Эксплуатационная готовность	D28
D2 10	Глоссарий	D29
11	Программное обеспечение ID-Спец	D30
12	Пример: электроснабжение типографии	D31
	12.1 Краткое описание	D31
	12.2 Характеристики установки	D31
	12.3 Технические характеристики	D31
	12.4 Критерии оценки архитектуры	D32
	12.5 Выбор технических решений	D34

# 1 Преимущества для пользователя

## Выбор архитектуры распределительной сети

Выбор архитектуры распределительной сети оказывает решающее влияние на характеристики установки в течение ее жизненного цикла:

- начиная со стадии строительства, такой выбор может оказывать значительное влияние на сроки монтажа, производительность, требуемую квалификацию монтажных бригад и т.д.
- кроме того, такой выбор оказывает влияние на показатели на стадии эксплуатации, такие как качество и бесперебойность энергоснабжения, критические нагрузки, потери мощности в силовых цепях,
- и, наконец, он влияет на возможность утилизации установки в конце ее срока службы.

Проектирование архитектуры распределительной электросети установки включает пространственную конфигурацию, выбор источников питания, определение уровней распределения, подготовку однолинейной схемы и выбор оборудования.

Выбор оптимальной архитектуры часто связан с поиском компромисса между критериями эффективности, представляющими интерес для заказчика, который будет использовать установку на этапах ее жизненного цикла. Чем раньше начинается поиск решений, тем больше возможностей оптимизации можно найти (см. **Рис. D1**).

D3

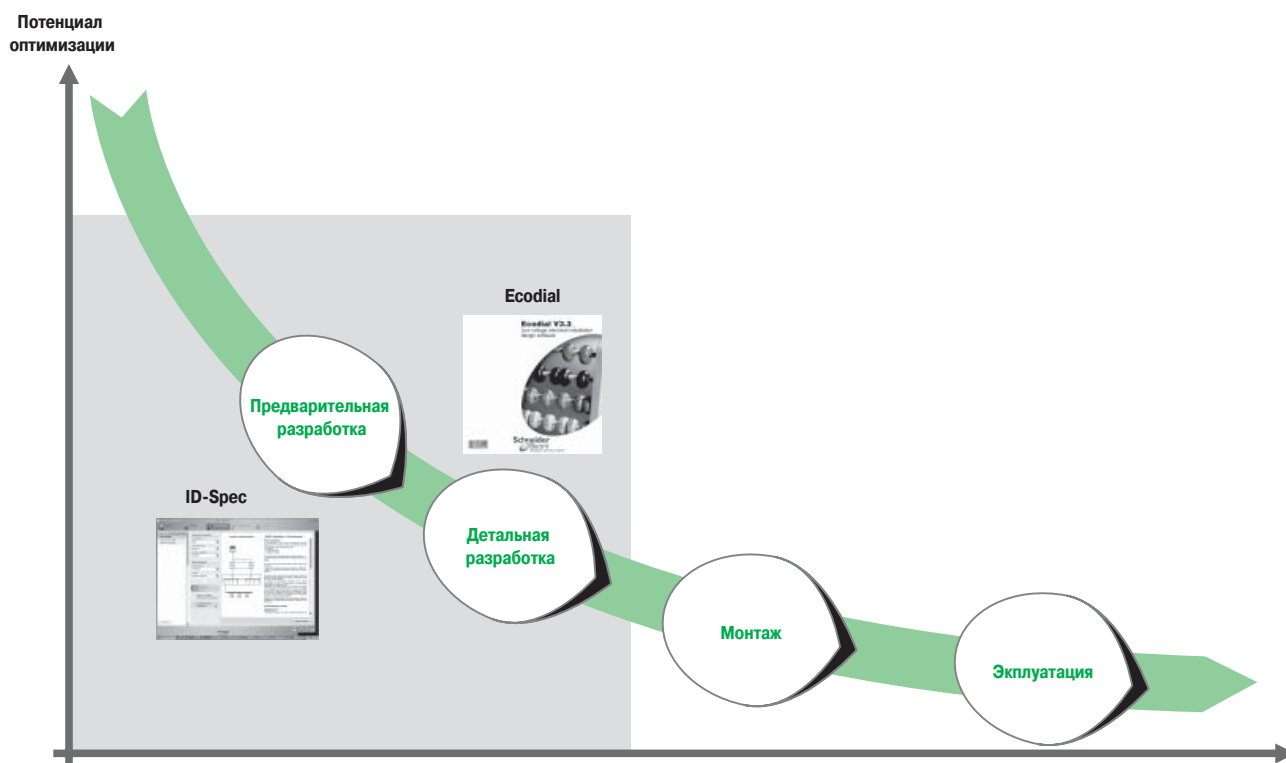


Рис. D1 : Потенциал оптимизации

Успех поиска оптимального решения в значительной степени связан с возможностью обмена информацией между участниками процесса разработки разделов проекта:

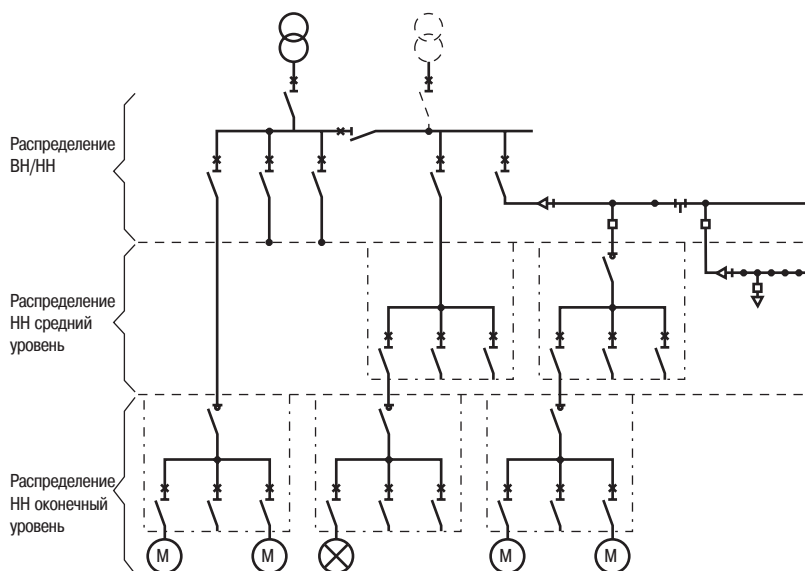
- архитектор, который определяет строительную организацию согласно требованиям пользователя,
- разработчики технических разделов (освещение, отопление, кондиционирование воздуха, водоснабжение и т.д.),
- представители пользователя, например, определяющие техпроцесс.

В следующих разделах описываются критерии выбора, а также процесс проектирования архитектуры в соответствии с критериями эффективности проекта в контексте зданий производственного назначения и сферы услуг (исключая крупные объекты).

## 2 Упрощенный процесс проектирования архитектуры

### 2.1 Проектирование архитектуры

Проектирование архитектуры, рассматриваемое в данном документе, относится к этапу технического проекта. Как правило, оно включает уровни главного распределения среднего/низкого напряжения, низковольтное распределение и исключительно уровень окончного распределения (см. **Рис. D2**).



**Рис. D2** : Пример однолинейной схемы

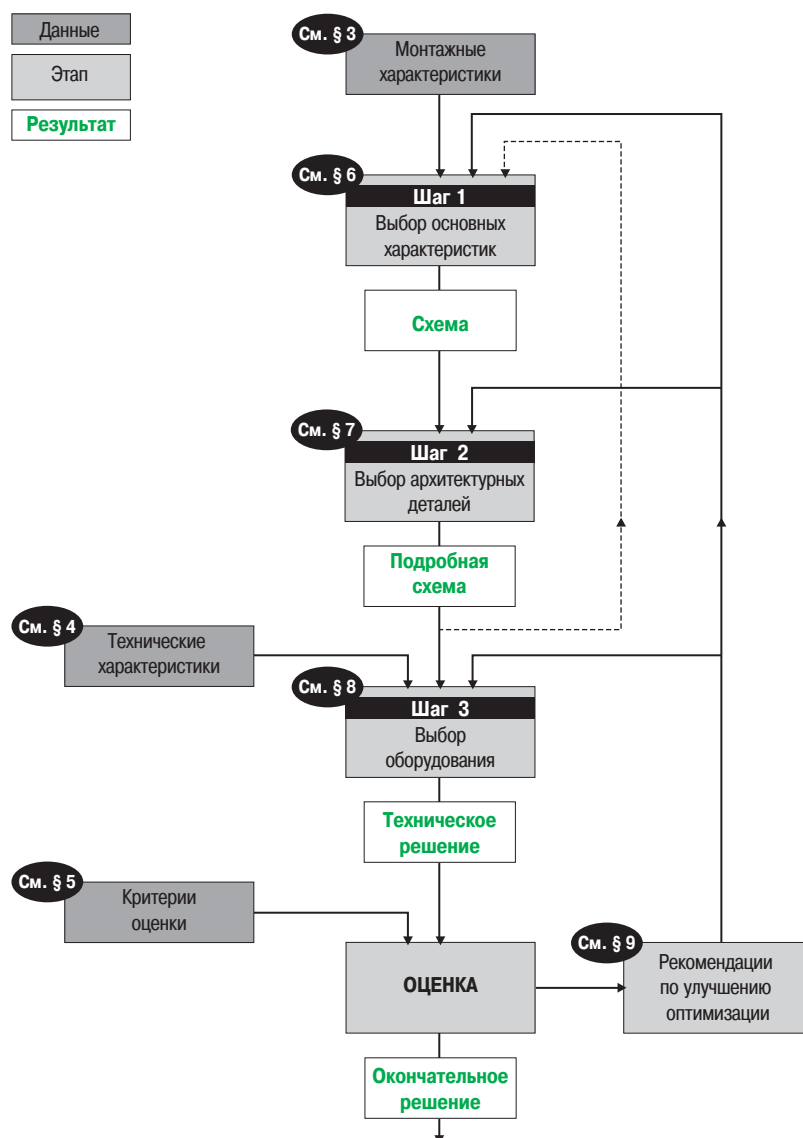
Проектирование архитектуры распределительной сети может быть описано с помощью 3-этапного итерационного процесса. Этот процесс основан на учете характеристик установки и критериев, которые нужно удовлетворить.

## 2 Упрощенный процесс проектирования архитектуры

### 2.2 Полный процесс

Полный процесс описывается кратко в следующих разделах и показан на **Рис. D3**.

Процесс, описываемый в данном документе, нельзя считать единственно возможным. Этот документ является руководством, предназначенным для использования проектировщиками электроустановок.



**Рис. D3** : Блок-схема выбора архитектуры электрической распределительной сети

#### Этап 1: Выбор основных характеристик архитектуры распределительной сети

Включает определение общих характеристик электроустановки. Этап основан на учете макроскопических характеристик установки и ее использования.

Такие характеристики влияют на соединение с питающей сетью, цепями среднего напряжения, на параметры трансформаторных подстанций и т.д.

Результатом этого этапа является несколько решений по схемам распределения, которые используются в качестве исходной точки для разработки однолинейной схемы. Окончательный выбор делается в конце Этапа 2.



## 2 Упрощенный процесс проектирования архитектуры

### Этап 2: Выбор архитектурных деталей

Включает более детальное определение электроустановки. Этот этап основан на результатах предыдущего этапа, а также на удовлетворении критериев, касающихся внедрения и эксплуатации установки.

Если критерии не удовлетворены, процесс возвращается назад на Этап 1. Итерационный процесс обеспечивает анализ нескольких комбинаций критериев оценки.

Результатом этого этапа является детальная однолинейная схема.

### Этап 3: Выбор оборудования

На этом этапе осуществляется выбор оборудования на основе выбора архитектуры. Выбор производится по каталогам изготовителей с целью удовлетворения определенных критериев. Если не удовлетворяются характеристики, процесс возвращается назад на Этап 2.

### Оценка

Этап оценки позволяет конструкторскому бюро получить количественные данные в качестве основы для обсуждения с заказчиком и другими участниками.

По результатам таких обсуждений может потребоваться вернуться назад на Этап 1.

D6

Это основные характеристики установки, которые позволяют определить основные элементы и детали архитектуры распределительной электросети. Для каждой из таких характеристик обеспечивается ее определение или возможные значения.

## 3.1 Тип деятельности

### Определение:

Основная экономическая деятельность, осуществляемая на объекте.

### Индикативный перечень секторов, рассматриваемых для производственных зданий:

- Производство
- Продукты питания и напитки
- Материально-техническое снабжение

### Индикативный перечень секторов, рассматриваемых для зданий сферы услуг:

- Административные здания
- Торговые комплексы
- Торговые пассажи

## 3.2 Топология объекта

### Определение:

Архитектурные характеристики зданий с учетом числа зданий, числа этажей и площади каждого этажа.

### Категории:

- Одноэтажное здание,
- Многоэтажное здание,
- Комплекс зданий,
- Высотное здание.

## 3.3 Компоновка

### Определение:

Характеристики, учитывающие ограничения по размещению электрооборудования в здании:

- эстетика,
- доступность,
- наличие специальных объектов,
- использование технических коридоров (на этаж),
- использование технических каналов (вертикальных).

### Категории:

- Низкий уровень: положение электрооборудования полностью задано и определяет заданные критерии
- Средний уровень: положение электрооборудования частично задано и должно учитываться при удовлетворении заданных критериев.
- Высокий уровень: Без ограничений по положению. Положение электрооборудования может определяться с обеспечением оптимального удовлетворения заданных критериев.

## 3.4 Надежность питания

### Определение:

Способность энергосистемы обеспечивать энергоснабжение при указанных условиях в течение определенного периода времени.

### Категории:

- **Минимум:** этот уровень надежности питания включает риск перебоев электропитания в связи с ограничениями, которые носят географический (отдельная сеть, удаленность от центров производства энергии), технический (воздушная сеть, сложнотокосная сеть) или экономический (недостаточное техобслуживание, недостаточная выработка энергии) характер.
- **Стандарт**
- **Улучшенный уровень:** этот уровень надежности питания может достигаться посредством специальных мер, принимаемых для снижения вероятности перебоев питания (подземная сеть, оптимальное резервирование, и т.д.)

## 3.5 Ремонтопригодность

### Определение:

Характеристики, учитываемые при проектировании для ограничения влияния работ по техобслуживанию на работу всей или части установки.

### Категории:

- **Минимум:** установка должна останавливаться для выполнения техобслуживания.
- **Стандарт:** работы по техобслуживанию могут проводиться при работе установки, но при пониженных рабочих характеристиках. Такие работы рекомендуется планировать на периоды низкой нагрузки. Пример: несколько трансформаторов с отдельным резервированием и сбросом нагрузки.
- **Улучшенный уровень:** принимаются специальные меры для обеспечения проведения техобслуживания без нарушения режимов работы установки. Пример: конфигурация с двумя симметричными вводами.

## 3.6 Гибкость

### Определение:

Возможность легко изменять точки подачи электроэнергии в установке или легко увеличивать мощность, подаваемую в определенные точки. Гибкость является критерием, учитываемым на предпроектной стадии.

### Категории:

- **Отсутствие гибкости:** положение нагрузок фиксировано в течение жизненного цикла из-за ограничений, связанных со строительством или обеспечиваемым производственным процессом. Например: плавильный завод.
  - **Гибкость в проектировании:** число точек подачи электроэнергии, мощность нагрузок или их положение точно не известно.
  - **Гибкость во внедрении:** нагрузки могут устанавливаться после ввода установки в эксплуатацию.
  - **Эксплуатационная гибкость:** возможность изменения нагрузок при изменении техпроцесса.
- Примеры:
- **производственное здание:** расширение, разветвление и изменение целевого использования
  - **административное здание:** разветвление.

### 3.7 Потребляемая мощность

#### Определение:

Сумма полных мощностей нагрузок (кВА) с учетом коэффициента использования. Это значение представляет максимальную мощность, которая может потребляться в заданное время с возможностью ограниченных кратковременных перегрузок. Диапазоны мощностей соответствуют номинальным мощностям наиболее часто используемых трансформаторов:

- < 630 кВА
- 630 - 1250 кВА
- 1250 - 2500 кВА
- > 2500 кВА

### 3.8 Распределение нагрузки

#### Определение:

Характеристика, связанная с равномерностью распределения нагрузки (кВА/м<sup>2</sup>) по площади или зданию.

#### Категории:

- Равномерное распределение: ЭП имеют, как правило, невысокую мощность и распределены по площади здания (равномерная плотность).  
Например: освещение, отдельные автоматизированные рабочие места
- неравномерное распределение: ЭП имеют, как правило, среднюю мощность и сгруппированы по всей площади здания.  
Например: сборочные машины, транспортеры, автоматизированные рабочие места, модульные объекты МТО.
- локализованные нагрузки: ЭП являются, как правило, высокой мощности и локализованы в нескольких местах здания.  
Например: Отопление, вентиляция и кондиционирование

### 3.9 Чувствительность к отключениям питания

#### Определение:

Способность цепи выдерживать перебои питания.

#### Категории:

- «Неответственная» цепь: возможность отключения в любое время на неопределенный период
- Стойкость к длительным отключениям: время перерыва > 3 минут \*
- Стойкость к коротким отключениям: время перерыва < 3 минут \*
- Отсутствие стойкости к отключениям.

По возможным последствиям можно выделить несколько уровней опасности перерыва питания:

- Без значительных последствий,
- Производственные потери,
- Ухудшение работы производственного оборудования или потеря важных данных,
- Смертельная опасность.

Классификация по критичности перерыва питания нагрузок или цепей.

- Нулевая критичность:

Нагрузка или цепь может «сбрасываться» в любое время. Например: цепь подогрева воды для бытового потребления.

- Низкая критичность:

Перерыв питания приводит к временным неудобствам для жильцов дома без каких-либо финансовых последствий. Продолжительный перерыв свыше критического времени может приводить к производственным потерям или снижению производительности. Например: цепи отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC).

- Средняя критичность

Перерыв питания приводит к кратковременному перерыву в производстве или обслуживании.

Продолжительный перерыв свыше критического времени может приводить к ухудшению работы производственного оборудования или затратам по перезапуску. Например: рефрижераторы, лифты

- Высокая критичность

Любое прерывание питания вызывает смертельную опасность или неприемлемые финансовые потери. Например: операционная, информационный отдел, отдел ценных бумаг

\* ориентировочное значение по стандарту EN50160: "Характеристики напряжения, подаваемого через распределительные сети общего пользования".

### 3.10 Чувствительность к помехам

#### Определение

Способность цепи работать надлежащим образом в присутствии помех от силовых электролиний.

Помехи могут приводить к нарушениям работы различной степени. Например: остановка работы, неправильная работа, ускоренное старение, повышение потерь и т.д. Типы помех с влиянием на режимы работы цепей:

- ограничение потребления электроэнергии,
- перенапряжения,
- искажение кривой напряжения,
- колебания напряжения,
- несимметрия напряжений.

#### Категории:

- низкая чувствительность: Нарушения по напряжениям питания оказывают малое влияние на режимы работы.  
Например: нагревательный прибор.
- средняя чувствительность: нарушения по напряжению вызывают значительное ухудшение режимов работы.  
Например: двигатели, освещение.
- Высокая чувствительность: нарушения по напряжению могут вызывать остановку работы или даже ухудшение рабочих характеристик оборудования.  
Например: информационное оборудование.

Чувствительность цепей к помехам определяет схему разделяемых или специальных силовых цепей. Лучше отделить «чувствительные» нагрузки от «нарушающих» нагрузок. Например: отделение осветительных цепей от цепей питания двигателей. Такой выбор зависит от рабочих характеристик. Например: отдельное питание осветительных цепей для обеспечения учета потребления электроэнергии.

### 3.11 Способность цепей создавать помехи

#### Определение

Способность электрической цепи нарушать работу соседних цепей из-за таких явлений, как: гармоники, бросок тока, несимметрия, токи высокой частоты, электромагнитное излучение и т.д.

#### Категории

- Не вызывают нарушений: не требуется принятия специальных мер
- Вызывают умеренные или случайные нарушения: может потребоваться отдельный источник питания при наличии цепей со средней или высокой чувствительностью к помехам. Например: осветительная цепь, генерирующая гармонические токи.
- Вызывают сильные нарушения: необходима специальная силовая цепь или меры по снижению помех для устранения нарушений работы установки. Например: электродвигатель с большим пусковым током, сварочный аппарат, создающий резкопеременную нагрузку.

### 3.12 Другие факторы или ограничения

- Окружающая среда  
Например: классификация грозových разрядов, воздействие солнечного излучения
- Специальные правила  
Например: больницы, высотные здания и т.д.
- Нормы электроснабжающей организации  
Пример: ограничения по подсоединению к сетям низкого напряжения, доступ к подстанции среднего напряжения и т.д.
- Подсоединяемые нагрузки  
Нагрузки, подсоединяемые к 2 независимым источникам.
- Опыт проектирования  
Согласование с предыдущими конструкциями или частичное использование предыдущих конструкций, стандартизация узлов, наличие установленного оборудования.
- Ограничения по питанию нагрузок  
Уровень напряжения (230В, 400В, 690В), система напряжений (1-фазная, 3-фазная с нейтралью или без нее и т.д.)

## 4 Технические характеристики

Рассматриваемые технические решения касаются различных типов оборудования высокого и низкого напряжения, а также систем сборных шин.

Выбор технических решений осуществляется на основе выбора однолинейной схемы и в соответствии с характеристиками, приводимыми ниже.

### 4.1 Окружающая среда, атмосфера

Учет всех ограничений, связанных с окружающей средой (средняя температура окружающей среды, высота над уровнем моря, влажность, коррозия, пыль и т.д.) и согласование степеней защиты IP и IK. Категории:

- Стандарт: без особых ограничений по окружающей среде
- Улучшенный уровень: неблагоприятные условия и параметры окружающей среды вводят значительные ограничения для устанавливаемого оборудования.
- Специальный уровень: Нестандартные условия окружающей среды, требующие специальных мер.

### 4.2 Сервисный показатель

Сервисный показатель (IS) – это значение, которое позволяет характеризовать распределительное устройство низкого напряжения по требованиям пользователя к работе, техобслуживанию и расширяемости. Различные значения этого показателя приводятся в следующей таблице (Рис. D4):

	Работа	Техобслуживание	Модернизация
Уровень 1	IS = 1 . . Работа может привести к полному отключению распределительного устройства	IS = . 1 . Работа может потребовать полного отключения распределительного устройства	IS = . . 1 Работа может потребовать полного отключения распределительного устройства
Уровень 2	IS = 2 . . Работа может привести к отключению только функционального блока	IS = . 2 . Работа может потребовать отключения только функционального блока, с работой на соединениях	IS = . . 2 Работа может потребовать отключения только функционального блока, с работой резервных функциональных блоков
Уровень 3	IS = 3 . . Работа может привести к отключению питания только функционального блока	IS = . 3 . Работа может потребовать отключения только функционального блока, без работы на соединениях	IS = . . 3 Работа может потребовать отключения только функционального блока, с полными возможностями модернизации

Рис. D4 : Значения сервисного показателя

- Примеры рабочих ситуаций: выключение выключателя, включение/выключение питания машины
  - Пример ситуации обслуживания: затяжка соединений
  - Пример ситуации модернизации: подсоединение дополнительной питающей линии
- Имеется ограниченное число релевантных сервисных показателей (см. Рис. D5)

IS	Работа	Техобслуживание	Модернизация
1 1 1	Отдельное отключение функционального блока и пуско-наладка < 1 ч	Время работы > 1 ч, с полным отсутствием готовности	Расширение не планируется
2 1 1			
2 2 3		Время работы ¼ - 1 ч, с работой на соединениях	Возможное добавление функциональных блоков без отключения распределительного устройства
2 3 2		Время работы ¼ - 1 ч, без работы на соединениях	Возможное добавление функциональных блоков с отключением распределительного устройства
2 3 3			Возможное добавление функциональных блоков без отключения распределительного устройства
3 3 2	Возможное добавление функциональных блоков с отключением распределительного устройства		
3 3 3	Отдельное отключение функционального блока и пуско-наладка < ¼ ч	Возможное добавление функциональных блоков без отключения распределительного устройства	

Рис. D5 : Релевантные сервисные показатели (IS)

Типы электрических соединений функциональных блоков обозначаются с помощью трехбуквенного кода.

- Первая буква обозначает тип электрического соединения основной вводной цепи,
- Вторая буква обозначает тип электрического соединения основной отходящей цепи,
- Третья буква обозначает тип электрического соединения вспомогательных цепей,

Используются следующие буквы:

- F – для фиксированных соединений,
- D – для отсоединяемых соединений,
- W – для съемных соединений.

Сервисные классы связаны с другими механическими параметрами, такими как степень защиты (IP), форма внутреннего разделения, тип соединения функциональных блоков или распределительного устройства (**Рис. D6**):

Сервисный класс	Степень защиты IP	Форма	Возможность съема функционального блока
1 1 1	2 X X	1	F F F
2 1 1	2 X B	1	F F F
2 2 3	2 X B	3b	W F D
2 3 2	2 X B	3b	W F W
2 3 3	2 X B	3b	W W W
3 3 2	2 X B	3b	W W W
3 3 3	2 X B	3b	W W W

Рис. D6 : Соответствие между сервисным показателем и другими механическими параметрами

Технические примеры приводятся в Главе E2.

- Определение степени защиты: см. МЭК 60529: «Степень защиты, обеспечиваемой корпусами (нормы IP)»,
- Определения формы и съемности: см. МЭК 60439-1: «Низковольтные комплектные распределительные устройства; Часть 1: устройства, прошедшие полные и частичные типовые испытания».

4.3 Другие факторы

Другие факторы влияют на выбор технических решений:

- Опыт проектирования,
- Согласование с предыдущими конструкциями или частичное использование предыдущих конструкций,
- Стандартизация узлов,
- Существование установленного оборудования,
- Требования энергосистем общего пользования,
- Технические критерии: заданный коэффициент мощности, резервное питание нагрузок, присутствие генераторов гармоник...

Эти факторы должны учитываться на этапе детального определения электросети после этапа эскизного проекта.



## 5 Критерии оценки архитектуры

Определенные решающие критерии оцениваются в конце Этапа 3 при определении архитектуры для проверки выбора архитектуры. Эти критерии перечисляются ниже с указанием присвоенных уровней приоритета.

### 5.1 Длительность монтажа

Время монтажа электрооборудования на объекте.

#### Уровни приоритета:

- Вторичный уровень: время работы на объекте может увеличиваться, если это позволяет снизить общие монтажные затраты,
- Специальный уровень: необходимо минимизировать время работы на объекте без значительных дополнительных затрат,
- Критический уровень: время работы на объекте должно минимизироваться, даже если это приводит повышению общих затрат на монтаж.

### 5.2 Окружающая среда

Учет ограничений, накладываемых окружающими условиями, при проектировании установки. Такой учет включает: потребление природных ресурсов, тепловые потери (связанные с выбросами CO<sub>2</sub>), возможность утилизации в течение жизненного цикла установки.

#### Уровни приоритета:

- Незначимый уровень: ограничения, накладываемые окружающими условиями, не требуют особого учета,
- Минимальный уровень: установка проектируется с учетом минимальных нормативных требований,
- Значимый уровень: установка проектируется с особым вниманием к охране окружающей среды. В этой ситуации допускаются дополнительные затраты. Например: использование трансформаторов с малыми потерями.

Воздействие установки на окружающую среду определяется посредством анализа жизненного цикла установки, в котором выделяются 3 этапа:

- монтаж,
- эксплуатация,
- завершение срока службы (демонтаж, утилизация).

По воздействию на окружающую среду при проектировании электроустановки необходимо учитывать 3 показателя (как минимум). Хотя каждый этап жизненного цикла вносит вклад во все три показателя, каждый из этих показателей связан главным образом с одним этапом, в частности:

- потребление природных ресурсов влияет главным образом на этап изготовления,
- потребление энергии влияет на этап эксплуатации,
- возможность утилизации влияет на завершение срока службы.

В следующей таблице приводятся факторы, вносящие вклад в 3 показателя (**Рис. D7**)

Показатели	Факторы
Потребление природных ресурсов	Масса и тип используемых материалов
Потребление энергии	Тепловые потери при полной нагрузке и без нагрузки
Возможность утилизации	Масса и тип используемых материалов

**Рис. D7** : Факторы, вносящие вклад в 3 показателя

D13

### 5.3 Уровень профилактического техобслуживания

#### Определение:

Число часов и сложность техобслуживания, проводимого в течение эксплуатации в соответствии с рекомендациями изготовителя для обеспечения надежной работы установки и поддержания уровней качества работы (предотвращения отказов: отключение, простой и т.д.).

#### Категории:

- Стандартный уровень: согласно рекомендациям изготовителя.
- Улучшенный уровень: согласно рекомендациям изготовителя, при неблагоприятных условиях окружающей среды,
- Специальный уровень: специальный план техобслуживания, отвечающий требованиям к обеспечению бесперебойного обслуживания и требующий высокого уровня квалификации обслуживающего персонала.

### 5.4 Эксплуатационная готовность электроустановки

#### Определение:

Это вероятность того, что электроустановка способна подавать качественную электроэнергию в соответствии с техническими требованиями питаемых ЭП. Формула расчета уровня готовности:

$$\text{Готовность (\%)} = (1 - \text{MTTR} / \text{MTBF}) \times 100$$

MTTR - среднее время ремонта: среднее время доведения электроустановки до рабочего состояния после отказа (включая обнаружение причины отказа, ремонт и пуско-наладочные работы).

MTBF - средняя наработка на отказ: среднее время, в течение которого электроустановка находится в работоспособном состоянии; измерение этого времени позволяет планировать техобслуживание и ремонт.

Определение категории эксплуатационной готовности зависит от типа установки. Например: больницы, центры обработки данных.

#### Пример классификации, используемой для центров обработки данных:

Уровень 1: электропитание и кондиционирование воздуха обеспечиваются посредством одного канала без резервирования, что обеспечивает эксплуатационную готовность 99,671%.

Уровень 2: электропитание и кондиционирование воздуха обеспечиваются посредством одного канала с резервированием, что обеспечивает эксплуатационную готовность 99,741%.

Уровень 3: электропитание и кондиционирование воздуха обеспечиваются посредством нескольких каналов с одним резервным каналом, что обеспечивает эксплуатационную готовность 99,982%.

Уровень 4: электропитание и кондиционирование воздуха обеспечиваются посредством нескольких каналов с резервированием, что обеспечивает эксплуатационную готовность 99,995%.

## 6 Выбор основных элементов архитектуры

Однолинейная схема может быть разбита на основные элементы, которые проектируются в 2 последовательных этапа. На первом этапе делается следующий выбор:

- подключение к электрической сети общего пользования,
- конфигурация цепей среднего напряжения,
- число силовых трансформаторов,
- число и расстановка трансформаторных подстанций,
- резервный генератор среднего напряжения.

D15

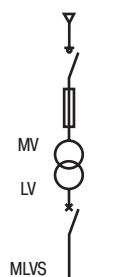
### 6.1 Подключение к питающей сети

Основные конфигурации возможного подключения приводятся ниже (см. **Рис. D8** для сети среднего напряжения):

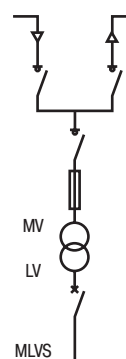
- ввод низкого напряжения,
- одиночная радиальная линия среднего напряжения
- одиночная кольцевая магистраль среднего напряжения,
- двойная магистраль с односторонним питанием среднего напряжения
- двойная магистраль с двусторонним питанием среднего напряжения .

Измерительные, защитные и разъединяющие устройства, расположенные на передающих подстанциях, не представлены на следующих схемах. Они часто зависят от конкретных требований каждой энергосистемы общего пользования и не влияют на выбор архитектуры установки. Для каждого подсоединения показан один трансформатор для упрощения схем, но на практике может подсоединяться несколько трансформаторов. (MLVS: главный распределительный щит низкого напряжения ГРЩ НН)

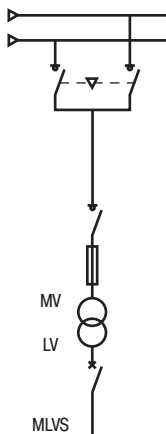
а) Одиночная радиальная линия:



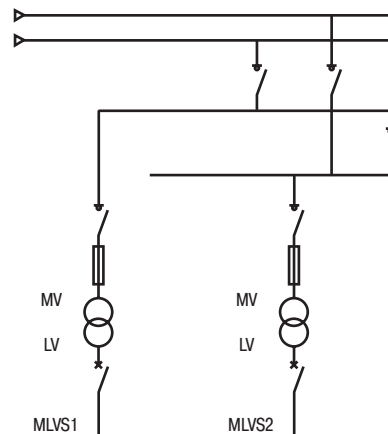
б) Одиночная кольцевая магистраль:



в) Двойная магистраль с односторонним питанием:



г) Двойная магистраль с двусторонним питанием:



**Рис. D8** : Подключение среднего напряжения к электрической сети общего пользования

Наиболее вероятный и обычный набор характеристик для различных возможных конфигураций приводится в следующей таблице:

Учитываемая характеристика	Конфигурация				
	Низк. напр. (LV)	Средн. напр. (MV)			
	Один ввод НН	Одиночная радиальная линия	Кольцевая магистраль	Двойная магистраль с односторонним питанием	Двойная магистраль с двусторонним питанием
Тип производственной деятельности	Любой	Любой	Любой	Высокие технологии, банки, медицина	Любой
Топология объекта	Одно здание	Одно здание	Одно здание	Одно здание	Несколько зданий
Надежность электроснабжения	Миним.	Миним.	Стандарт	Улучшенный уровень	Улучшенный уровень
Потребл. мощность	< 630 кВА	≤ 1250 кВА	≤ 2500 кВА	> 2500 кВА	> 2500 кВА
Другие ограничения по подключению	Любые	Отдельный объект	Городской район с низкой плотностью застройки	Городской район с высокой плотностью застройки	Городской район с ограничением электроснабжения

6.2 Конфигурация схемы высокого напряжения

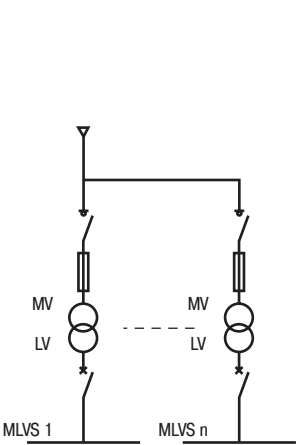
Основные возможные конфигурации подключений приводятся ниже (Рис. D9):

- радиальная линия, один или несколько трансформаторов
- разомкнутое кольцо, один ввод среднего напряжения
- разомкнутое кольцо, два ввода среднего напряжения.

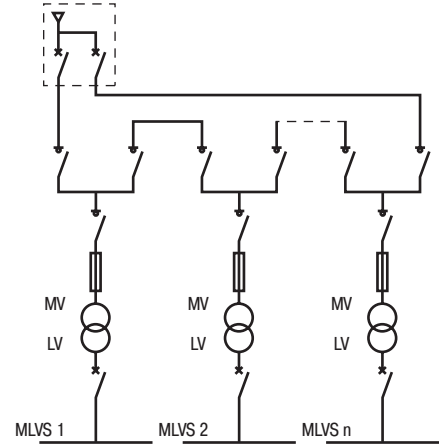
Основная конфигурация – радиальная линия с одним трансформатором.

В случае использования нескольких трансформаторов, кольцевая сеть не реализуется, если все трансформаторы не расположены в одной подстанции.  
Конфигурация с замкнутым кольцом не рассматривается.

а) Радиальная линия:



б) Разомкнутое кольцо, 1 ввод среднего напряжения:



в) Разомкнутое кольцо, 2 ввода среднего напряжения:

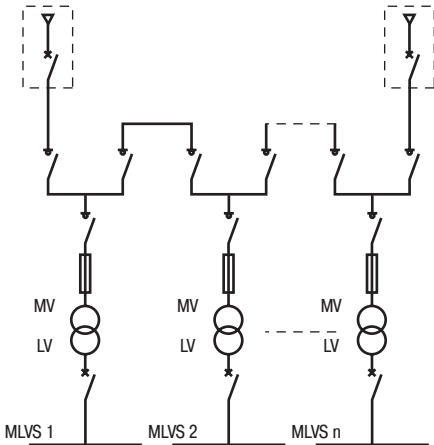


Рис. D9 : Конфигурация схемы среднего напряжения

## 6 Выбор основных элементов архитектуры

Наиболее вероятный и обычный набор характеристик для различных возможных конфигураций приводится в следующей таблице (**Рис. D10**):

Учитываемая характеристика	Конфигурация схемы среднего напряжения (MV)		
	Радиальная линия	Разомкн. кольцо, 1 ввод MV	Разомкн. кольцо, 2 ввода MV
Топология объекта	< 25000 м <sup>2</sup>	Здание с одним уровнем или несколько зданий < 25000 м <sup>2</sup>	Несколько зданий > 25000 м <sup>2</sup>
Ремонтопригодность	Минимум или стандарт	Улучшен.	Улучшен.
Потребл. мощность	Любая	> 1250 кВА	> 2500 кВА
Чувствительность к перерывам питания	Длительные перерывы	Короткие перерывы	Короткие перерывы

**Рис. D10** : Типовые значения характеристик установки

Другая исключительная конфигурация: питание через 2 подстанции среднего напряжения и подсоединение трансформаторов к каждой из этих 2 подстанций (соединение с двумя симметричными вводами среднего напряжения).

### 6.3 Число и расстановка трансформаторных подстанций высокого/низкого напряжения

Основные характеристики, учитываемые при расстановке трансформаторных подстанций:

- Площадь здания или объекта
- Потребляемая мощность (подлежит сверке со стандартной мощностью трансформатора)
- Распределение нагрузки

Рекомендуемая основная конфигурация включает одну подстанцию. Факторы, определяющие необходимость увеличения числа подстанций (> 1):

- Большая площадь (> 25000 м<sup>2</sup>),
- Конфигурация объекта: несколько зданий,
- Общая мощность > 2500 кВА,
- Чувствительность к перерывам питания: необходимость резервирования на случай пожара.

Учитываемая характеристика	Конфигурация		
	1 подстанция с несколькими трансформаторами	Несколько подстанций, несколько трансформаторов (идентичные подстанции)	Несколько подстанций, несколько трансформаторов (разные мощности)
Конфигурация зданий	< 25000 м <sup>2</sup>	> 25000 м <sup>2</sup> , 1 здание с несколькими этажами	> 25000 м <sup>2</sup> , несколько зданий
Потребл. мощность	< 2500 кВА	≥ 2500 кВА	≥ 2500 кВА
Распределение нагрузки	Локализованные нагрузки	Равномерное распределение	Средняя плотность

**Рис. D11** : Типовые характеристики различных конфигураций

### 6.4 Число трансформаторов высокого/низкого напряжения

Основные характеристики, учитываемые при определении числа трансформаторных подстанций:

- Площадь здания или объекта
- Общая установленная мощность ЭП
- Чувствительность ЭП к прерываниям питания
- Чувствительность электрических цепей и ЭП к помехам
- Расширяемость установки

Основная рекомендуемая конфигурация включает один трансформатор, питающий установленные ЭП. Определенные факторы вносят вклад в увеличение числа подстанций ( $> 1$ ), предпочтительно одинаковой мощности:

- Большая общая расчетная мощность ( $> 1250$  кВА): практический предел удельной мощности (стандартизация, легкость замены, требования к площади и т.д.)
- Большая площадь ( $> 50000$  м<sup>2</sup>): установка нескольких трансформаторов как можно ближе к распределенным нагрузкам обеспечивает уменьшение длины кабелей низкого напряжения
- Необходимость частичного резервирования (возможность снижения рабочих характеристик в случае отказа трансформатора) или полное резервирование (обеспечение нормальной работы при отказе трансформатора)
- Отделение чувствительных ЭП от ЭП, создающих помехи (например: технические средства передачи информации, двигатели)

### 6.5 Резервный генератор высокого напряжения

Основные характеристики, учитываемые при внедрении резервного генератора среднего напряжения:

- Тип деятельности на объекте
- Общая установленная мощность
- Чувствительность ЭП к перерывам питания
- Эксплуатационная готовность распределительной сети общего пользования

Рекомендуемая основная конфигурация не включает генератор среднего напряжения. Факторы, определяющие необходимость установки генератора среднего напряжения:

- Тип деятельности на объекте: процесс с комбинированным потреблением тепла и электроэнергии, оптимизация затрат на энергию,
- Низкая эксплуатационная готовность распределительной сети общего пользования.

Резервный генератор может также устанавливаться на уровне низкого напряжения.

## 7 Выбор архитектурных деталей

Это второй этап проектирования электроустановки. На этом этапе делается следующий выбор:

- Компоновка,
- Централизованное или децентрализованное распределение,
- Необходимость использования резервных генераторов,
- Необходимость использования источников бесперебойного питания (ИБП),
- Конфигурация сети низкого напряжения,
- Архитектурные комбинации.

D19

### 7.1 Компоновка

Схема расположения основного оборудования высокого и низкого напряжения на объекте или в здании. Выбор компоновки применяется к результатам Этапа 1.

#### Рекомендации по выбору:

- Установка источников питания как можно ближе к центру электрических нагрузок
- Минимизация воздействий, связанных с внешней средой: специальные помещения (температура, вибрации, пыль и т.д.)
- Размещение тяжелого оборудования (трансформаторы, генераторы и т.д.) вблизи стен или основных выходов для облегчения техобслуживания,

Пример компоновки приводится на следующей схеме (Рис. D12):

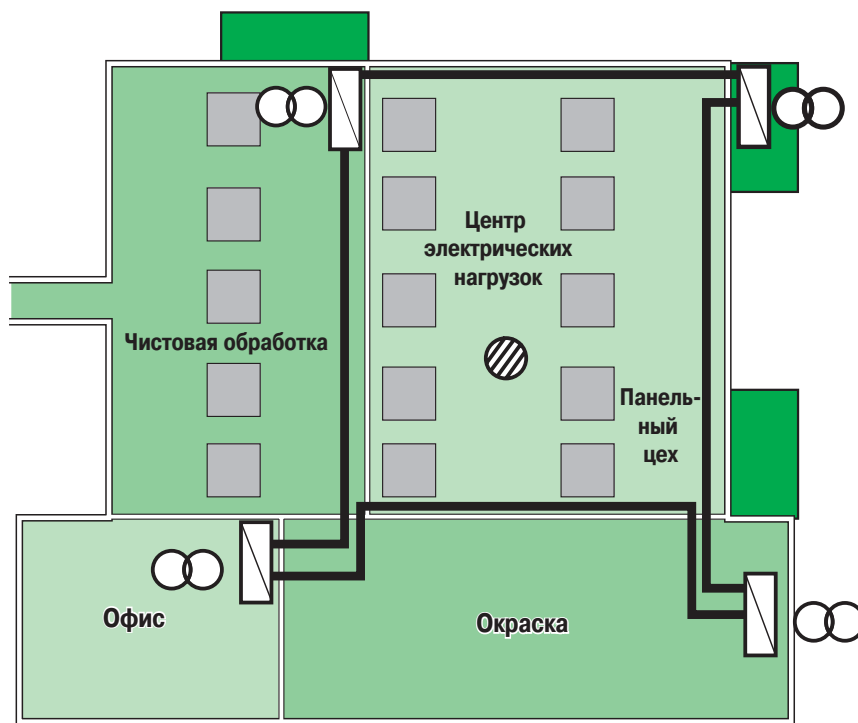
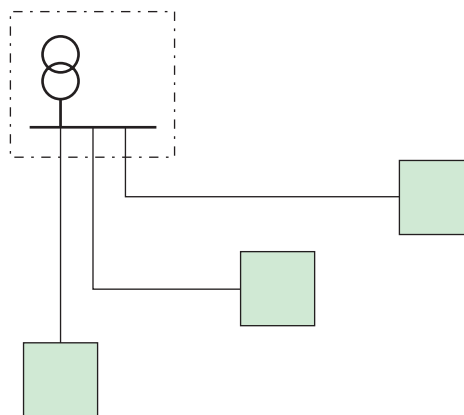


Рис. D12 : Положение центра электрических нагрузок служит ориентиром для размещения источников питания



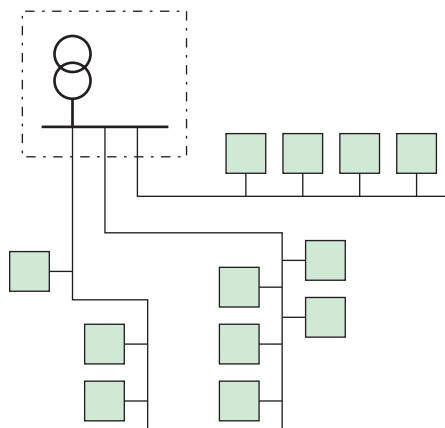
## 7.2 Централизованная или распределенная (децентрализованная) компоновка

Централизованная компоновка — ЭП соединяются с источником питания радиальными линиями. Кабели прокладываются между главным распределительным устройством низкого напряжения (ГРЩ) и ЭП или вторичными распределительными устройствами (радиальное распределение) (**Рис. D13**):



**Рис. D13:** Пример централизованной компоновки

Децентрализованная компоновка — ЭП подключаются к источникам питания через шинопровод. Магистральные и распределительные шинопроводы хорошо подходят при децентрализованной компоновке для питания многих ЭП, которые рассредоточены, что упрощает замену, перемещение или добавление ЭП (**Рис. D14**):



**Рис. D14 :** Пример децентрализованной компоновки с шинопроводами.

Характеристики централизованной компоновки (см. сводную таблицу на **Рис. D15**):

- Гибкость установки: отсутствует,
- Распределение нагрузки: локализованные нагрузки (мощные ЭП ).

Характеристики децентрализованной компоновки:

- Гибкость установки: Гибкость во внедрении (перемещение автоматизированных рабочих мест и т.д.),
- Распределение нагрузки: равномерное распределение ЭП низкой мощности

	Распределение нагрузки		
Гибкость	Локализованные нагрузки	Промежуточное распределение	Равномерно распределенные
Отсутствие гибкости	Централизованная		Децентрализованная
Гибкость в проектировании			
Гибкость во внедрении	Централизованная	Децентрализованная	
Эксплуатационная гибкость			

D21

Рис. D15 : Рекомендации по выбору централизованной или децентрализованной компоновки

Питание по кабелям повышает независимость цепей (освещение, штепсельные розетки, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха (HVAC), двигатели, вспомогательные устройства, охранная система и т.д.), снижая последствия отказа с точки зрения эксплуатационной готовности электроустановки.

Использование шинопроводов позволяет объединять цепи питания нагрузок и экономить на проводке за счет повышения коэффициента ее использования. Выбор между кабелями и шинопроводами по коэффициенту использования позволяет найти экономически оптимальное соотношение между капитальными затратами, затратами на монтаж и эксплуатацию.

Эти два способа распределения электроэнергии часто объединяются.

## Использование резервных генераторов (Рис. D16)

Здесь рассматриваются только резервные генераторы низкого напряжения.

Электроэнергия, подаваемая резервным генератором, вырабатывается синхронным генератором с приводом от теплового двигателя.

Электроэнергия не может вырабатываться до достижения генератором номинальной скорости.

Поэтому, этот тип машины не подходит для обеспечения бесперебойного электропитания.

В зависимости от способности генератора обеспечить питанием всю установку или только ее часть, возможно полное или частичное резервирование.

Как правило, резервный генератор отсоединен от сети. Поэтому, необходима система переключения на такой источник питания.

Генератор может работать постоянно или периодически. Его время резервной работы зависит от количества топлива.



Рис. D16 : Подсоединение резервного генератора

Основные характеристики, учитываемые при внедрении резервного генератора низкого напряжения:

- Чувствительность нагрузок к перерывам питания,
- Эксплуатационная готовность распределительной сети общего пользования,
- Другие ограничения (например: использование генераторов обязательно в больницах или высотных зданиях)

Генераторы могут использоваться для снижения платежей за электроэнергию или комбинированной выработки тепла и электроэнергии. Эти два аспекта не рассматриваются в данном руководстве.

Использование резервного генератора необходимо, если нагрузки не могут отключаться внезапно на неопределенный период времени (приемлемы только длительные перерывы в электроснабжении) или если сеть энергосистемы имеет низкую эксплуатационную готовность.

Число необходимых резервных генераторов определяется по тем же критериям, что и число необходимых трансформаторов, а также с учетом экономических факторов и эксплуатационной готовности (резервирование, пусковая надежность, наличие средств технического обслуживания).

## 7.3 Использование источников бесперебойного питания (ИБП)

Энергия, необходимая для работы ИБП запасается в аккумуляторной батарее или маховике. Эта система позволяет предотвращать перебои в питании. Время работы ИБП ограничено: от нескольких минут до нескольких часов.

Одновременное использование резервного генератора и блока ИБП служит для постоянного питания нагрузок, для которых перебои в питании недопустимы (**Рис. D17**). Время работы батареи или маховика должно быть сопоставимо с максимальным временем запуска генератора.

Блок ИБП служит также для питания нагрузок, чувствительных к помехам (генерация «чистого» напряжения независимо от сети).

Основные характеристики, учитываемые при внедрении блока ИБП:

- Чувствительность нагрузок к перерывам питания,
- Чувствительность цепей к помехам.

Использование блока ИБП необходимо только в случае недопустимости перебоев в питании.

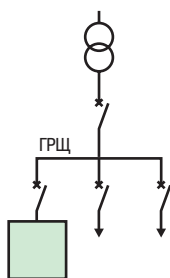


Рис. D18 : Конфигурация с радиальной линией

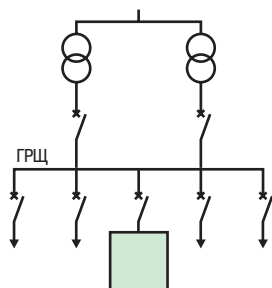


Рис. D19 : Двухполюсная конфигурация

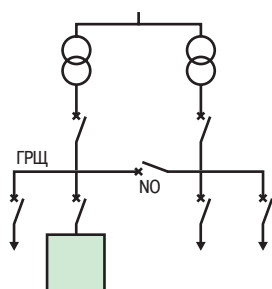


Рис. D20 : Двухполюсная конфигурация с двумя 1/2 A MLVS и переключателем NO

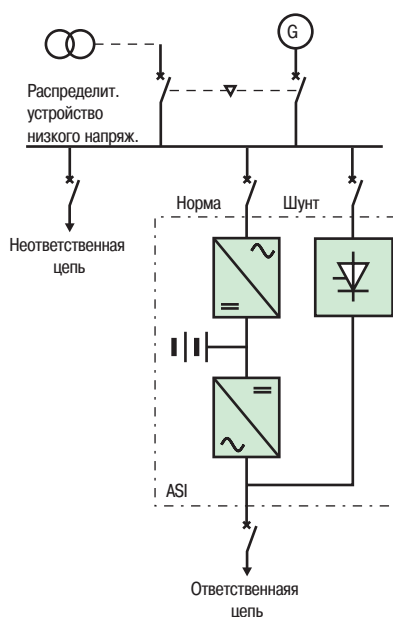


Рис. D17 : Пример подсоединения ИБП

## 7.4 Конфигурация цепей низкого напряжения

Основные возможные конфигурации (см. **Рис. D18 - D25**):

- **Конфигурация с радиальной линией:** Это исходная и наиболее простая конфигурация. Нагрузка подсоединяется только к одному источнику. Такая конфигурация обеспечивает минимальный уровень эксплуатационной готовности, так как отсутствует резервирование на случай отказа источника питания.
- **Двухполюсная конфигурация:** Питание обеспечивается через 2 трансформатора, подсоединенные к одной линии среднего напряжения. В случае близко расположенных трансформаторов они подсоединяются, как правило, параллельно к одному распределительному устройству среднего напряжения.
- **Вариант:** двухполюсная конфигурация с переключкой : Чтобы повысить эксплуатационную готовность на случай отказа одного ввода или проведения техобслуживания одного из трансформаторов, можно разделить главный распределительный щит (ГРЩ) на 2 секции с использованием переключки с нормально открытым (NO) секционным выключателем. Как правило, такая конфигурация требует использования устройства автоматического включения резерва (ABP) на секционном выключателе.
- **Разъединяемое распределительное устройство (простое разъединяемое соединение):** Ряд ответственных ЭП может подсоединяться к специальному распределительному устройству, получающему питание от ГРЩ. Соединение с ГРЩ может при необходимости отключаться (перегрузка, работа генератора и т.д.)
- **Взаимосвязанные распределительные устройства:** Если трансформаторы физически удалены друг от друга, они могут соединяться с помощью шинопроводов. Ответственная нагрузка может запитываться одним или другим трансформатором. Поэтому, эксплуатационная готовность повышается, поскольку нагрузка может быть всегда запитана в случае отказа одного из источников. Резервирование может быть:
  - Полным: каждый трансформатор способен питать всю установку,
  - Частичным: каждый трансформатор способен питать только часть установки. В этом случае часть нагрузок должна отключаться (сброс нагрузки) при отказе одного из трансформаторов.

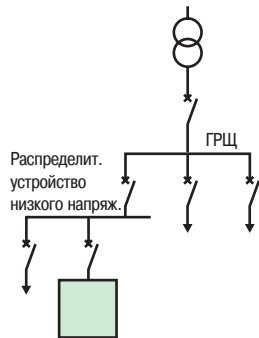


Рис. D21 : Разъединяемое распр. устройство

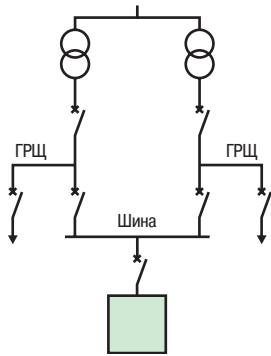


Рис. D22 : Взаимосв. распр. устройства

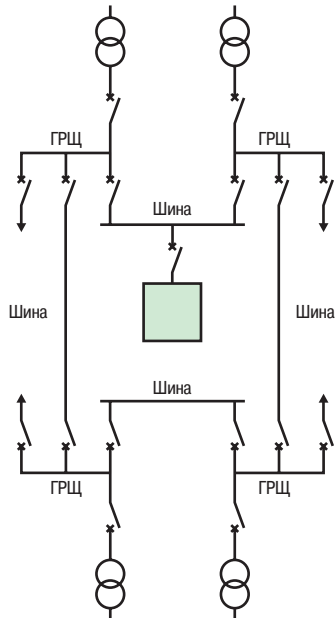


Рис. D23 : Кольцевая конфигурация

■ **Кольцевая конфигурация:** Эта конфигурация может рассматриваться в качестве расширения конфигурации с соединением между распределительными устройствами. Как правило, 4 трансформатора, подсоединенные к одной линии среднего напряжения, питают кольцевую сеть, образованную шинопроводами. Каждая нагрузка питается несколькими трансформаторами. Такая конфигурация хорошо подходит для установок с высокой плотностью нагрузки (кВА/м<sup>2</sup>). Если все нагрузки могут запитываться через 3 трансформатора, обеспечивается полное резервирование на случай отказа одного из трансформаторов. Фактически, каждый шинопровод может получать питание с двух сторон. В ином случае необходимо учитывать ухудшение работы (с частичным сбросом нагрузки). Эта конфигурация требует разработки специальной селективной защиты при всех режимах короткого замыкания.

■ **Питание по двум вводам:** Эта конфигурация реализуется при необходимости обеспечения максимальной эксплуатационной готовности. Она включает 2 независимых источника питания, например:

- 2 трансформатора, питаемых от разных линий среднего напряжения,
- 1 трансформатор и 1 генератор,
- 1 трансформатор и 1 ИБП.

Устройство АВР используется для предотвращения параллельного подключения источников. Эта конфигурация обеспечивает проведение профилактического техобслуживания всей распределительной электросистемы на стороне питания без остановок производства.

■ **Комбинации конфигураций:** Установка может состоять из нескольких блоков с разной конфигурацией в соответствии с требованиями по обеспечению эксплуатационной готовности для разных типов нагрузки. Например: генератор и ИБП, выбор по секциям (некоторые секции с питанием через кабели, а другие – через шинопроводы).

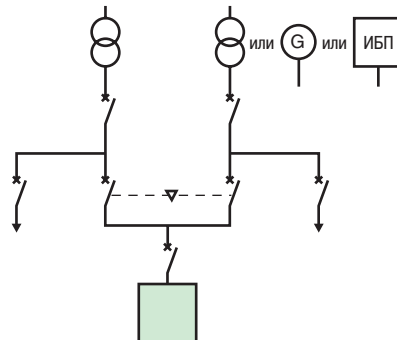


Рис. D24 : Конфигурация с двумя вводами и устройством АВР

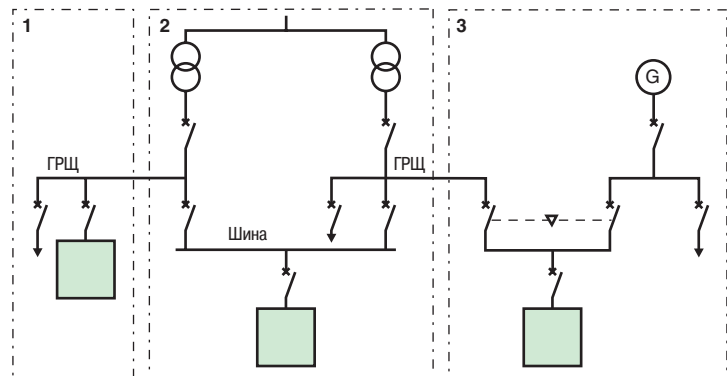


Рис. D25 : Пример комбинации конфигураций

1: Радиальная линия, 2: Соединение распределительных устройств, 3: С двумя вводами

Наиболее вероятный и обычный набор характеристик для различных возможных конфигураций приводится в следующей таблице:

Учитываемая характеристика	Конфигурация					
	Радиальная	Двухполюсная	Сбрасываемая нагрузка	Взаимосв. распредел. устройства	Кольцевая	С двумя вводами
Топология объекта	Любая	Любая	Любая	Уровень 1 5- 25000 м²	Уровень 1 5-25000 м²	Любая
Компоновка	Любая	Любая	Любая	Средняя или высокая	Средняя или высокая	Любая
Ремонтопригодность	Миним.	Стандарт	Миним.	Стандарт	Стандарт	Улучшен.
Потребл. мощность	< 2500 кВА	Любая	Любая	>1250 кВА	> 2500 кВА	Любая
Распределение нагрузки	Локализованные нагрузки	Локализованные нагрузки	Локализованные нагрузки	Среднее или равномерное распределение	Равномерное распределение	Локализованные нагрузки
Чувствительность к перерывам питания	Длительные перерывы	Длительные перерывы	Сброс	Длительные перерывы	Длительные перерывы	Короткие или без перерывов
Чувствительность к помехам	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая
Другие ограничения	/	/	/	/	/	Двустороннее питание нагрузок

D24

## 8 Выбор оборудования

Оборудование выбирается на Этапе 3 при проектировании электроустановки. Цель этого этапа состоит в выборе оборудования по каталогам изготовителей. Выбор технических решений основан на выборе архитектуры.

### Перечень оборудования:

- Подстанция среднего/низкого напряжения,
- Распределительные устройства среднего напряжения,
- Трансформаторы,
- Распределительные устройства низкого напряжения,
- Шинопроводы,
- Блоки ИБП,
- Устройства для компенсации реактивной мощности и фильтрации.

### Учитываемые критерии:

- Атмосфера, окружающая среда,
- Сервисный показатель,
- Возможность закупки оборудования в стране,
- Требования электрической сети общего пользования,
- Предыдущие выборы архитектуры.

Выбор оборудования зависит главным образом от возможности его закупки в стране. Этот критерий учитывает наличие определенного ассортимента или местной технической поддержки.

Детальный выбор оборудования выходит за рамки данного документа.

D25

## 9 Рекомендации по оптимизации архитектуры

Эти рекомендации предназначены для проектировщиков и служат для усовершенствования архитектуры и критериев оценки.

### 9.1 Работы на объекте

Чтобы выдерживать сроки «специальных» или «критических» работ на объекте, рекомендуется минимизировать факторы неопределенности с помощью следующих рекомендаций:

- Используйте проверенные решения и оборудование, проверенное и испытанное изготовителем («функциональное» распределительное устройство или распределительное устройство «изготовителя» в зависимости от значимости устройства для электроустановки).
- Используйте оборудование, для которого имеется надежная система поставки и местная техническая поддержка (организованная поставщиком).
- Используйте оборудование заводского изготовления (подстанция среднего/низкого напряжения, шинопроводы), позволяющее сократить объем работ на объекте.
- Используйте однотипное оборудование (например, трансформаторы одинаковой мощности),
- Используйте оборудование от одного изготовителя.

### 9.2 Окружающая среда

Оптимизация влияния на окружающую среду включает следующее:

- Снижение нагрузочных потерь мощности и потерь холостого хода в течение эксплуатации установки,
- Снижение массы материалов, используемых для изготовления установки.

В применении к отдельной единице оборудования эти 2 цели могут показаться несовместимыми. Однако, при рассмотрении установки в целом можно разработать архитектуру, удовлетворяющую обоим целям. Оптимальная установка не является суммой отдельных оптимальных единиц оборудования, а результатом оптимизации установки в качестве целостной системы. Рис. D26 показывает вклад каждой категории оборудования в массу и рассеивание энергии для установки мощностью 3500 кВА, рассредоточенной на площади свыше 10000 м².

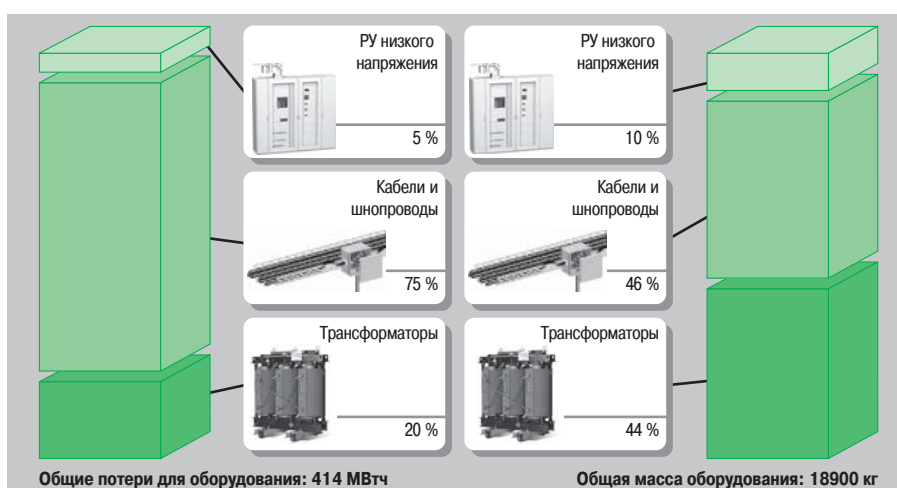


Рис. D26 : Пример распределения потерь и веса материала по категориям оборудования

Кабели и шинопроводы низкого напряжения, а также трансформаторы высокого/низкого напряжения вносят основной вклад в рабочие потери и вес используемого оборудования.

Поэтому, оптимизация установки по архитектуре с точки зрения окружающей среды включает:

- минимизацию длины цепей низкого напряжения в установке,
- совмещение цепей низкого напряжения, где это возможно, чтобы использовать преимущества коэффициента одновременности  $k_s$  (см. Главу А: Общие правила проектирования электроустановок, Раздел - Силовая нагрузка установки, 4.3 "Оценка максимальной полной потребляемой мощности")



# 9 Рекомендации по оптимизации архитектуры

Цели	Ресурсы
Минимизация длины цепей низкого напряжения	Размещение подстанций среднего/низкого напряжения как можно ближе к центру всех низковольтных нагрузок
Совмещение цепей низкого напряжения	<p>При коэффициенте одновременности для группы нагрузок менее 0,7, совмещение цепей позволяет ограничить объем проводников, запитывающих такие нагрузки. Это включает следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ установка вторичных распределительных устройств как можно ближе к центру локализованных нагрузок,</li><li>■ прокладка шинопроводов как можно ближе к центру распределенных нагрузок.</li></ul> <p>Поиск оптимального решения может включать учет нескольких сценариев кластеризации. В любом случае минимизация расстояния между центром нагрузок и оборудованием, запитывающим их, позволяет минимизировать воздействие окружающей среды.</p>

D27

Рис. D27 : Оптимизация оценки окружающей среды: Цели и ресурсы.

В качестве примера, **Рис. D28** показывает влияние совмещения цепей на уменьшение расстояние между центром нагрузок установки и центром источников (положение распределительного устройства ГРЩ изначально задано). В этом примере рассматривается завод по розливу минеральной воды, Для которого:

- электрооборудование (ГРЩ) установлено в помещении вне технологических участков по соображениям доступа с учетом ограничений, связанных с внешними условиями,
- установленная мощность — около 4 МВА.

Решение №1 предусматривает распределение цепей по цехам.  
Решение №2 предусматривает распределение цепей по технологическим функциям (производственным линиям).

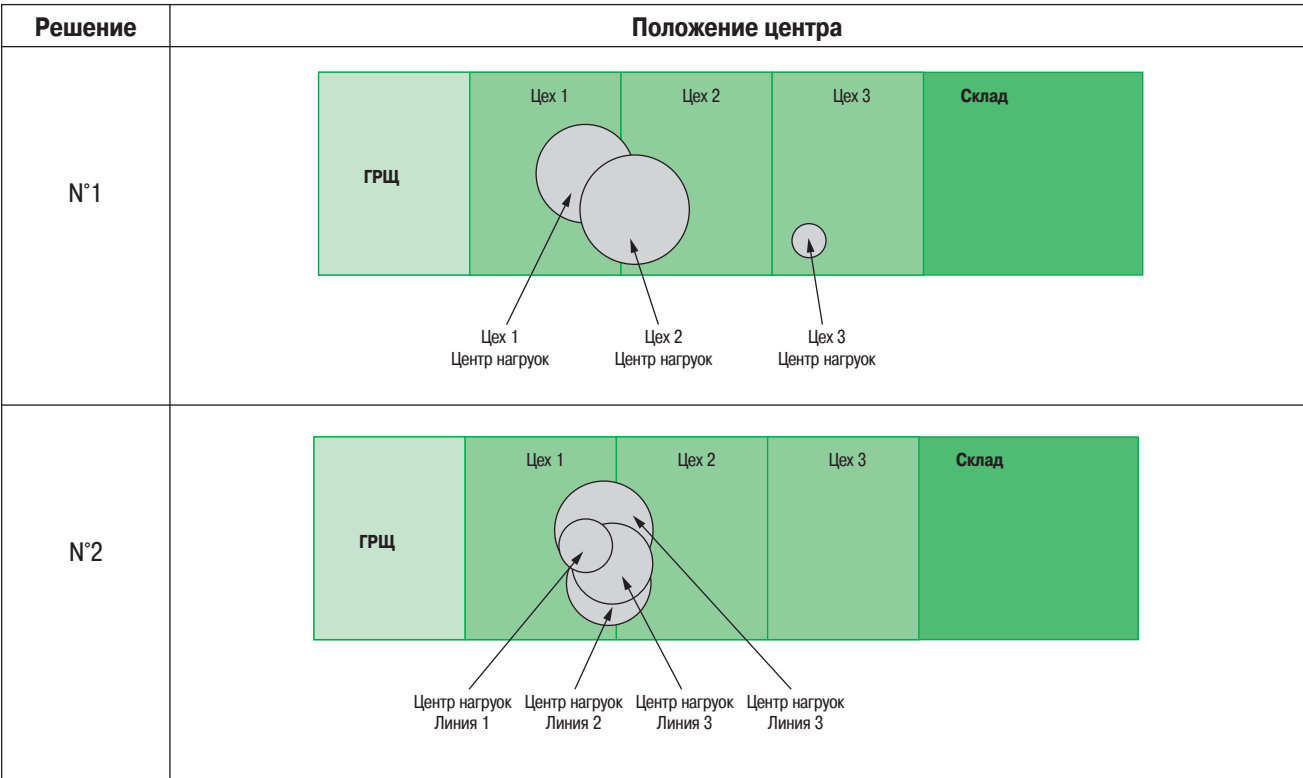


Рис. D28 : Пример определения положения центра нагрузок

Без изменения компоновки электрооборудования второе решение позволяет снизить вес кабелей низкого напряжения на прибл. 15% (за счет уменьшения длины).

В дополнение к оптимизации по архитектуре, следующие рекомендации также вносят вклад в оптимизацию:

- установка низковольтных компенсирующих устройств, позволяющих снизить потери в трансформаторах и в сети низкого напряжения,
- использование трансформаторов с малыми потерями,
- использование сборных шин низкого напряжения из алюминия, поскольку природные запасы этого металла достаточно велики.

### 9.3 Объем профилактического техобслуживания

Рекомендации по сокращению объема профилактического техобслуживания:

- Снижать время работы на объекте,
- Сосредоточить усилия на обслуживании ответственных присоединений,
- Использовать стандартное оборудование.
- Использовать оборудование, предназначенное для агрессивной среды (требует меньше обслуживания).

### 9.4 Эксплуатационная готовность

Рекомендации по повышению эксплуатационной готовности:

- Минимизировать число вводов в распределительное устройство для ограничения последствий возможного отказа распределительного устройства.
- Распределение цепей в соответствии с требованиями по обеспечению эксплуатационной готовности,
- Использование оборудования, отвечающего требованиям (см. Сервисный показатель, п. 4.2),
- Соблюдать рекомендации по выбору для Этапа 1 и 2 (см. **Рис. D3**, стр. D5).

Рекомендации по повышению уровня эксплуатационной готовности:

- Использовать двухполюсную конфигурацию вместо конфигурации с радиальной линией,
- Использовать конфигурацию с двумя вводами среднего напряжения вместо двухполюсной конфигурации,
- Использовать конфигурацию с ИБП и устройством АВР вместо конфигурации с двумя выводами
- Повышать уровень техобслуживания.

**Архитектура:** Выбор однолинейной схемы и технических решений — от подключения к сети энергосистемы общего пользования до цепей питания нагрузок.

**Главное распределение среднего/низкого напряжения:** Верхний уровень — от подсоединения к сети энергосистемы общего пользования через распределительное оборудование низкого напряжения на объекте (устройство ГРЩ или эквивалентное).

**MLVS (ГРЩ) (главное распределительное устройство низкого напряжения):** Главное распределительное устройство за трансформатором среднего/низкого напряжения, начальная точка распределения низкого напряжения.

**Распределение низкого напряжения:** Промежуточный уровень архитектуры, за главным уровнем до вторичных распределительных устройств (пространственное и функциональное распределение электроэнергии).

**Оконечное распределение низкого напряжения:** Нижний уровень архитектуры, за вторичными распределительными устройствами к ЭП. Этот уровень распределения не рассматривается в данном руководстве.

**Однолинейная схема:** Общая электрическая схема основного электрооборудования и соединений.

**Подстанция, трансформаторная подстанция среднего напряжения:** Помещения с оборудованием среднего напряжения и/или трансформаторами среднего/низкого напряжения. Эти помещения могут быть общими или отдельными в зависимости от компоновки объекта или оборудования. В некоторых странах подстанция среднего напряжения является питающей подстанцией.

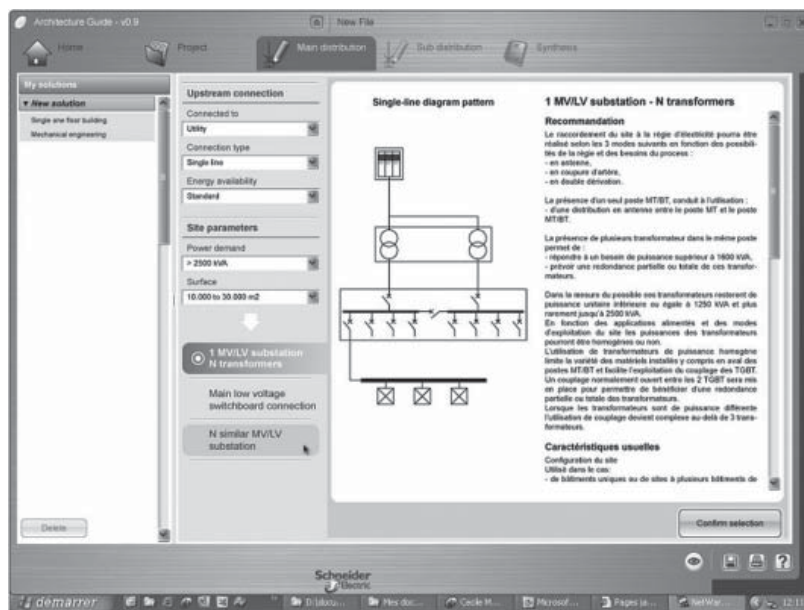
**Техническое решение:** Результат выбора оборудования по каталогам изготовителей.

**Характеристики:** Технические данные или данные об окружающей среде, касающиеся установки и позволяющие сделать оптимальный выбор архитектуры.

**Критерии:** Параметры оценки установки, позволяющие сделать выбор архитектуры, оптимально удовлетворяющий требования заказчика.

**ID-Spec** — это новое программное обеспечение, которое помогает проектировщику повысить производительность труда на этапе эскизного проекта и обосновывать принимаемые проектные решения.

Оно помогает проектировщику в выборе конфигураций однолинейных схем главного и вспомогательного распределения и включении таких конфигураций в проект. Программы помогают в выборе оборудования и его номинальных характеристик. Программы автоматически подготавливают соответствующую проектную документацию, включая однолинейную схему и ее обоснование, перечень и спецификацию соответствующего оборудования.



# 12 Пример: электроснабжение типографии

## 12.1 Краткое описание

Печать персональных каталогов для заказов по почте.

## 12.2 Характеристики установки

Характеристика	Категория
Тип деятельности	Механические операции
Топология объекта	Одноэтажное здание, 10000 м <sup>2</sup> (производственная площадь - 8000 м <sup>2</sup> , вспомогательная площадь – 2000 м <sup>2</sup> )
Компоновка	Высокая
Надежность обслуживания	Стандарт
Ремонтопригодность	Стандарт
Гибкость	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Отсутствует для:<ul style="list-style-type: none"><li>□ HVAC</li><li>□ Производства</li><li>□ Офисов</li></ul></li><li>■ Возможна для:<ul style="list-style-type: none"><li>□ обработки, вкладывания в конверты</li><li>□ специальных машин, установленных недавно</li><li>□ ротационных печатных машин (фактор неопределенности на этапе эскизного проекта)</li></ul></li></ul>
Потребляемая мощность	3500 кВА
Распределение нагрузки	Промежуточное распределение
Чувствительность к перерывам питания	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Сбрасываемые (отключаемые в первую очередь) цепи:<ul style="list-style-type: none"><li>□ офисы (кроме розеток питания ПК)</li><li>□ кондиционирование воздуха, отопление офисов</li><li>□ комнаты отдыха</li><li>□ помещения для техобслуживания</li></ul></li><li>■ длительные прерывания:<ul style="list-style-type: none"><li>□ печатные машины</li><li>□ система HVAC цехов (гигрометрическое регулирование)</li><li>□ Обработка, заполнение конвертов</li><li>□ производство (компрессор, циркуляция охлаждающей воды)</li></ul></li><li>■ Перебои недопустимы:<ul style="list-style-type: none"><li>□ серверы, ПК</li></ul></li></ul>
Чувствительность к помехам	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Средняя чувствительность:<ul style="list-style-type: none"><li>□ двигатели, освещение</li></ul></li><li>■ Высокая чувствительность:<ul style="list-style-type: none"><li>□ ПК</li></ul></li></ul> <p>Не требуется особых мер предосторожности в силу подсоединения к сети энергосистемы (низкий уровень помех)</p>
Способность создавать помехи	Отсутствует
Другие ограничения	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Здание с молниезащитой: установлены разрядники для защиты от грозовых перенапряжений</li><li>■ Электропитание по воздушной радиальной линии</li></ul>

## 12.3 Технические характеристики

Критерии	Категория
Атмосфера, окружающая среда	<ul style="list-style-type: none"><li>■ IP: стандарт (без защиты от проникновения пыли и воды)</li><li>■ IK: стандарт (использование технических колодцев, специальные помещения)</li><li>■ °C: стандарт (регулируемая температура)</li></ul>
Сервисный показатель	211
Возможность закупки оборудования в стране	Без проблем (проект реализован во Франции)
Другие критерии	Отсутствуют

D31

12.4 Критерии оценки архитектуры

Критерии	Категория
Длительность монтажа	Вторичный уровень
Окружающая среда	Минимум: соблюдение европейских норм
Затраты на профилактическое техобслуживание	Стандарт
Эксплуатационная готовность	Уровень I

Этап 1: Основные элементы архитектуры

Выбор	Основной критерий	Решение
Подключение к питающей сети	Отдельный объект	Один ввод
Цепи среднего напряжения	Компоновка + критичность	Радialная линия
Число трансформаторов	Мощность > 2500 кВА	2 x 2000 кВА
Число и расстановка подстанций	Площадь и распределение мощности	2 возможных решения: 1 подстанция или 2 подстанции ■ если 1 подстанция: перемычка NO между секциями ГРЩ ■ если 2 подстанции: взаимосвязанные распр. устройства
Генератор среднего напряжения	Операции на объекте	Нет

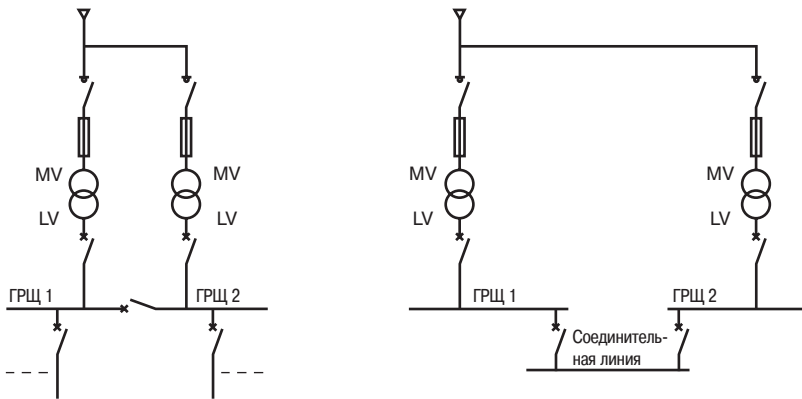


Рис. D29 : Две возможных однолинейных схемы

# 12 Пример: электроснабжение типографии

## Этап 2: Архитектурные детали

Решение «1 подстанция»

Выбор	Основной критерий	Решение
Компоновка	Ограничение по атмосфере	Специальные помещения
Централизованная или децентрализованная компоновка	Равномерные нагрузки, распределенные мощность, возможности расширения Неравномерные нагрузки, радиальная линия от MLVS(ГРЩ)	<div>■ Децентрализованная, шинопроводы:</div> <div>□ секция обработки, заполнение конвертов</div> <div>■ Централизованная с радиальными кабелями:</div> <div>□ спец. машины, ротац. печатн. машины, HVAC, производство, офисы (2 РУ), кондиционирование воздуха в офисах, комнаты отдыха, техобслуживание</div>
Использование резервного генератора	Критичность: низкая Готовность сети: стандарт	Без резервного генератора
Использование ИБП	Критичность	Блок ИБП для серверов и офисных ПК
Конфигурация цепей низкого напряжения	2 трансформатора, Частичное резервирование	<div>■ 2-х полюсная, вариант 2 1/г ГРЩ + перемычка NO (снижение тока КЗ) через ГРЩ, без резервирования</div> <div>■ процесс (&lt; низкий)</div> <div>■ сброс цепи(отключение) для некритических(неответственных) ЭП</div>

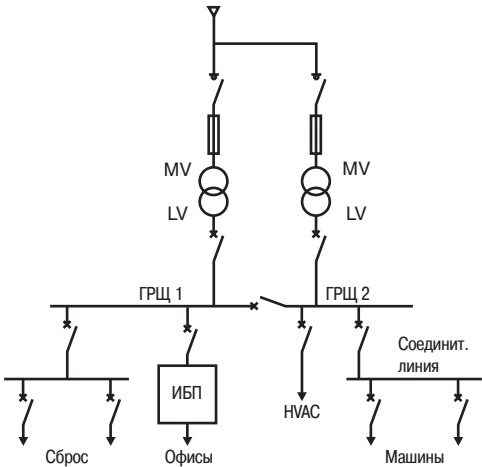


Рис. D30 : Детальная однолинейная схема (1 подстанция)

D33



# 12 Пример: электроснабжение типографии

## 12.5 Выбор технических решений

Выбор	Основной критерий	Решение
Подстанция высокого/низкого напряжения	Атмосфера, окр. среда	закрытая (спец. помещения)
Распр. устройство высокого напряжения	Возможность закупки в стране	SM6 (ячейка КРУ изготовлена во Франции)
Трансформаторы	Атмосфера, окр. среда	Литая маслостойкая изоляция
Распр. устройство низкого напряжения	Окружающая среда	ГРЩ: Prisma + P-вторичное распределение: Prisma +
Шинопроводы	Установленная мощность	Canalis KS
Блоки ИБП	Установленная мощность, время работы	Galaxy PW
Компенсация реактивной мощности	Установленная мощность, присутствие гармоник	Низкое напряжение, стандарт, автоматическая (Average Q, простота установки)

### Решение "2 подстанции"

Равноудаленные от: центров нагрузок.  
Цель низкого напряжения: 2 удаленных ГРЩ, соединенных шинопроводом.

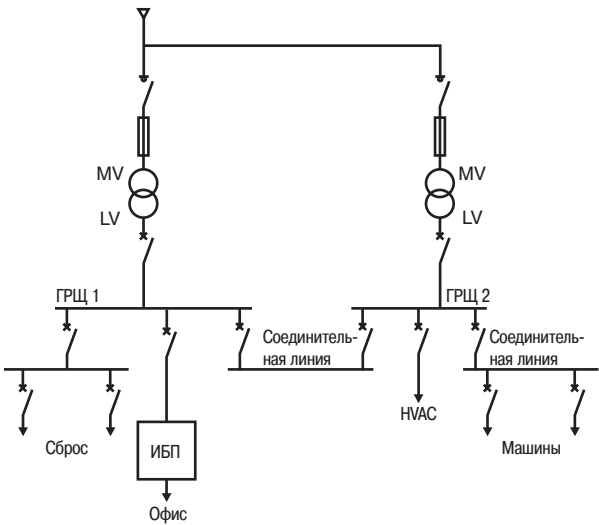


Рис. D31 : Детальная однолинейная схема (2 подстанции)

# Глава Е

## Распределение в системах низкого напряжения

### Содержание

1	<b>Системы заземления</b>	<b>E2</b>
	1.1 Соединения с «землей»	E2
	1.2 Определение стандартных систем заземления	E3
	1.3 Характеристики систем TT, TN и IT	E6
	1.4 Критерии выбора систем TT, TN и IT	E8
	1.5 Выбор метода заземления и его реализация	E10
	1.6 Монтаж заземляющих устройств и замеры	E11
2	<b>Система установки</b>	<b>E15</b>
	2.1 Распределительные устройства	E15
	2.2 Кабели и шинопроводы	E18
3	<b>Внешние воздействия (МЭК 60364-5-51)</b>	<b>E25</b>
	3.1 Определения и стандарты	E25
	3.2 Классификация	E25
	3.3 Перечень внешних воздействий	E25
	3.4 Защита закрытого оборудования: коды IP и IK	E28

E1

В зданиях соединение всех металлических частей здания и всех открытых проводящих частей оборудования с заземляющим электродом предотвращает возникновение опасно высоких напряжений между любыми двумя одновременно доступными металлическими частями

## 1.1 Соединения с «землей»

### Определения

Национальные и международные нормы (МЭК 60364) четко определяют различные элементы соединений с землей. Следующие термины общеприняты в промышленности и литературе. Номера в скобках относятся к **Рис. Е1**:

- **Заземляющий электрод (1):** Проводник или группа проводников, находящихся в непосредственном контакте и обеспечивающих электрическое соединение с землей (см. п. 1.6 в Главе Е).
- **Земля:** Проводящая масса Земли, электрический потенциал которой в любой точке условно принимается равным нулю.
- **Электрически независимые заземляющие электроды:** Заземляющие электроды, расположенные на таком расстоянии друг от друга, что максимальный ток, который может протекать через один из них, не оказывает значительного влияния на потенциал других проводников.
- **Сопротивление заземляющего электрода.** Сопротивление контакта электрода с землей.

### Отопление

- **Заземляющий проводник (2):** Защитный проводник, соединяющий главную заземляющую шину (ГЗШ) (6) установки с заземляющим электродом (1) или другим средством заземления (например, системы TN);

- **Открытая проводящая часть:** Проводящая часть оборудования, до которой можно дотронуться и которая в нормальном режиме не находится под напряжением, но может быть под напряжением при режиме замыкания на корпус (повреждении).

- **Защитный проводник (3):** Проводник, который используется для защиты от поражения электрическим током и служит для соединения любых из следующих частей:

- Открытые проводящие части:
- Сторонние проводящие части
- Основной заземляющий зажим
- Заземляющие электроды:
- Заземленная точка источника или искусственной нейтрали

- **Сторонняя проводящая часть:** Проводящая часть, вводящая потенциал (как правило, потенциал Земли) и не входящая в состав электроустановки (4).

Например:

- Неизолированные полы или стены, металлоконструкции зданий
- Металлические каналы и трубопроводы (не в составе электроустановки) для воды, газа, отопления, сжатого воздуха и т.д. и металлические материалы, связанные с ними.
- **Шинка металлизации (5):** Защитный проводник, обеспечивающий эквипотенциальное соединение
- **Главная заземляющая шина (ГЗШ) (6):** Зажим или вывод, служащий для присоединения защитных проводников, включая проводники уравнивания потенциала и проводники для функционального заземления (при наличии), в целях заземления.

### Соединения

#### Основная система уравнивания потенциала

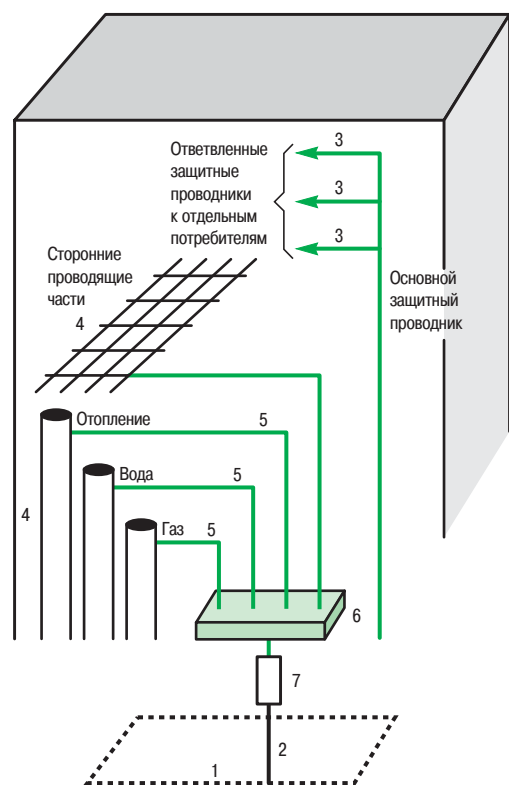
Проводники системы уравнивания потенциалов применяются с целью обеспечения того, что в случае возникновения потенциала во входящем стороннем проводнике (например, газопровод и т.д.) из-за повреждения вне здания не возникнет разности потенциалов между сторонними проводящими частями внутри установки. Проводники уравнивания потенциалов должны располагаться как можно ближе к точкам входа в здание и должны присоединяться к ГЗШ (6). Однако соединение с землей металлических оболочек кабелей связи требует разрешения владельцев кабелей.

#### Дополнительная система уравнивания потенциала

Эти соединения служат для присоединения открытых проводящих частей и всех сторонних проводящих частей, доступных одновременно, когда не обеспечены условия надлежащей защиты, например, проводники основной системы уравнивания потенциала имеют недопустимо высокое сопротивление.

#### Соединение открытых проводящих частей с заземляющими электродами

Соединение выполняется с помощью защитных проводников с целью обеспечения низкоомной линии для токов повреждения на землю.



**Рис. Е1** : Пример жилого здания, в котором ГЗШ (6) обеспечивает основное эквипотенциальное соединение; съемная перемычка (7) обеспечивает проверку сопротивления заземляющего электрода.

## Компоненты (см. Рис. E2)

Эффективное соединение всей доступной металлической арматуры и всех открытых проводящих частей электрических приборов и оборудования необходимо для надежной защиты от поражения электрическим током.

Компоненты:	
открытые проводящие части	сторонние проводящие части
Кабелепроводы ■ Каналы ■ Изолированный пропитанной бумагой оцинкованный кабель, армированный или нет ■ Кабель с неорганической изоляцией в металлической оболочке (руготенах и т.д.) Распределительное устройство (РУ) ■ Опора съемного РУ Приборы ■ Открытые металлические части приборов с изоляцией класса 1 Неэлектрические элементы ■ металлическая арматура кабелепроводов (лотки, лестницы и т.д.) ■ Металлические объекты: <input type="checkbox"/> Вблизи воздушных линий или шин <input type="checkbox"/> В контакте с электрооборудованием.	Элементы конструкции здания ■ Железобетон (ж/б): <input type="checkbox"/> Рамная стальная конструкция <input type="checkbox"/> Стержневая арматура <input type="checkbox"/> Сборные ж/б панели ■ Отделка поверхностей: <input type="checkbox"/> Ж/б полы и стены без обработки поверхности <input type="checkbox"/> Поверхности, облицованные плиткой ■ Металлическое покрытие: <input type="checkbox"/> Металлическое покрытие стен Элементы инженерных сетей здания (кроме энергоснабжения) ■ Металлические трубы, каналы, соединительные линии и т.д. для систем газо- и водоснабжения и отопления и т.д. ■ Сопутствующие металлические элементы (печи, баки, емкости, радиаторы) ■ Металлическая арматура в ванных комнатах, санузлах и т.д.. ■ Металлизированная бумага
открытые непроводящие части	сторонние непроводящие части
Разные служебные каналы и т.д. ■ Каналы из изолирующих материалов ■ Профилированные погонажные изделия из дерева или другого изолирующего материала ■ Проводники и кабели без металлических оболочек РУ ■ Корпуса из изолирующего материала Приборы ■ Все приборы с классом изоляции II, независимо от типа корпуса	■ Полы из паркетных досок ■ Полы с резиновым покрытием или линолеумом ■ Перегородка из гипсовых плит ■ Кирпичные стены ■ Ковры и ковровый настил на всю ширину

Рис. E2 : Перечень открытых и сторонних проводящих и непроводящих частей

Системы заземления характеризуют метод заземления установки за вторичной обмоткой трансформатора высокого/низкого напряжения и средства, используемые для заземления открытых проводящих частей питаемого низковольтного электроприемника (ЭП).

## 1.2 Определение стандартных систем заземления

Выбор этих методов определяет меры, необходимые для защиты от опасности косвенного прикосновения.

Разработка системы заземления требует от проектировщика электрической распределительной системы или установки сделать три исходных независимых выбора:

- Тип соединения электросистемы (как правило, нейтраль) и открытых частей с заземляющими устройствами
- Отдельный защитный проводник или защитный проводник, совмещенный с нейтралью
- Использование защиты максимального тока для отключения больших токов замыкания на землю, или использование дополнительных реле, способных обнаруживать и отключать небольшие токи замыкания на землю.

На практике эти выборы сгруппированы и стандартизированы, как разъясняется ниже. Каждый из этих выборов обеспечивает стандартные системы заземления с тремя преимуществами и недостатками:

- Присоединение открытых проводящих частей оборудования и нейтрали к РЕ-проводнику приводит к выравниванию потенциалов и снижению перенапряжений, но к повышению токов замыкания на землю.
- Отдельный защитный проводник стоит довольно дорого, даже при малой площади поперечного сечения, но намного менее подвержен воздействию перепадам напряжений, гармоникам и т.д., чем нейтраль. Кроме того, предотвращаются токи утечки в сторонних проводящих частях.
- Реле токовой защиты нулевой последовательности или устройства контроля изоляции намного более чувствительны и позволяют во многих случаях отключать замыкания на землю до возникновения более серьезных повреждений (двигатели, пожары, поражение электрическим током). Кроме того, эта защита не зависит от изменений(расширений) существующей установки.

### Система ТТ (заземленная нейтраль) (см. Рис. Е3)

Одна точка источника питания соединяется непосредственно с «землей». Все открытые и сторонние проводящие части соединяются с отдельным заземляющим устройством установки. Этот электрод может быть как электрически независимым от заземляющего устройства источника, так и нет. Две зоны растекания электродов могут перекрываться без влияния на работу устройств защиты.

### Системы TN (открытые проводящие части, соединенные с нейтралью)

Источник заземляется аналогично системе ТТ (выше). На установке все открытые и сторонние проводящие части соединяются с нейтралью (зануляются). Несколько вариантов системы TN показано ниже.

#### Система TN-C (см. Рис. Е4)

Нейтраль служит также в качестве защитного проводника и обозначается PEN (защитный заземляющий нейтральный проводник) Эта система не допускается для проводников сечением менее 10 мм<sup>2</sup> или передвижного оборудования.

Система TN-C требует эффективной эквипотенциальной среды в пределах установки с рассредоточением заземляющих электродов как можно более равномерно, поскольку PEN-проводник является нейтралью и проводит токи несимметрии фаз, а также токи 3-ей гармоники (и кратные им).

Поэтому, PEN-проводник должен присоединяться к нескольким заземляющим электродам на установке.

Предупреждение: В системе TN-C функция «защитного проводника» имеет более высокий приоритет, чем «функция нейтрали». В частности, PEN-проводник должен всегда подсоединяться к заземляющему зажиму нагрузки с использованием перемычки для подсоединения этого зажима к нейтральному выводу.

#### Система TN-S (см. Рис. Е5)

Система TN-S (5-проводная) обязательна для цепей с площадью поперечного сечения менее 10 мм<sup>2</sup> и для передвижного оборудования.

Защитный проводник и нейтраль разделены. В подземных кабельных системах, в которых используются оцинкованные кабели, защитным проводником является, как правило, свинцовая оболочка.

#### Система TN-C-S (см. Рис. Е6 ниже и Рис. Е7 на следующей странице)

Системы TN-C и TN-S могут использоваться на одной установке. В системе TN-C-S, система TN-C (4-проводная) не должна использоваться за системой TN-S (5-проводная), поскольку любой случайный обрыв нейтрали перед ней приведет к обрыву в защитном проводнике за ней, что опасно.

**E4**

Рис. Е3 : Система ТТ

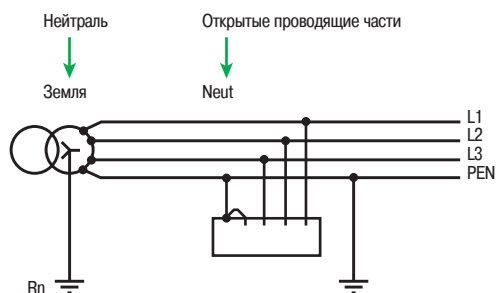


Рис. Е4 : Система TN-C

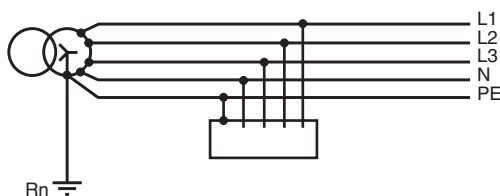


Рис. Е5 : Система TN-S

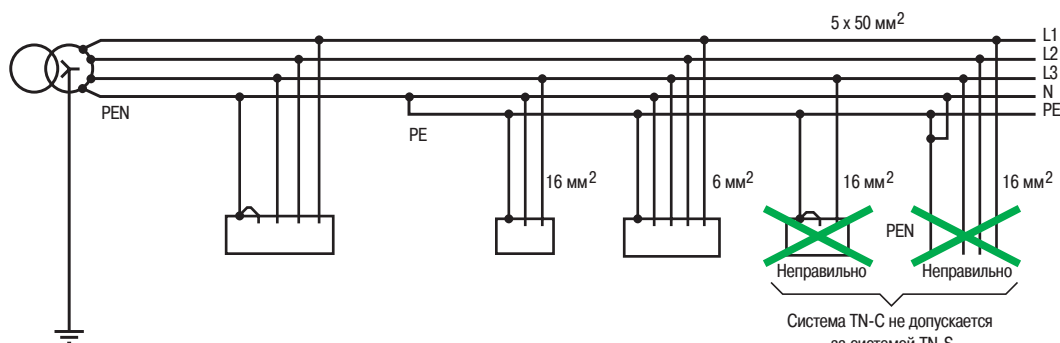


Рис. Е6 : Система TN-C-S

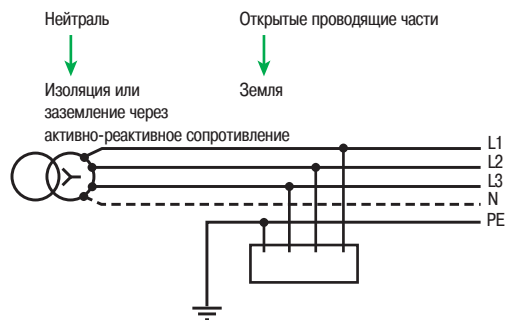


Рис. E8 : Система IT (изолированная нейтраль)

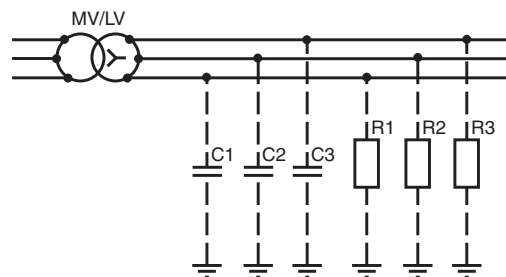


Рис. E9 : Система IT (изолированная нейтраль)

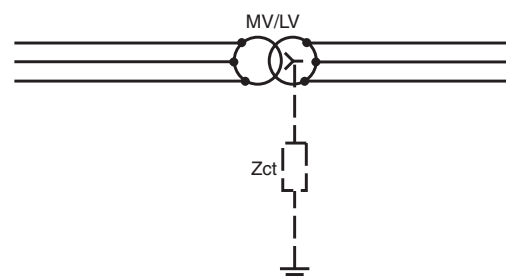


Рис. E10 : Полное сопротивление, эквивалентное сопротивлениям утечки в системе IT

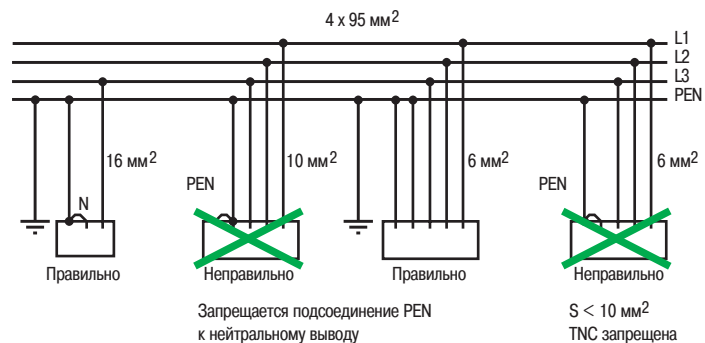


Рис. E7 : Присоединение проводника PEN в системе TN-C

## Система IT (изолированная нейтраль или нейтраль, заземленная через активно-реактивное сопротивление)

### Система IT (изолированная нейтраль)

Не выполняется специального соединения между нейтральной точкой источника питания и землей (см. Рис. E8).

Открытые и сторонние проводящие части установки соединяются с заземляющим электродом. На практике все цепи имеют сопротивление утечки на землю, поскольку не существует идеальной изоляции. Наряду с этим распределенным путем резистивной утечки, существует распределенный путь емкостного тока; вместе два пути составляют нормальное сопротивление утечки на землю (см. Рис. E9).

### Пример (см. Рис. E10)

В низковольтной 3-фазной 3-проводной системе, 1 км кабеля имеет сопротивление утечки в силу конденсаторов C1, C2, C3 и резисторов R1, R2 и R3, эквивалентное полному сопротивлению заземления нейтрали ( $Z_{ct}$ ) 3000 - 4000 Ом без учета фильтрующих емкостей электронных устройств.

### Система IT (нейтраль, заземленная через активно-реактивное сопротивление)

Полное сопротивление  $Z_s$  (порядка 1000 - 2000 Ом) постоянно подсоединено между нейтральной точкой низковольтной обмотки трансформатора и землей (см. Рис. E11). Все открытые и внешние проводящие части подсоединены к заземляющему электроду. Такой способ заземления источника питания служит для фиксации потенциала сети относительно земли ( $Z_s$  мало в сравнении с сопротивлением утечки) и снижения уровня перенапряжений (например, импульсы напряжения, передаваемые с обмоток среднего напряжения, статические заряды и т.д.) относительно земли. Однако, при этом возникает незначительное повышение уровня тока первого замыкания.

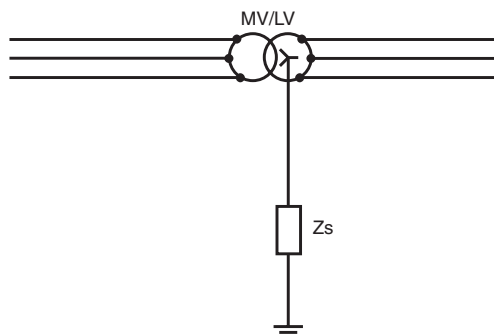


Рис. E11 : Система IT (нейтраль, заземленная через активно-реактивное сопротивление)

## 1.3 Характеристики систем TT, TN и IT

### Система TT (см. Рис. E12)

#### Система TT:

- Метод защиты людей: открытые проводящие части заземляются, и используется устройства защиты от токов утечки (УЗО).
- Принцип работы: отключение при первом замыкании на землю.

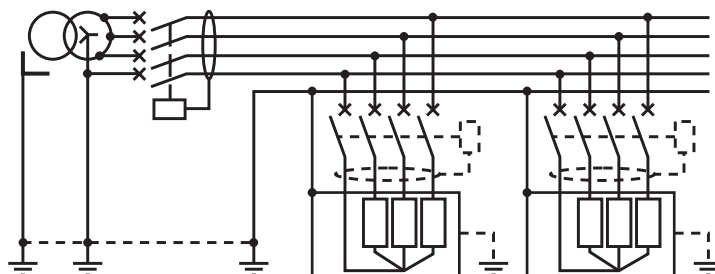


Рис. E12 : Система TT

**Примечание:** Если открытые проводящие части заземляются в нескольких точках, УЗО должно устанавливаться для каждой группы ЭП, подсоединенной к одному заземляющему электроду.

#### Основные характеристики

- Простейшее решение с точки зрения проектирования и монтажа. Используется на установках с питанием непосредственно через низковольтную распределительную сеть общего пользования.
- Не требует постоянного контроля в процессе работы (могут требоваться только периодические проверки УЗО).
- Защита обеспечивается с помощью УЗО (устройство защитного отключения, реагирующее на ток утечки на землю), что предотвращает риск пожара при уставке до 500 мА.
- Каждое повреждение приводит к отключению питания, но только поврежденной цепи благодаря применению селективных УЗО на последовательных ступенях распределения.
- ЭП или части установки, которые при нормальном режиме работы вызывают высокие токи утечки, требуют специальных мер для предотвращения излишних отключений, например, питание нагрузок через разделительный трансформатор или использование специальных УЗО (см. п.5.1 в главе F).

### Система TN (см. Рис. E13 и Рис. E14)

#### Система TN:

##### ■ Метод защиты людей:

□ соединение и заземление открытых проводящих частей и нейтрали является обязательным;

□ при первом замыкании на землю цепь отключается устройствами защиты от сверхтока (автоматическими выключателями или предохранителями).

■ Принцип работы: отключение при первом замыкании на землю.

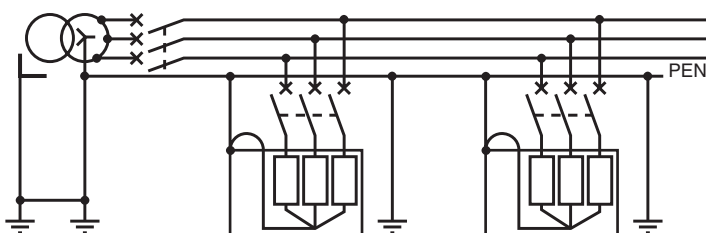


Рис. E13 : Система TN-C

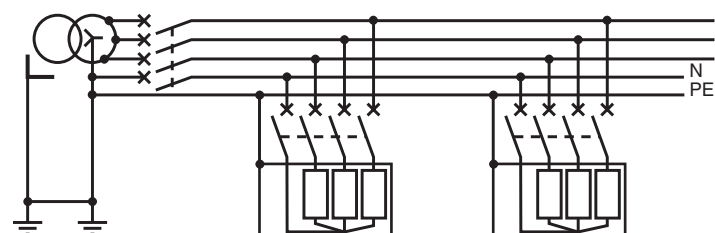


Рис. E14 : Система TN-S

## Основные характеристики

- В целом, система TN:
  - требует установки заземляющих электродов с равными интервалами в пределах установки
  - требует проверки эффективности отключения при первом однофазном КЗ посредством расчетов на этапе проектирования с последующими обязательными замерами для подтверждения эффективности отключения на этапе пуско-наладки
  - требует, чтобы любое изменение или расширение проектировалось и выполнялось квалифицированным электриком
  - КЗ на корпус может приводить к большому повреждению обмоток вращающихся машин
  - высокая опасность пожара из-за повышенного тока однофазного КЗ (70 – 80% всех замыканий).
- Система TN-C:
  - с первого взгляда может показаться менее дорогостоящей (экономия одного проводника и одного полюса выключателей)
  - требует использования неподвижных и жестких проводников
  - запрещена к использованию в определенных случаях:
    - помещения с риском пожара
    - компьютерное оборудование (гармонические токи в нейтрали)
- Система TN-S:
  - может использоваться даже с гибкими проводниками
  - в силу разделения нейтрали и защитного проводника, обеспечивает чистое защитное заземление (компьютеры и помещения с особыми рисками)

## Система IT (см. Рис. E15)

### Система IT:

#### ■ Метод защиты:

- соединение и заземление открытых проводящих частей;
- индикация первого замыкания на землю посредством устройства контроля изоляции (IMD);
- отключение при втором замыкании (КЗ) с помощью защиты максимального тока (выключатели или плавкие предохранители).

#### ■ Принцип работы:

- сигнализация первого замыкания на землю;
- обязательная локализация и устранение первого замыкания;
- отключение при двойном замыкании на землю.

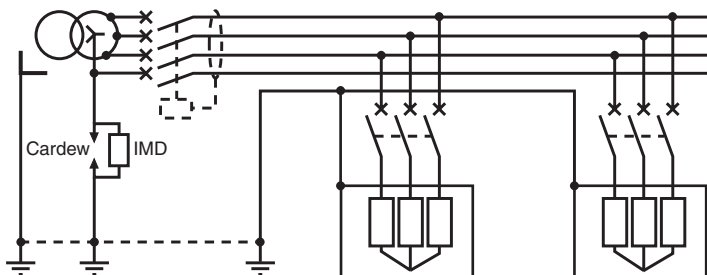


Рис. E15 : Система IT

## Основные характеристики

- Решение, обеспечивающее максимальную бесперебойность питания
- Сигнализация первого замыкания с последующей обязательной локализацией и устранением повреждения обеспечивает систематическое предотвращение перерывов в электроснабжении
- Как правило, используется на установках с питанием через частный трансформатор высокого/низкого или низкого/низкого напряжения
- Требуется обслуживающего персонала для контроля и работы
- Требуется высокого уровня изоляции в сети (что означает разделение крупной сети и использование разделительного трансформатора для питания нагрузок с высокими токами утечки)
- Проверка эффективности отключения при двойном замыкании (КЗ) должна проводиться посредством расчетов на этапе проектирования с последующими обязательными замерами на этапе пуско-наладки для каждой группы взаимосвязанных проводником РЕ открытых проводящих частей
- Защита нейтрали должна обеспечиваться, как указывается в п.7.2 Главы G



Выбор не зависит от критериев безопасности.  
Три системы эквивалентны по защите людей при условии соблюдения всех правил монтажа и эксплуатации.  
Критерии выбора оптимальной системы зависят от нормативных требований, необходимой бесперебойности питания, рабочих условий и типов сети и нагрузок.

## 1.4 Критерии выбора систем TT, TN и IT

По защите людей три системы заземления сети (СЗС) эквивалентны при условии соблюдения всех правил монтажа и эксплуатации. Поэтому, выбор не зависит от критериев безопасности.

Определить оптимальные системы можно путем объединения всех требований (нормы, бесперебойность питания, рабочие условия и типы сети и нагрузок) (см. **Рис. E16**). Выбор определяется следующими факторами:

- Прежде всего, действующие нормы, которые в некоторых случаях вводят обязательное использование определенных типов СЗС
- Во-вторых, решение владельца в отношении электропитания – питание через частный трансформатор высокого/низкого напряжения (абонент высокого напряжения) или владелец имеет частный источник энергии (или разделительный трансформатор).

Если владелец сделал выбор, решение по СЗС принимается после обсуждений с разработчиком сети (КБ, подрядчик). Обсуждения должны включать следующее:

- Прежде всего, эксплуатационные требования (требуемый уровень бесперебойности питания) и рабочие условия (техобслуживание проводится электротехническим персоналом или нет, собственный или внешний персонал и т.д.)
- Во-вторых, конкретные характеристики сети и нагрузок (см. на Рис. E17 следующей странице)

	TT	TN-S	TN-C	IT1	IT2	Примечания
<b>Электротехнические характеристики</b>						
Ток повреждения (КЗ)	-	--	--	+	--	Только система IT обеспечивает пренебрежимо малые токи первого замыкания на землю
Напряжение косвенного прикосновения	-	-	-	+	-	В системе IT, напряжение косвенного прикосновения крайне мало при первом замыкании, но значительно при двойном
Напряжение косвенного прикосновения	+/- -	-	-	+	-	В системе TT, напряжение косвенного прикосновения крайне мало при эквипотенциальной системе, в ином случае – высокое
<b>Защита</b>						
Защита людей от косвенного прикосновения	+	+	+	+	+	Все схемы СЗС эквивалентны при соблюдении правил
Защита людей при помощи аварийных энергоблоков	+	-	-	+	-	Системы, где защита обеспечивается с помощью УЗО, не чувствительны к изменению внутреннего сопротивления источника
Пожарная защита (с УЗО)	+	+	Не существ.	+	+	Все схемы СЗС, в которых могут использоваться устройства УЗО, эквивалентны. Система TN-C запрещена в помещениях с опасностью пожара
<b>Перенапряжения</b>						
Непрерывное перенапряжение	+	+	+	-	+	При первом замыкании в системе IT напряжение на исправных фазах увеличивается до линейного
Переходное перенапряжение	+	-	-	+	-	Системы с высокими токами повреждения (КЗ) могут вызывать переходные перенапряж.
Перенапряжение при отказе трансформатора (первичн./вторичн.)	-	+	+	+	+	В системе TT, имеется асимметрия напряжений между разными заземляющими электродами. Другие системы соединяются с одним заземляющим электродом
<b>Электромагнитная совместимость</b>						
Устойчивость к близким разрядам молнии	-	+	+	+	+	В системе TT, возможны асимметрии напряжений между заземляющими электродами. В системе TT, имеется значительное сопротивление между двумя отдельными заземляющими электродами
Устойчивость к разрядам молнии на линиях среднего напряжения	-	-	-	-	-	Все системы заземления эквивалентны, когда линия среднего напряжения попадает под прямой разряд молнии
Непрерывное излучение электромагнитного поля	+	+	-	+	+	Подсоединение PEN к металлоконструкциям здания ведет к непрерывной генерации электромагнитных полей
Переходная неэквипотенциальность PE	+	-	-	+	-	PE не эквипотенциален при высоком токе повреждения (КЗ)
<b>Бесперебойность питания</b>						
Отключение при первом замыкании на землю	-	-	-	+	+	Только система IT продолжает работать при первом замыкании на землю
Понижение напряжения при однофазном замыкании	+	-	-	+	-	Системы TN-S, TNC и IT (двойное замыкание) вызывают высокие токи повреждения (КЗ), которые могут привести к понижению фазного напряжения
<b>Монтаж</b>						
Специальные устройства	-	+	+	-	-	Система TT требует использования УЗО. Система IT требует использования устройств контроля изоляции
Число заземляющих устройств	-	+	+	-/+	-/+	Система TT требует двух отдельных заземляющих устройств. Система IT обеспечивает выбор между одним или двумя заземляющими устройствами.
Число проводников	-	-	+	-	-	Только система TN-C обеспечивает (в определенных случаях) сокращение числа проводников
<b>Техобслуживание</b>						
Стоимость ремонтных работ	-	--	--	-	--	Стоимость ремонтных работ зависит от степени повреждения, вызванного токами повреждения
Повреждение установок	+	-	-	++	-	Системы, вызывающие высокие токи повреждения (КЗ), требуют проверки после устранения повреждения

Рис. E16 : Сравнение систем заземления электрических сетей

Тип сети		Рекомендуется	Используется	Не рекомендуется
Крупная сеть с высококачественными заземляющими электродами для открытых проводящих частей (10 Ом макс.)			TT, TN, IT <sup>(1)</sup> или комбинацию	
Крупная сеть с низкокачественными заземляющими электродами для открытых проводящих частей (> 30 Ом)		TN	TN-S	IT <sup>(1)</sup> TN-C
Зона возмущения (например, теле- или радиопередатчик)		TN	TT	IT <sup>(2)</sup>
Сеть с высокими токами утечки (> 500 мА)		TN <sup>(4)</sup>	IT <sup>(4)</sup> TT <sup>(3) (4)</sup>	
Сеть с наружными воздушными линиями		TT <sup>(5)</sup>	TN <sup>(5) (6)</sup>	IT <sup>(6)</sup>
Аварийный резервный энергоблок		IT	TT	TN <sup>(7)</sup>
<b>Тип нагрузок</b>				
Нагрузки, чувствительные к высоким токам повреждения (КЗ) (двигатели и т.д.)		IT	TT	TN <sup>(8)</sup>
Нагрузки с низким уровнем изоляции (эл. печи, сварочные аппараты, нагревательные элементы, погружные нагреватели, кухонное оборудование)		TN <sup>(9)</sup>	TT <sup>(9)</sup>	IT
Многочисленные 1-фазные нагрузки «фаза-нейтраль» (подвижные, полустационарные, передвижные)		TT <sup>(10)</sup> TN-S		IT <sup>(10)</sup> TN-C <sup>(10)</sup>
Нагрузки со значительными рисками (подъемники, конвейеры и т.д.)		TN <sup>(11)</sup>	TT <sup>(11)</sup>	IT <sup>(11)</sup>
Многочисленные вспом. устройства (станки)		TN-S	TN-C IT <sup>(12 bis)</sup>	TT <sup>(12)</sup>
<b>Прочее</b>				
Питание через силовой трансформатор с соединением «звезда-звезда» <sup>(13)</sup>		TT	IT Без нейтрали	IT <sup>(13)</sup> С нейтралью
Помещения с риском пожара		IT <sup>(15)</sup>	TN-S <sup>(15)</sup> TT <sup>(15)</sup>	TN-C <sup>(14)</sup>
Увеличение уровня мощности абонента низковольтной сети общего пользования, требуется частная подстанция		TT <sup>(16)</sup>		
Установка с частыми изменениями		TT <sup>(17)</sup>		TN <sup>(18)</sup> IT <sup>(18)</sup>
Установка с неопределенной непрерывностью цепей заземления (рабочие участки, старые установки)		TT <sup>(19)</sup>	TN-S	TN-C IT <sup>(19)</sup>
Электронное оборудование (компьютеры, ПЛК)		TN-S	TT	TN-C
Сеть контроля и управления машинами, датчики ПЛК и приводы		IT <sup>(20)</sup>	TN-S, TT	

- (1) Когда СЗС не предписывается нормами, она выбирается по уровню рабочих характеристик (бесперебойность питания, которая требуется по соображениям безопасности или необходима для обеспечения производительности, и т.д.)
- Независимо от СЗС, вероятность повреждения изоляции повышается при увеличении протяженности сети. Может потребоваться разделить сеть, чтобы облегчить локализацию повреждений и позволить реализовать систему, рекомендованную выше, для каждого типа установки.
- (2) Риск дугового разряда на ограничителе перенапряжений превращает изолированную нейтраль в заземленную нейтраль. Эти риски повышены для районов с частыми грозами или для установок с питанием через воздушную сеть. Если система IT выбирается для обеспечения повышенного уровня бесперебойности питания, разработчик системы должен точно рассчитать режим отключения при втором повреждении (КЗ).
- (3) Риск излишних отключений УЗО.
- (4) Независимо от СЗС, идеальное решение состоит в изоляции проблемной секции, если ее можно легко определить.
- (5) Риск однофазных КЗ на землю, нарушающих эквипотенциальность.
- (6) Фактор неопределенности, связанный с изоляцией, из-за влажности и проводящей пыли.
- (7) Система TN не рекомендуется из-за риска повреждения генератора в случае внутреннего отказа (КЗ). Более того, если генераторы питают защитное оборудование, система не должна срабатывать при первом замыкании.
- (8) Ток между фазой и землей может в несколько раз превышать  $I_n$  с риском повреждения обмоток двигателей или повреждения магнитопровода.
- (9) Чтобы обеспечить бесперебойное питание и безопасность, необходимо (и настоятельно рекомендуется) отделить эти нагрузки от остальных нагрузок установки (трансформаторы с местным соединением нейтрали), независимо от СЗС.
- (10) Если обеспечение качества оборудования не является приоритетной задачей при проектировании, существует риск быстрого снижения сопротивления изоляции. Система TT с УЗО представляет оптимальное решение этих проблем.
- (11) Необходимо учитывать, что подвижность нагрузки этого типа приводит к частым повреждениям. Независимо от системы СЗС, рекомендуется запитывать эти цепи через трансформаторы с местным соединением нейтрали.
- (12) Требуется использования трансформаторов с местной системой TN для предотвращения эксплуатационных рисков и излишних отключений при первом повреждении (КЗ) (TT) или двойном повреждении (КЗ) (IT).
- (12 bis) С двойным разрывом в цепи управления.
- (13) Чрезмерное ограничение тока однофазного КЗ из-за высокого значения сопротивления нулевой последовательности (в 4-15 раз больше сопротивления прямой последовательности). Эта система должна заменяться схемой «звезда-треугольник».
- (14) Высокие токи повреждения делают опасной систему TN. Система TN-C запрещена.
- (15) Независимо от системы, УЗО должно устанавливаться на  $I_n < 500$  мА.
- (16) На установке с низковольтным питанием должна использоваться система TT. Использование этой системы допускает только минимальное количество изменений существующей сети (не должны прокладываться дополнительные кабели, не должны изменяться устройства защиты).
- (17) Для использования не требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал.
- (18) Установка этого типа требует особого внимания к обеспечению безопасности при техобслуживании. Необходимо профилактическое обслуживание системы TN, в ином случае со временем потребуются высококвалифицированный персонал для обеспечения безопасности.
- (19) Риски разрыва проводников (питание, защита) могут привести к потере эквипотенциальности открытых проводящих частей. Рекомендуется и часто обязательна система TT или TN-S с УЗО на 30 мА. Система IT может использоваться только в специальных случаях.
- (20) Это решение позволяет избежать излишних отключений при случайных утечках на землю.

Рис. E17: Влияние сети и нагрузок на выбор системы заземления

## 1.5 Выбор метода заземления и его реализация

После ознакомления с действующими нормами Рис. E16 и E17 могут использоваться при принятии решения относительно разделения и гальванической развязки соответствующих секций предлагаемой установки.

### Разделение источника

Это метод использования нескольких трансформаторов вместо одного большой мощности. В этом случае нагрузка, являющаяся источником сетевых нарушений (мощные двигатели, печи и т.д.), может запитываться через отдельный трансформатор.

Тем самым повышается качество и бесперебойность питания всей установки.

Стоимость распределительного устройства снижается (уровень тока КЗ ниже).

Экономические аспекты использования отдельных трансформаторов должны определяться в каждом конкретном случае.

### Секционирование сети

Создание гальванически разделенных секций посредством трансформаторов среднего/низкого напряжения позволяет оптимизировать выбор методов заземления с учетом конкретных требований (см. Рис. E18 и Рис. E19 ).

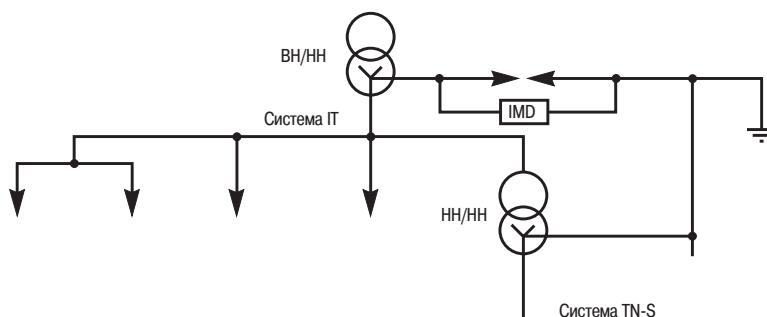


Рис. E18 : Секция TN-S в системе IT

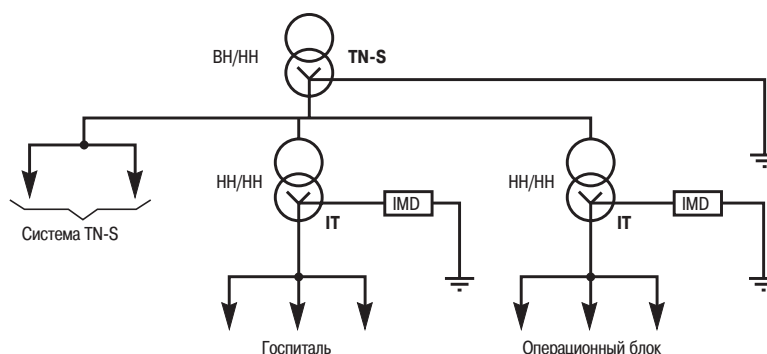


Рис. E19 : Секция IT в системе TN-S

### Заключение

Оптимизация характеристик всей установки определяет выбор системы заземления.

Это включает:

- Начальные капиталовложения, и
- Будущие эксплуатационные расходы, которые трудно оценить, связанные с недостаточной надежностью, качеством оборудования, безопасностью, бесперебойностью питания и т.д.

Идеальная система должна включать основные источники питания, местные резервные источники питания (см. п. 1.4 в Главе E) и соответствующие системы заземления.

Эффективный метод обеспечения малого сопротивления заземления состоит в заглублении замкнутого контура в грунт дна котлована под фундамент здания.

Сопротивление  $R$  такого контура (в однородном грунте) составляет (приблизительно),  $R = \frac{2 \rho}{L}$

Где  $L$  = длина заглубленного проводника,

$\rho$  = удельное сопротивление грунта, Ом·м

## 1.6 Монтаж заземляющих устройств и замеры

Качество заземляющего устройства (как можно меньшее сопротивление) зависит в основном от двух факторов:

- Метод монтажа
- Тип грунта

### Методы монтажа

Ниже обсуждаются три общепринятых метода монтажа:

#### Заглубленная кольцевая цепь (см. Рис. E20)

Это решение настоятельно рекомендуется, особенно в случае нового здания. Электроды должны заглубляться по периметру выемки под фундаменты. Необходимо, чтобы неизолированный проводник находился в непосредственном контакте с грунтом (и не находился в гравии или заполнителе, часто образующем основание для укладки бетона). Для монтажа соединений необходимо обеспечить как минимум четыре проводника от электрода, которые широко разнесены по вертикали. При возможности, каждый арматурный стержень в бетоне должен подсоединяться к электроду. Проводник, образующий заземляющий контур, особенно если он расположен в котловане под фундамент, должен заглубляться на минимум 50 см под заполнитель для бетонного основания. Заземляющий контур и вертикальные проводники к нижнему этажу не должны находиться в контакте с бетоном фундамента.

Для существующих зданий, заземляющий контур должен заглубляться около наружной стены помещений на глубину не менее 1 м. Как правило, все вертикальные выводы от него к поверхности должны быть изолированы на номинальное напряжение (600-1000В).

Возможные типы проводников:

- Медь: Неизолированный ( $> 25 \text{ мм}^2$ ) или многожильный ( $> 25 \text{ мм}^2$  и толщина  $> 2 \text{ мм}$ ) кабель
- Алюминий, со свинцовой оболочкой: Кабель ( $> 35 \text{ мм}^2$ )
- Оцинкованная сталь: Неизолированный ( $> 95 \text{ мм}^2$ ) или многожильный ( $> 100 \text{ мм}^2$  и толщина  $> 3 \text{ мм}$ ) кабель

Приблизительное сопротивление растекания электрода  $R$ , Ом:

$$R = \frac{2 \rho}{L}$$

Где:

$L$  = длина проводника,  $\rho$  = удельное сопротивление грунта, Ом·м (см. "Влияние типа грунта" на следующей странице)

#### Заземляющие стержневые электроды (см. Рис. E21)

Вертикально расположенные заземляющие стержни часто используются для существующих зданий и для улучшения (т.е., снижения сопротивления) существующих заземляющих контуров.

Возможные типы стержней:

- Медь или (чаще) сталь с медным покрытием. Стержни из последнего материала имеют, как правило, длину 1 или 2 метра и обеспечиваются резьбой на концах и втулками для размещения на значительной глубине (например, уровень грунтовых вод в зонах с высоким удельным сопротивлением грунта)
- Трубка из оцинкованной стали (см. Примечание (1) на следующей странице) диаметром  $> 25 \text{ мм}$  или стержень диаметром  $> 15 \text{ мм}$ , длиной  $> 2 \text{ м}$  в каждом случае.

Для  $n$  стержней:  $R = \frac{1 \rho}{n L}$

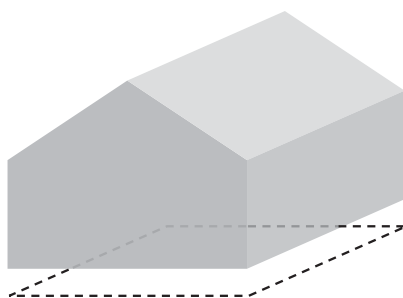


Рис. E20 : Проводник, заглубленный ниже уровня фундамента (не в бетоне)

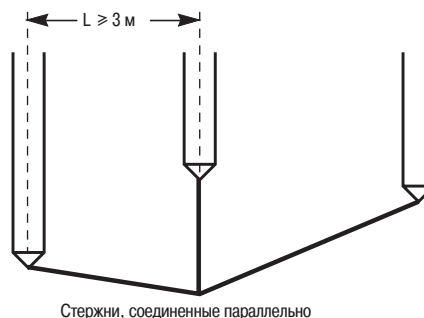


Рис. E21 : Заземляющие стержневые электроды

E12 Для вертикального пластинчатого электрода:

$$R = \frac{0.8 \rho}{L}$$

Замеры на заземляющих электродах в аналогичных грунтах полезны для определения удельного сопротивления, используемого при расчете системы заземляющих электродов

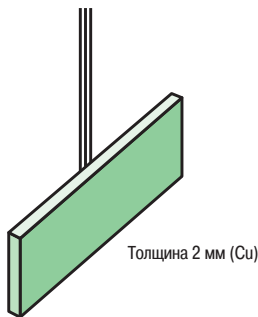


Рис. E22 : Вертикальная пластина

Часто необходимо использовать несколько стержней. В этом случае интервал между ними должен в 2-3 раза превышать их длину.

Общее сопротивление (в гомогенном грунте) равно сопротивлению одного стержня, разделенному на число стержней. Приблизительное сопротивление R:

$$R = \frac{1 \rho}{n L} \quad \text{Если интервал между стержнями} > 4L$$

где:

L = длина стержня, м

$\rho$  = удельное сопротивление грунта, Ом·м (см. «Влияние типа грунта» ниже)

n = число стержней

Вертикальные пластины (см. Рис. E22)

Прямоугольные пластины, каждая сторона которых должна быть > 0,5 м, обычно используются в качестве заземляющих электродов, заглубляемых в вертикальной плоскости таким образом, что центр пластины находится минимум 1 м ниже поверхности грунта.

Возможные типы пластин:

- Медь, толщина 2 мм
- Оцинкованная <sup>(1)</sup> сталь, толщина 3 мм

Сопротивление R, Ом, равно (приблизительно):

$$R = \frac{0.8 \rho}{L}$$

L = периметр пластины, м

$\rho$  = удельное сопротивление грунта, Ом·м (см. «Влияние типа грунта» ниже)

Влияние типа грунта

Тип грунта	Среднее значение удельного сопротивления, Ом
Заболоченная почва	1 - 30
Илистый наносной слой	20 - 100
Дерновая земля, гнилая листва	10 - 150
Торф	5 - 100
Мягкая глина	50
Глинистый известняк и уплотненная глина	100 - 200
Юрский известняк с содержанием глины	30 - 40
Глинистый песок	50 - 500
Кремнистый песок	200 - 300
Каменистый грунт	1,500 - 3,000
Задернованный каменистый грунт	300 - 500
Известняковый грунт	100 - 300
Известняк	1,000 - 5,000
Трещиноватый известняк	500 - 1,000
Аспид, сланец	50 - 300
Слюдистый сланец	800
Гранит и песчаник	1,500 - 10,000
Измененный гранит и песчаник	100 - 600

Рис. E23 : Удельное сопротивление (Ом·м) разных типов грунта

Тип грунта	Среднее значение удельного сопротивления, Ом
Плодородная почва, уплотненный насыпной грунт	50
Засушливая почва, гравий, неуплотненный неоднородный грунт	500
Каменистый грунт, открытый сухой песок, трещиноватые породы	3,000

Рис. E24 : Среднее удельное сопротивление (Ом·м) для разных грунтов

(1) Если используются заземляющие электроды из оцинкованных проводящих материалов, могут потребоваться протекторные аноды катодной защиты для предотвращения быстрой коррозии электродов в агрессивном грунте. Можно использовать специальные магниевые аноды (в пористом пакете, заполненном соответствующим грунтом) для прямого подсоединения к электродам. В этом случае следует проконсультироваться у специалиста

## Измерение сопротивления растекания заземляющего контура

### Сопротивление заземляющего устройства редко остается постоянным

Некоторые основные факторы, влияющие на такое сопротивление:

#### ■ Влажность грунта

Сезонные изменения содержания влаги в грунте могут быть значительными на глубине до 2 метров. На глубине 1 метра удельное сопротивление (и, следовательно, сопротивление) может изменяться в 1-3 раза между влажной зимой и сухим летом в регионах с умеренным климатом.

#### ■ Замерзание

Мерзлая земля может повышать удельное сопротивление грунта на несколько порядков. Это одна из причин, по которой рекомендуется монтировать электроды на большой глубине, особенно в районах с холодным климатом.

#### ■ Старение

Характеристики материалов, используемых для изготовления электродов, ухудшаются в той или иной мере по разным причинам, например:

##### □ Химические реакции (в кислых или щелочных грунтах)

□ Гальванический эффект: из-за блуждающих постоянных токов в земле, например, от электрических железных дорог и т.д. или из-за разнородности металлов, составляющих первичные элементы. Разные грунты, действующие на участки одного проводника, могут также образовывать катодные и анодные зоны с последующей потерей поверхностного слоя металла. К сожалению, наиболее благоприятные условия для низкого сопротивления между землей и электродом (например, низкое удельное сопротивление грунта) также благоприятствуют образованию гальванических токов.

#### ■ Окисление

Паяные и сварные швы и соединения являются местами, наиболее чувствительными к окислению. Для предупреждения окисления обычно используется тщательная очистка выполненного шва или соединения и обмотка промасленной лентой.

### Измерение сопротивления между электродом и землей

Необходимо обеспечить съемные перемычки, которые позволяют изолировать заземляющий контур от электроустановки для периодической проверки сопротивления заземления. Для проведения таких проверок требуются два вспомогательных электрода.

#### ■ Измерение с помощью амперметра (см. Рис. E25)

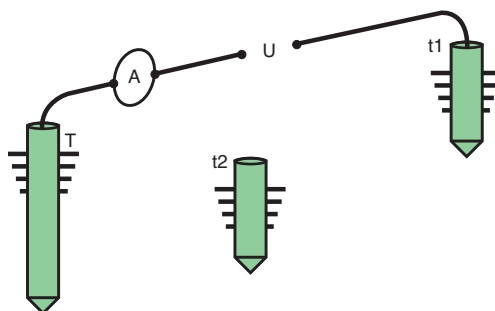


Рис. E25 : Измерение сопротивления растекания заземляющего устройства с помощью амперметра

$$A = R_T + R_{t1} = \frac{U_{Tt1}}{i_1}$$

$$B = R_{t1} + R_{t2} = \frac{U_{t1t2}}{i_2}$$

$$C = R_{t2} + R_T = \frac{U_{t2T}}{i_3}$$

При постоянном напряжении источника U (с одинаковой поправкой для каждой проверки):

$$R_T = \frac{U}{2} \left( \frac{1}{i_1} + \frac{1}{i_3} - \frac{1}{i_2} \right)$$

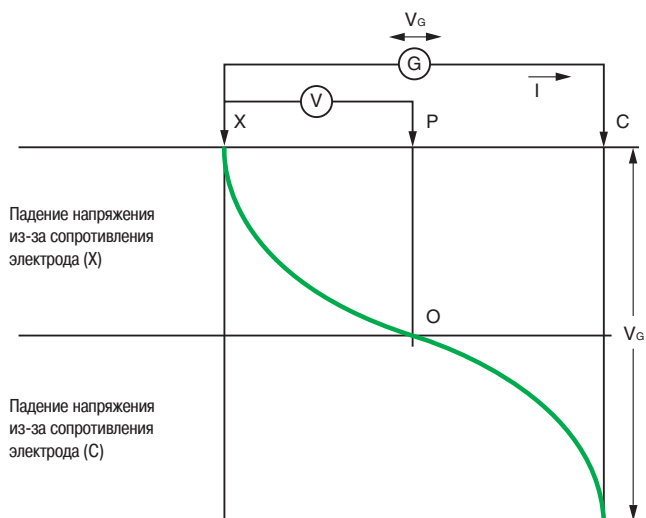
Чтобы устранить погрешности из-за блуждающих токов земли (гальванические постоянные токи или токи утечки от силовых сетей, сетей связи и т.д.), испытательный ток должен быть переменным с частотой, отличной от частоты энергосистемы или ее гармоник. Приборы, использующие генераторы с ручным приводом для выполнения этих измерений, обычно генерируют напряжение переменного тока при частоте 85-135 Гц.

Расстояния между электродами при данном способе измерения не имеют большого значения и могут измеряться в разных направлениях от проверяемого электрода в зависимости от местных условий. Как правило, выполняется ряд проверок при разных интервалах и направлениях для сверки результатов проверок.

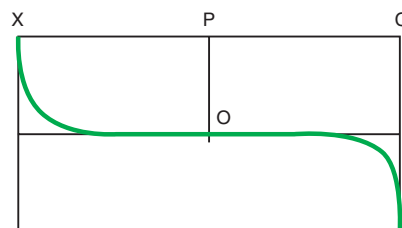
■ Использование омметра с прямым считыванием для измерения сопротивления заземления.

Этот прибор использует генератор с ручным приводом или электронный генератор переменного тока и два вспомогательных электрода, интервал между которыми должен быть таким, что зона влияния проверяемого электрода не перекрывает зону влияния контрольного электрода. Контрольный электрод (С), самый дальний от проверяемого электрода (Х), проводит ток через землю и проверяемый электрод, а второй контрольный электрод (Р) принимает напряжение. Это напряжение, измеренное между (Х) и (Р), вызвано испытательным током и является мерой сопротивления (проверяемого электрода) в контакте с землей. Необходимо тщательно выбрать расстояние между (Х) и (Р) для обеспечения точных результатов. При увеличении расстояния между (Х) и (С) зоны растекания электродов (Х) и (С) удаляются друг от друга и кривая потенциала (напряжения) становится все более горизонтальной около точки (О).

Поэтому, при проверках расстояние между (Х) и (С) увеличивается до получения аналогичных показаний, снимаемых с помощью электрода (Р) в трех различных точках, например, в точке (Р) и на расстоянии около 5 метров от точки (Р). Как правило, расстояние между (Х) и (Р) составляет около 0,68 расстояния между (Х) и (С).



а) Принцип измерения основан на предположении об однородности грунта. В случае перекрывания зон влияния электродов С и Х трудно определить положение контрольного электрода Р для получения удовлетворительных результатов.



б) Показывает эффект широкого разнеса (Х) и (С) на градиент потенциала. Положение контрольного электрода Р не имеет большого значения и может быть легко определено.

Рис. E26 : Измерение сопротивления растекания с помощью омметра



## 2 Система установки

Распределительные устройства, включая главное РУ низкого напряжения (ГРЩ), играют решающую роль в обеспечении надежности электроустановки. Они должны соответствовать четко определенным нормам, регулирующим проектирование и изготовление распределительных устройств низкого напряжения.

Нагрузочные требования определяют тип распределительного устройства.

### 2.1 Распределительные устройства

Распределительное устройство (РУ) — это электроустановка, в которой входящая электроэнергия распределяется по отдельным цепям, каждая из которых контролируется и защищается плавкими предохранителями или выключателями распределительного устройства. Распределительное устройство разделяется на ряд функциональных блоков, каждый из которых включает все электрические и механические элементы, которые необходимы для выполнения заданной функции. Оно представляет собой ключевое звено в цепи обеспечения надежности.

Поэтому тип РУ должен идеально подходить для области применения. Проектирование и изготовление распределительного устройства должны осуществляться в соответствии с действующими нормами, стандартами и учитывать опыт эксплуатации.

Корпус РУ обеспечивает двойную защиту:

- Защита показывающих приборов, реле, плавких предохранителей и т.д. от механических ударов, вибраций и других внешних воздействий, которые могут нарушать их работу (электромагнитные помехи, пыль, влажность, насекомые и т.д.)
- Защита людей от прямых прикосновений (см. степень защиты IP и показатель IK в п.3.3, Глава E).

#### Типы распределительных устройств

Распределительные устройства могут различаться по назначению и конструкции (особенно по компоновке шин).

##### Типы распределительных устройств по назначению

Основные типы распределительных устройств:

- Главное распределительное устройство низкого напряжения - ML-S - (см. **Рис. E27a**)
- Центры управления двигателями - M-C - (см. **Рис. E27b**)
- Промежуточные(вторичные) РУ (см. **Рис. E28**)
- Конечные РУ (см. **Рис. E29**)

Распределительные устройства специального назначения (например, отопление, лифты, производственные процессы) могут располагаться:

- Рядом с главным РУ низкого напряжения, или
- Около соответствующего оборудования

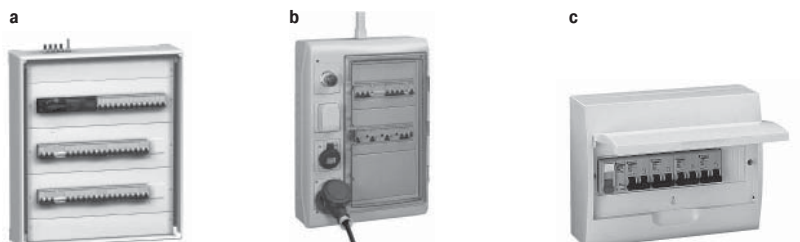
Как правило, вторичные и конечные распределительные устройства распределяются по объекту.



**Рис. E27 :** [a] ГРЩ (Prisma Plus P) с входящими цепями в форме шинопроводов - [b] Центр управления двигателями низкого напряжения - MCC - (Okken)



**Рис. E28 :** Промежуточное РУ (Prisma Plus G)



**Рис. E29 :** Конечное РУ [a] Prisma Plus G Pack; [b] Kaedra; [c] mini-Pragma



Различаются:

- Традиционные распределительные устройства, в которых выключатели, плавкие предохранители и т.д. установлены на монтажной панели на задней стороне корпуса
- Функциональные РУ специального назначения, модульной стандартной конструкции

E16

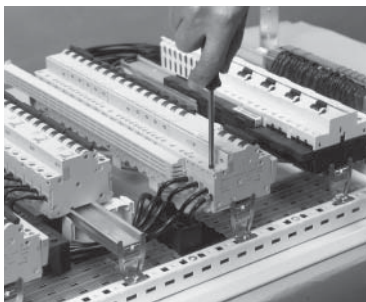


Рис. Е30 : Конечное РУ с неподвижно закрепленными функциональными блоками (Prisma Plus G)

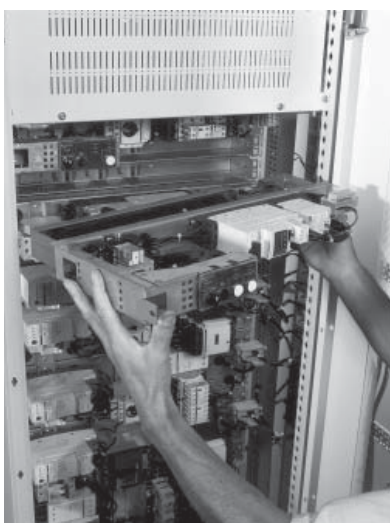


Рис. Е31 : РУ с разъёмными функциональными блоками



Рис. Е32 : РУ с выдвижными функциональными блоками

## Два типа распределительных устройств

### Традиционные распределительные устройства

Коммутационные аппараты, плавкие предохранители и т.д. расположены на монтажной панели на задней стороне корпуса. Индикаторы и контрольные устройства (приборы, лампы, кнопки и т.д.) установлены на передней стороне РУ.

Размещение компонентов в корпусе требует тщательного анализа с учетом размеров каждого элемента и его соединений, а также зазоров, необходимых для обеспечения безопасной и безотказной работы.

### Функциональные распределительные устройства

Как правило, это устройства специального назначения. Они состоят из функциональных блоков, которые включают коммутационные аппараты и стандартные приспособления для монтажа и соединений, что обеспечивает высокий уровень надежности и большие возможности для изменений.

#### ■ Преимущества

Функциональные распределительные устройства используются на всех уровнях низковольтного распределения (от главного РУ низкого напряжения (ГРЩ) до конечного распределения) в силу ряда их преимуществ:

- Модульность системы, которая позволяет объединить многие функции в одном распределительном устройстве, включая защиту, контроль, и управление электроустановками. Кроме того, модульная конструкция обеспечивает повышение уровня техобслуживания, эксплуатации и возможности модернизации
- Ускорение разработки распределительных устройств, поскольку нужно просто включить дополнительные функциональные блоки
- Сборные компоненты легче устанавливать
- И, наконец, эти распределительные устройства проходят типовые испытания, которые обеспечивают высокий уровень надежности.

Новые распределительные устройства Prisma Plus G и P от компании Schneider Electric рассчитаны на ток до 3200А и обеспечивают следующие преимущества:

- Гибкость и простота в монтаже
  - Сертификация по стандарту I EC 60439 и гарантия надежной работы при безопасных условиях
  - Экономия времени на всех этапах – от разработки до монтажа, эксплуатации и модификации или модернизации
  - Простота в адаптации, например, к привычным стилям работы и нормам в разных странах мира
- Иллюстрации Е27а, Е28 и Е29 показывают примеры функциональных распределительных устройств, рассчитанных на все номинальные мощности, а иллюстрация Е27b – высокоэффективное функциональное распределительное устройство для промышленных целей.

#### ■ Основные типы функциональных блоков

Три основных типа функциональных блоков применяются в функциональных распределительных устройствах:

- Неподвижно закрепленные функциональные блоки (см. Рис. Е30)

Эти блоки не могут изолироваться от питания, так что любое вмешательство для техобслуживания, внесения изменений и т.д., требует отключения всего распределительного устройства. Однако, могут использоваться вставные или выдвижные устройства для минимизации времени простоя и повышения уровня готовности остального оборудования установки.

- Разъемные функциональные блоки (см. Рис. Е31)

Каждый функциональный блок смонтирован на съемной монтажной панели и обеспечен средствами изоляции от входной стороны (шины) и средствами разъединения на выходной стороне (выходящая цепь). Поэтому, весь блок может сниматься для техобслуживания без отключения всего устройства.

- Выдвижные функциональные блоки (см. Рис. Е32)

Коммутационные аппараты и сопутствующие приспособления для обеспечения выполнения функций смонтированы на горизонтальной выдвижной монтажной панели. Как правило, выполняемая функция является комплексной и часто связана с управлением двигателями.

Разъединение возможно на входной и выходной сторонах путем полного выдвижения секции, что позволяет быстро заменять поврежденный блок без отключения остальной части распределительного устройства.

Соблюдение действующих норм необходимо для обеспечения соответствующей степени надежности

Три элемента стандарта МЭК 60439-1 вносят значительный вклад в обеспечение надежности:

- Четкое определение функциональных блоков
- Формы разделения между соседними функциональными блоками в соответствии с требованиями пользователя
- Четкий перечень регулярных проверок и типовых испытаний

### Нормы

#### Различные стандарты

Определенные типы распределительных устройств (в частности, функциональные распределительные устройства) должны соответствовать специальным нормам согласно области применения или условиям окружающей среды.

Справочным международным стандартом для устройств, подлежащим полному и частичному типовым испытаниям, является стандарт МЭК 60439-1.

#### Стандарт МЭК 60439-1

##### ■ Классы устройств

Стандарт МЭК 60439-1 определяет два класса устройств:

- Комплексные распределительные устройства низкого напряжения, прошедшие типовые испытания, без значительных отклонений от установленного типа системы (ТТА), соответствие которой обеспечивается типовыми испытаниями, предусматриваемыми в стандарте
- Комплексные распределительные устройства низкого напряжения, прошедшие частичные типовые испытания (РТТА), которые могут включать узлы, не прошедшие типовые испытания, при условии, что такие узлы являются производными от узлов, прошедших типовые испытания.

При монтаже квалифицированным персоналом в соответствии с нормами профессионального производства работ и инструкциями изготовителя, такие устройства обеспечивают аналогичный уровень безопасности и качества.

##### ■ Функциональные блоки

Тот же стандарт определяет функциональные блоки:

- Часть устройства, включающая все электрические и механические элементы, необходимые для выполнения заданной функции
- Распределительное устройство включает вводный функциональный блок и один или несколько функциональных блоков для отходящих линий, в зависимости от эксплуатационных требований к установке

Кроме того, распределительные устройства используют функциональные блоки, которые могут быть неподвижно закрепленными, разъемными или выдвижными (см. п.3.1, Глава Е).

##### ■ Формы (см. Рис. Е33)

Разделение функциональных блоков внутри устройства обеспечивается с помощью форм, указываемых для различных режимов работы.

Формы пронумерованы ((1-4) с указанием вариантов "а" или "b"). Нумерация имеет интегральный характер, т.е., форма с более высоким номером объединяет характеристики предыдущих форм.

Стандарт определяет следующие формы:

- Форма 1: Без разделения
- Форма 2: Отделение шин от функциональных блоков
- Форма 3: Отделение шин от функциональных блоков и отделение всех функциональных блоков друг от друга, кроме их выходных зажимов
- Форма 4: Как для Формы 3, но с отделением выходных зажимов всех функциональных блоков друг от друга

Решение по применению формы основывается на соглашении между изготовителем и пользователем.

Функциональные распределительные устройства серии Prima Plus обеспечивают применение форм 1, 2b, 3b, 4a, 4b.

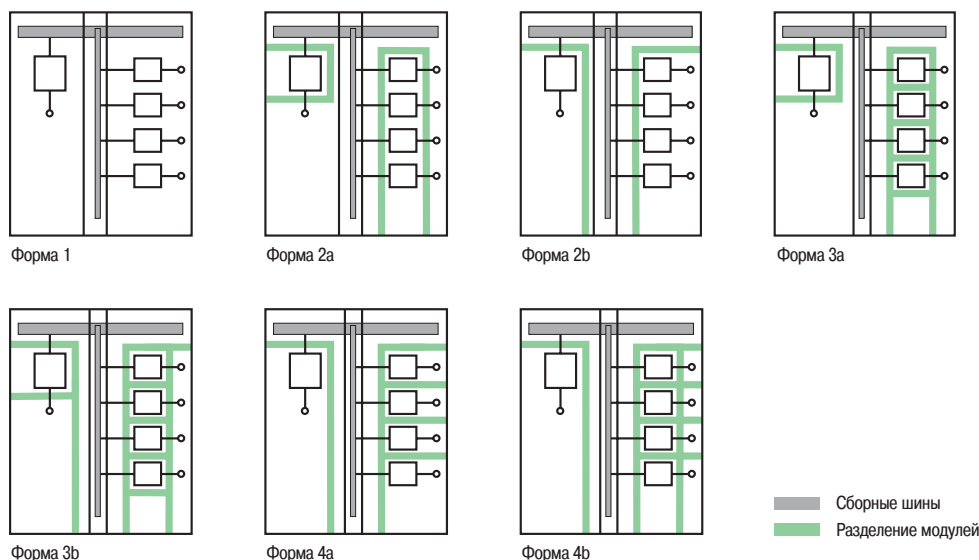


Рис. Е33 : Формы разделения для функциональных РУ низкого напряжения

Общедоступность электротехнической информации  
и «умные» распределительные устройства – это уже  
сегодняшняя реальность

#### ■ Типовые испытания

Обеспечивают соответствие каждого распределительного устройства стандарту. Протоколы испытаний, заверенные независимой организацией, являются гарантией для пользователей.

### Телеуправление и контроль электроустановки

Сегодня телеуправление и контроль не ограничивается крупными установками. Применение этих функций расширяется и обеспечивает значительное снижение затрат. Основные преимущества:

- Снижение платежей за электроэнергию
- Снижение затрат на поддержание установки в рабочем состоянии
- Оптимальное использование капиталовложений, особенно, оптимизация жизненного цикла установки
- Повышение уровня удовлетворенности потребителей электроэнергии (в строительстве и обрабатывающей промышленности) благодаря повышению эксплуатационной готовности и/или качества электроэнергии

Протокол Modbus становится открытым стандартом для обмена данными в распределительном устройстве и между распределительным устройством и потребителями по контролю и регулированию потребляемой мощности. Modbus существует в двух формах – витая пара (RS 485) и Ethernet-TCP/IP (IEEE 802.3).

Сайт [www.modbus.org](http://www.modbus.org) представляет все технические характеристики протокола и постоянно обновляет перечень продуктов и компаний, использующих открытый промышленный стандарт. Использование web-технологий позволило значительно расширить применение этого стандарта за счет снижения стоимости доступа к этим функциям посредством использования интерфейса, который стал универсальным (страницы сети), а также повышения уровня открытости и возможностей модернизации, которых просто не существовало всего несколько лет тому назад.

## 2.2 Кабели и шинопроводы

### Распределение по изолированным проводам и кабелям

#### Определения

- Провод



Провод состоит из металлической проводящей жилы с изолирующей оболочкой или без нее.

- Кабель



Кабель состоит из ряда проводников, электрически разделенных, но соединенных механически и, как правило, заключенных в гибкую защитную оболочку.

- Шинопровод



Шинопровод состоит из нескольких жестких проводников, закрепленных с помощью изоляторов в корпусе.

#### Маркировка проводов

Расцветка жил и маркировка должна выполняться в соответствии со следующими правилами:

- Правило 1

Комбинация зеленого и желтого цвета используется только для маркировки защитных проводников PE и PEN.

- Правило 2

- Если цепь включает нейтраль, она должна быть светло-голубого цвета или с маркировкой «1» для кабелей с числом проводников более пяти
- Если цепь не включает нейтраль, светло-голубой проводник может использоваться в качестве фазного провода, если он входит в состав кабеля с несколькими проводниками.

- Правило 3

Фазные проводники могут быть любого цвета, кроме:

- Зеленый + желтый
- Зеленый
- Желтый
- Светло-голубой (см. Правило 2)

Два возможных типа распределения:

- По изолированным проводам и кабелям
- По шинопроводам

## 2 Система установки

Маркировка проводников в кабеле выполняется с помощью цвета или цифр (см. **Рис. E34**).

Количество проводников в цепи	Цепь	Неподвижно закрепленные шинопроводы									
		Изолированные проводники					Жесткие и гибкие многожильные кабели				
		Ph	Ph	Pn	N	PE	Ph	Ph	Ph	N	PE
1	Защита или заземление					G/Y					
2	1-фазная между фазами	■	■				BL	LB			
	1-фазная между фазой и нейтралью	■			LB		BL			LB	
	1-фазная между фазой и нейтралью + защитный проводник	■			G/Y		BL			G/Y	
3	3-фазная без нейтрали	■	■	■			BL	B	LB		
	2 фазы + нейтраль	■	■		LB		BL	B		LB	
	2 фазы + защитный проводник	■	■			G/Y	BL	LB			G/Y
	1-фазная между фазой и нейтралью + защитный проводник	■			LB	G/Y	BL			LB	G/Y
4	3-фазная с нейтралью	■	■	■	LB		BL	B	LB	LB	
	3-фазная с нейтралью + защитный проводник	■	■	■		G/Y	BL	B	LB		G/Y
	2 фазы + нейтраль + защитный проводник	■	■		LB	G/Y	BL	B		LB	G/Y
	3-фазная с проводником PEN	■	■	■	G/Y		BL	B	LB	G/Y	
5	3 фазы + нейтраль + защитный проводник	■	■	■	LB	G/Y	BL	B	LB	LB	G/Y
> 5		Защитный проводник: G/Y – другие проводники: BL: с нумерацией цифра «1» зарезервирована за нейтралью, при наличии									

G/Y: Зеленый и желтый

BL: Черный

■ : См. Правило 3

LB: Светло-голубой B: Коричневый

**Рис. E34** : Расцветка и маркировка проводников по типу цепи

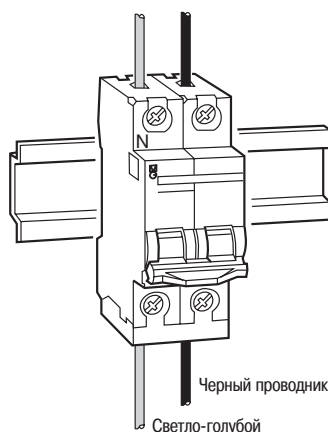
**Примечание:** Если цепь включает защитный проводник и кабель не имеет зелено-желтого проводника, защитный проводник может быть:

- зеленого и желтого цвета
- Голубого цвета, если цепь не имеет нейтрали
- Черного цвета, если цепь имеет нейтраль

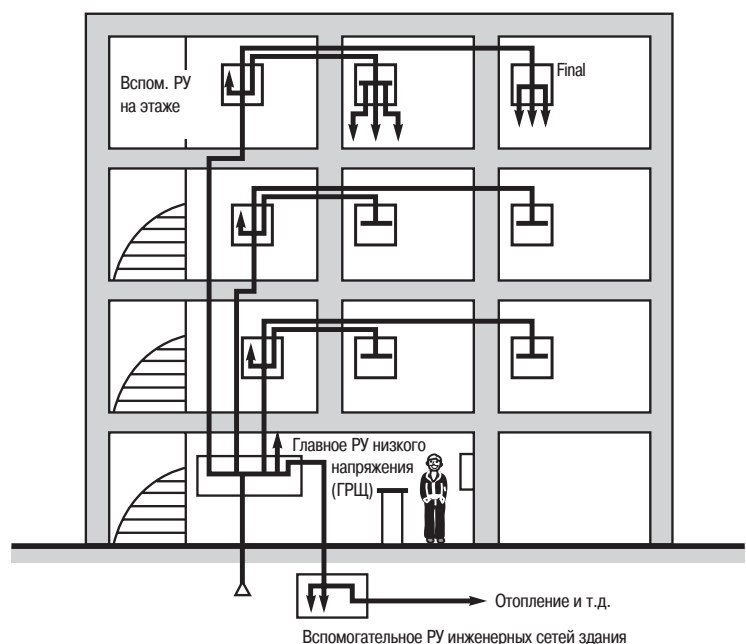
В последних двух случаях проводник должен иметь зеленые и желтые полосы или маркировку на концах и по всей видимой длине проводника.

Маркировка сетевых шнуров оборудования аналогична маркировке многожильных кабелей (см. **Рис. E35**).

**Методы распределения и монтажа** (см. **Рис. E36**)



**Рис. E35** : Расцветка проводников на выключателе с фазой и нейтралью

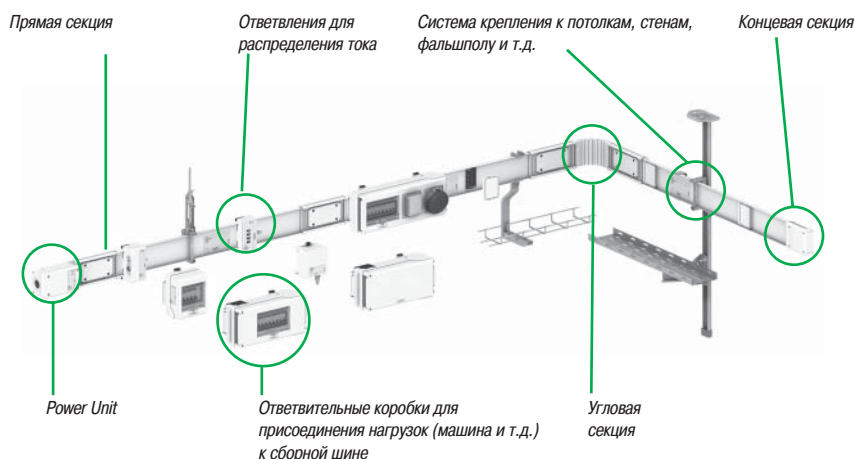


**Рис. E36** : Радиальное распределение кабелями в гостинице

## Шинопроводы

## Компоненты шинопроводов

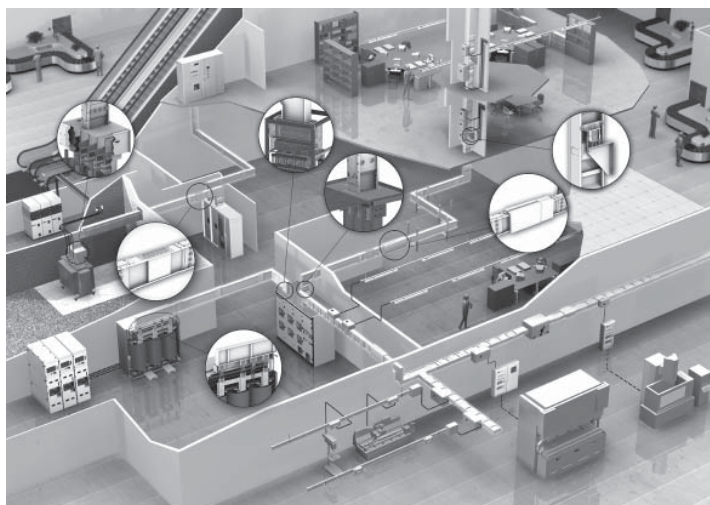
Шинопровод состоит из ряда проводников, защищенных оболочкой (см. **Рис. Е37**). Шинопроводы, используемые для передачи и распределения электроэнергии, имеют все средства, необходимые для монтажа: соединители, прямые секции, угловые секции, крепежные детали и т.д. Точки ответвления, расположенные с равным интервалом, обеспечивают подвод питания к любой точке установок.



**Рис. Е37** : Конструкция шинопровода для распределения тока 25-4000А.

## Типы шинопроводов

Шинопроводы представлены на всех уровнях распределения электроэнергии: от перемычки между трансформатором и ГРЩ до распределения к штепсельным розеткам и осветительному оборудованию офисов или распределение мощности для цехов.



**Рис. Е38** : Распределение при помощи шинопроводов

Речь идет об архитектуре распределительной сети.



Существует три основных типа шинопроводов.

■ Шинопровод (магистральный) между трансформатором и ГРЩ

Этот шинопровод устанавливается на постоянной основе и редко изменяется. Не имеет ответвлений. Часто используется для коротких участков. Почти всегда используется для номинальных токов 1600/2000А, например, когда невозможна прокладка параллельных кабелей. Шинопроводы также используются между ГРЩ и распределительными устройствами за ним.

Характеристики магистральных шинопроводов позволяют использовать их при рабочих токах 1000-5000А и токах КЗ до 150 кА.

■ Распределительные шинопроводы с малой или высокой плотностью ответвлений

Расположены за магистральными шинопроводами; запитывают два типа нагрузок:

- Помещения среднего размера (производственные цеха с литейными машинами и металлообрабатывающими станками или супермаркеты с большими нагрузками). Уровни номинального тока и тока КЗ могут быть довольно высоки (100-1000А и 20-70 кА соответственно)
- Небольшие объекты (цеха со станками, текстильные фабрики с небольшими станками, магазины с небольшими нагрузками) Пониженные уровни токов (40-400А и 10-40 кА соответственно)

Использование распределительных шинопроводов отвечает следующим требованиям заказчика:

- Возможность изменения и модернизации со значительным расширением ответвлений
- Надежность и бесперебойность питания, поскольку ответвительные коробки могут безопасно присоединяться под напряжением

Распределительные шинопроводы применяются также при вертикальном распределении в виде стояков 100-500А в высотных зданиях.

■ Осветительные шинопроводы

Осветительные цепи могут питаться с помощью двух типов шинопроводов в зависимости от необходимости подвешивания к ним осветительного прибора.

□ Шинопроводы, рассчитанные на подвешивание светильников

Эти шинопроводы служат для запитки и крепления осветительных приборов (промышленные отражатели, разрядные лампы и т.д.) Они используются в производственных зданиях, супермаркетах, универсамах и складских помещениях. Шинопроводы характеризуются высокой жесткостью и рассчитаны на одну или две цепи 25А или 40А. Они имеют ответвления с интервалом 0,5-1 м.

□ Шинопроводы, не рассчитанные на подвешивание светильников

Эти шинопроводы служат для питания осветительных приборов всех типов, закрепляемых на конструкциях здания. Они используются в коммерческих зданиях (офисы, магазины, рестораны, гостиницы и т.д.), особенно в фальш-потолках. Это гибкий шинопровод, рассчитанный на одну цепь 20А. Он имеет ответвления с интервалом 1,2-3 м.

Шинопроводы удовлетворяют требованиям многих зданий:

- Производственные здания: гаражи, цеха, фермы, центры МТО и т.д.
- Коммерческие объекты: склады, торговые пассажи, супермаркеты, гостиницы и т.д.
- Здания сферы услуг: офисы, школы, больницы, спортзалы, круизные лайнеры и т.д.

### Нормы

Шинопроводы должны удовлетворять всем требованиям, указанным в стандарте МЭК 439-2. Этот стандарт определяет производственные условия, которые необходимо учитывать при проектировании шинопроводов (например: повышение температуры, стойкость к короткому замыканию, механическая прочность и т.д.), а также методы испытаний для их проверки. Стандарт МЭК 439-2 определяет 13 обязательных типовых испытаний конфигураций или компонентов системы.

Сборка компонентов системы на объекте в соответствии со сборочными инструкциями обеспечивает подрядчику соответствие стандарту.

### Преимущества шинопроводов

#### Гибкость

- Легкость изменения конфигурации (изменение на объекте для изменения конфигурации производственной линии или расширение производственных участков)
- Повторное использование компонентов (без повреждений): при изменении установки можно легко разобрать шинопровод и использовать его повторно
- Эксплуатационная готовность установки (возможность использовать ответвления с интервалом 1 м)
- Широкий выбор ответвительных коробок.

Простота

- Проектирование может осуществляться независимо от распределения и расположения ЭП.
- Характеристики не зависят от условий реализации: использование кабелей требует учета ряда коэффициентов снижения номинальных параметров.
- Четкая схема распределения
- Сокращение времени монтажа: шинопроводы обеспечивают сокращение времени монтажа на 50% в сравнении с традиционными кабельными системами.
- Гарантия изготовителя.
- Контролируемые сроки монтажа: использование шинопроводов гарантирует отсутствие «сюрпризов» при монтаже. Сроки монтажа известны заранее. С помощью такого приспособляемого и расширяемого оборудования можно быстро решить любые проблемы.
- Легкость установки модульных компонентов – их можно легко, просто и быстро подсоединить.

Надежность

- Надежность гарантируется заводской сборкой
- Безопасные в обращении блоки
- Последовательная сборка компонентов и ответвительных коробок делает невозможным совершение каких-либо ошибок

Бесперебойность питания

- Большое число ответвлений позволяет легко запитывать новые ЭП. Быстрое и полностью безопасное присоединение и отсоединение даже под напряжением. Возможность расширения или изменения без остановки работы.
- Быстрое и простое обнаружение повреждений, поскольку ЭЛ расположены около линии
- Техобслуживание не требуется или сведено к минимуму

Основной вклад в устойчивое развитие

- Шинопроводы позволяют объединять цепи. В сравнении с традиционной кабельной распределительной системой, расход проводниковых материалов и изоляторов сокращается в 3 раза (см. Рис. E39).
- Повторно используемое устройство с полной утилизацией всех его компонентов
- Не содержит ПВХ и не генерирует токсичных газов или отходов.
- Снижение рисков воздействия электромагнитных полей.

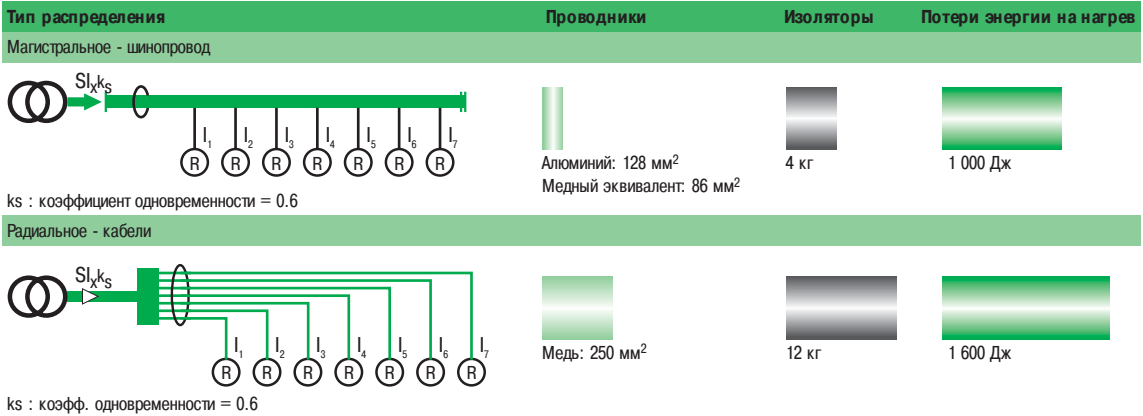


Рис. E39 : Пример: сравнение Canalis KS 250 A, 30 м, с 4-жильными кабелями 25 A

Новые функциональные характеристики Canalis

- Шинопроводы становятся еще лучше. Некоторые новые характеристики:
- Улучшенные параметры – степень защиты IP55 и номинальный ток 160-1000A (Ks).
  - Новые лампы в сборе с кабелями и новые осветительные каналы.
  - Новые крепежные приспособления: Системы быстрого крепления, кабелепроводы, общая прокладка с цепями "VDI" (речь, данные, изображения).

## 2 Система установки

Шинопроводы идеально вписываются в окружающую обстановку:

- белого цвета для улучшения рабочей среды, естественное сочетание с другими устройствами распределительной сети
- соответствие европейским нормам по снижению содержания опасных материалов (RoHS).

### Примеры шинопроводов Canalis



Рис. E40 : Гибкий шинопровод, не рассчитанный на крепление осветительной арматуры: Canalis KDP (20 A)



Рис. E41 : Жесткий шинопровод, рассчитанный на крепление осветительной арматуры: Canalis KBA или KBB (25 и 40 A)

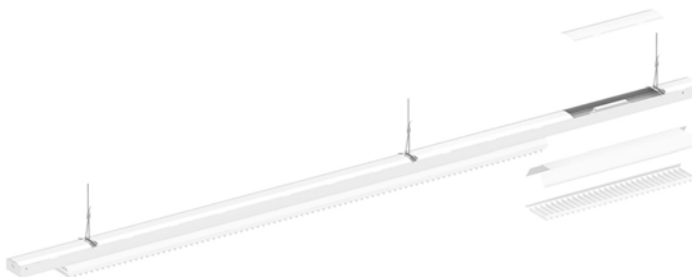


Рис. E42 : Осветительный шинопровод: Canalis KBX (25 A)

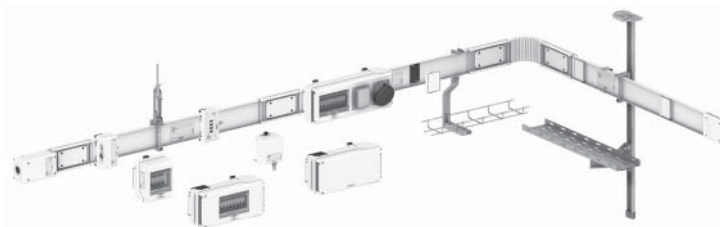
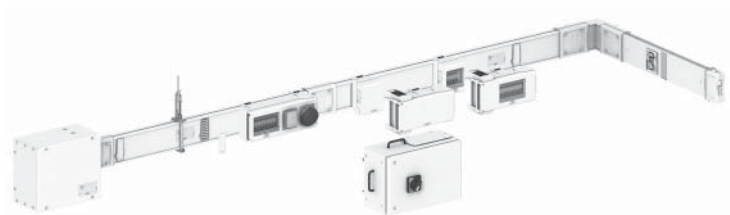


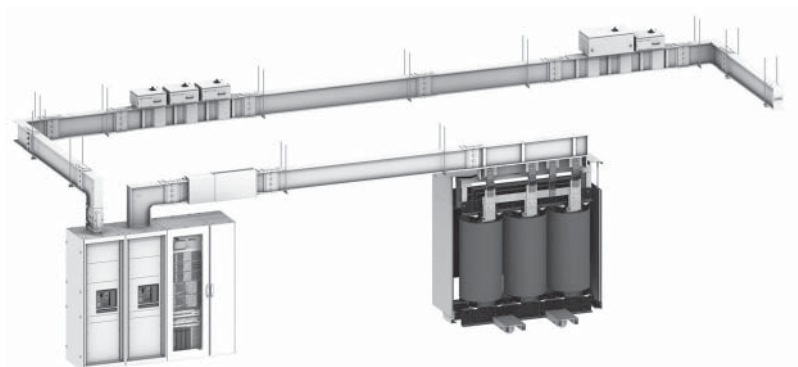
Рис. E43 : Шинопровод для распределения мощности: Canalis KN (50 - 160 A)

E23





**Рис. E44** : Шинопровод для распределения мощности: Canalis KS (100 - 1000 A)



**Рис. E45** : Шинопровод для распределения высокой мощности: Canalis KT (1000 - 5000 A)

# 3 Внешние воздействия (МЭК 60364-5-51)

Внешние воздействия должны учитываться при выборе:

- соответствующих мер обеспечения безопасности персонала (в частности, на специальных объектах или электроустановках);
- характеристик электрооборудования, таких как степень защиты (IP), стойкость к механическим воздействиям (IK) и т.д.

При нескольких одновременно действующих внешних факторах, они могут оказывать независимое или взаимосвязанное воздействие и защита должна выбираться с учетом этого.

## 3.1 Определения и стандарты

Внешняя среда в каждой установке представляет различную степень риска:

- для людей;
- для оборудования электроустановки.

Поэтому внешние условия влияют на определение и выбор соответствующего оборудования и средств защиты людей.

Внешние условия называются внешними воздействиями. Многие национальные стандарты, касающиеся внешних воздействий, включают схему классификации, основанную на международном стандарте МЭК 60364-5-51.

## 3.2 Классификация

Каждый фактор внешнего воздействия обозначается кодом, включающим группу из двух прописных букв и цифры:

**Первая буква (А, В или С)**

- А = внешняя среда;
- В = эксплуатация;
- С = конструкция сооружения.

**Вторая буква**

Вторая буква описывает характер внешнего воздействия.

**Цифра**

Цифра обозначает класс каждого внешнего воздействия.

**Дополнительные символы (факультативные)**

Используются только в случае, если эффективная защита персонала превышает уровень, указываемый первым разрядом IP.

Если должна указываться только защита людей, два разряда кода IP заменяются символами «ХХ». Например: IP ХХВ.

**Пример:**

Например, код АС2 означает:

- А = окружающая среда;
- АС = отметка высоты;
- АС2 = отметка высоты > 2000 м.

## 3.3 Перечень внешних воздействий

**Рис. Е46** ниже взят из стандарта МЭК 60364-5-51, служащего в качестве справочного документа при необходимости получения подробной информации.

Код	Внешние воздействия			Требуемые характеристики оборудования
А – внешняя среда				
АА	Окружающая температура (°С)			
	Низкая	Высокая		
АА1	- 60 °С	+ 5 °С		Специально разработанное оборудование или соответствующие мероприятия
АА2	- 40 °С	+ 5 °С		
АА3	- 25 °С	+ 5 °С		
АА4	- 5° С	+ 40 °С		Нормальные (особые меры предосторожности в определенных случаях)
АА5	+ 5 °С	+ 40 °С		Нормальные
АА6	+ 5 °С	+ 60 °С		Специально разработанное оборудование или соответствующие мероприятия
АА7	- 25 °С	+ 55 °С		
АА8	- 50 °С	+ 40 °С		

**Рис. Е46:** Перечень внешних воздействий (из приложения А к стандарту МЭК 60364-5-51) (продолжение на следующей странице)

Код	Внешние воздействия					Требуемые характеристики оборудования	
А – внешняя среда							
AB	Влажность воздуха						
	Температура воздуха (°C)		Относительная влажность (%)		Абсолютная влажность (г/м³)		
	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	
AB1	- 60 °C	+ 5 °C	3	100	0.003	7	Необходимы соответствующие мероприятия
AB2	- 40 °C	+ 5 °C	10	100	0.1	7	
AB3	- 25 °C	+ 5 °C	10	100	0.5	7	
AB4	- 5 °C	+ 40 °C	5	95	1	29	Нормальные
AB5	+ 5 °C	+ 40 °C	5	85	1	25	Нормальные
AB6	+ 5 °C	+ 60 °C	10	100	1	35	Необходимы соответствующие мероприятия
AB7	- 25 °C	+ 55 °C	10	100	0.5	29	
AB8	- 50 °C	+ 40 °C	15	100	0.04	36	
AC	Высота						
AC1	≤ 2000 м						Нормальные
AC2	> 2000 м						Могут требоваться меры предосторожности (коэффициент понижения номинальных значений)
AD	Присутствие воды						
AD1	Пренебрежимо малый уровень		Открытое или незащищ. от атмосфер. воздействий оборуд.			IPX0	
AD2	Свободно падающие капли					IPX1 или IPX2	
AD3	Распыленная жидкость					IPX3	
AD4	Брызги					IPX4	
AD5	Струйное течение		Объекты, где регулярно используются водяные шланги			IPX5	
AD6	Волны		Береговые объекты (дамбы, береговые валы, пристани)			IPX6	
AD7	Погружение		Вода на уровне 150 мм выше наивысшей точки оборудования, но не более 1 м ниже поверхности			IPX7	
AD8	Под водой		Оборудование постоянно и полностью под водой IPX8				
AE	Посторонние твердые частицы						
			Минимальный размер		Пример		
AE1	Пренебрежимо малый уровень				IP0X		
AE2	Небольшие частицы		2.5 мм		Инструменты		
AE3	Малые частицы		1 мм		Провода		
AE4	Низкая концентрация пыли				IP5X, если проникновение пыли не нарушает работу		
AE5	Умеренная концентрация пыли				IP6X, если пыль не должна проникать в оборудование		
AE6	Высокая концентрация пыли				IP6X		
AF	Коррозионно-активные или загрязняющие вещества						
AF1	Пренебрежимо малый уровень					Нормальные	
AF2	Атмосфера					Согласно характеру вещества	
AF3	Периодич., случ. воздействие					Защита от коррозии	
AF4	Непрерывное воздействие					Оборудование специальной конструкции	
AG	Механические напряжения						
AG1	Низкие					Нормальные	
AG2	Средние					Согласно применимому стандарту или усиливающие материалы	
AG3	Высокие					Усиленная защита	
AH	Вибрации						
AN1	Низкие		Бытовые или аналогичные приборы			Нормальные	
AN2	Средние		Обычные производственные условия			Оборудование специальной конструкции или специальные мероприятия	
AN3	Сильные		Тяжелые производственные условия				
AJ	Другие факторы механического напряжения						
AK	Флора и/или образование плесени						
AN1	Неопасно					Нормальные	
AN2	Опасно						
AL	Присутствие представителей фауны						
AN1	Неопасно					Нормальные	
AN2	Опасно						
AM	Электромагнитные, электростатические или ионизирующие воздействия/низкочастотные электромагнитные явления/гармоники						
AM1	Гармоники, гармонические составляющие					См. применяемые стандарты МЭК	
AM2	Напряжение сигнализации						
AM3	Изменения амплитуды напряжения						
AM4	Несимметрия напряжений						
AM5	Изменение частоты сети						
AM6	Индукцированные напряжения низкой частоты						
AM7	Постоянный ток в сетях переменного тока						
AM8	Излучаемые электромагнитные поля						
AM9	Электростатическое поле						
AM21	Индукцированные колебательные напряжения или токи						

Рис. Е46: Перечень внешних воздействий (из приложения А к стандарту МЭК 60364-5-51) (продолжение на следующей странице)

### 3 Внешние воздействия (МЭК 60364-5-51)

Код	Внешние воздействия	Требуемые характеристики оборудования
A – Внешняя среда		
AM22	Передаваемые однонаправленные переходные процессы продолжит. порядка наносекунды	См. применяемые стандарты МЭК
AM23	Передаваемые однонаправленные переходные процессы продолжительностью порядка миллисекунды	
AM24	Переходные колебательные процессы	
AM25	Высокочастотные излучения	
AM31	Электростатические разряды	
AM41	Ионизация	
AN	Солнечная радиация	
AN1	Низкая	Нормальные
AN2	Средняя	
AN3	Высокая	
AP	Сейсмическое воздействие	
AP1	Пренебрежимо малы	Нормальные
AP2	Низкий уровень	
AP3	Средний уровень	
AP4	Высокий уровень	
AQ	Грозовые разряды	
AQ1	Пренебрежимо малы	Нормальные
AQ2	Непрямое воздействие	
AQ3	Прямое воздействие	
AR	Движение воздуха	
AQ1	Слабое	Нормальные
AQ2	Среднее	
AQ3	Сильное	
AS	Ветровая нагрузка	
AQ1	Низкая	Нормальные
AQ2	Средняя	
AQ3	Высокая	
B - Эксплуатация		
BA	Характеристика персонала	
BA1	Стандартный	Нормальные
BA2	Дети	
BA3	Инвалиды	
BA4	С подготовкой	
BA5	С квалификацией	
BB	Электрическое сопротивление человеческого тела	
BC	Воздействие электрического потенциала грунта при контакте	
BC1	Нет	Класс оборудования по МЭК61140
BC2	Редко	
BC3	Часто	
BC4	Постоянно	
BD	Условия эвакуации при аварии	
BD1	Низкая плотность размещения/легкий выход	Нормальные
BD2	Низкая плотность размещения/осложненный выход	
BD3	Высокая плотность размещения/легкий выход	
BD4	Высокая плотность размещения/осложненный выход	
BE	Характер обрабатываемых или хранимых материалов	
BE1	Не представляют значительной опасности	Нормальные
BE2	Риск пожара	
BE3	Риск взрыва	
BE4	Риск загрязнения	
C - Конструкция здания		
CA	Строительные материалы	
CA1	Негорючие	Нормальные
CA2	Горючие	
CB	Конструкция сооружения	
CB1	Пренебрежимо малые риски	Нормальные
CB2	Распространение пожара	
CB3	Подвижность	
CB4	Гибкая или неустойчивая	

Рис. E46: Перечень внешних воздействий (из приложения А к стандарту МЭК 60364-5-51) (продолжение)

E27

### 3.4 Защита закрытого оборудования: коды IP и IK

#### Определение кодов IP (см. рис. E47)

Степень защиты, обеспечиваемой корпусом, указывается кодом IP, рекомендованным в стандарте МЭК 60529.

Защита обеспечивается от следующих внешних воздействий:

- проникновение твердых частиц;
- защита от несанкционированного доступа к частям под напряжением;
- защита от проникновения пыли;
- защита от проникновения жидкостей.

**Примечание:** код IP применяется к электрооборудованию, рассчитанному на напряжения до 72,5 кВ включительно.

#### Элементы кода IP и их значение

Краткое описание элементов кода IP приводится в нижеследующей таблице (см. рис. E48).

Элемент	Цифры или буквы	Значение для защиты оборудования	Значение для защиты персонала
Символы кода	IP		
Первая цифра	0 1 2 3 4 5 6	<b>Защита от посторонних твердых частиц</b> (без защиты) Диаметр ≥ 50 мм Диаметр ≥ 12,5 мм Диаметр ≥ 2,5 мм Диаметр ≥ 1,0 мм Пылезащита Пыленепроницаемость	<b>Защита от доступа к опасным частям с помощью</b> (без защиты) Руки Пальцы Инструменты Проволока Проволока Проволока
Вторая цифра	0 1 2 3 4 5 6 7 8	<b>Защита от проникновения воды с вредными последствиями</b> (без защиты) Вертикально падающие капли Капли, падающие под углом 15° Брызги Всплески воды Струи воды Струи воды под большим напором Временное погружение Постоянное погружение	
Дополнительная (факультативная) буква	A B C D		<b>Защита от прикосновения к опасным частям</b> Тыльной стороной ладони Пальцами Инструментом Проволокой
Вспомогательная (факультативная) буква	H M S W	<b>Вспомогательная информация:</b> Высоковольтная аппаратура Перемещение при гидравлических испытаниях Неподвижное положение при гидравлических испытаниях Метеорологические условия	

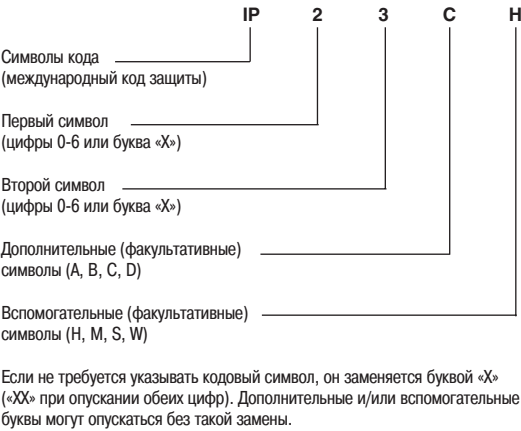


Рис. E47: Компонент кода IP

Рис. E48: Элементы кода IP

# 3 Внешние воздействия (МЭК 60364-5-51)

## Определение кода IK

Стандарт МЭК 62262 определяет код IK, характеризующий стойкость оборудования к механическим воздействиям (см. [рис. E49](#)).

Код IK	Энергия удара (Дж)	Код AG
00	0	
01	≤ 0.14	
02	≤ 0.20	AG1
03	≤ 0.35	
04	≤ 0.50	
05	≤ 0.70	
06	≤ 1	
07	≤ 2	AG2
08	≤ 5	AG3
09	≤ 10	
10	≤ 20	AG4

**Рис. E49:** Элементы кода IK

## Коды IP и IK для распределительных щитов

Степень защиты IP и IK, обеспечиваемая корпусом, должна указываться в зависимости от различных внешних воздействий, определенных в стандарте МЭК 60364-5-51, в частности:

- наличие твердых тел (код AE);
- наличие воды (код AD);
- механические напряжения (без кода);
- характеристика обслуживающего персонала (код BA).

Распределительные щиты Prisma Plus рассчитаны на установку внутри помещений.

Если иное не указывается в правилах, нормах и стандартах конкретной страны, компания Schneider Electric рекомендует следующие значения IP и IK (см. [рис. E50](#) и [рис. E51](#)):

### Рекомендуемые значения IP

Коды IP согласно условиям		
Нормальные условия без риска вертикал. падающей воды	Технические помещения	30
Нормальные условия с риском вертикал. падающей воды	Проходы	31
Крайне тяжелые условия с риском разбрызгивания воды со всех сторон (направлений)	Цеха	54/55

**Рис. E50:** Рекомендуемые значения IP

### Рекомендуемые значения IK

Коды IK согласно условиям		
Без риска значительных ударных нагрузок	Технические помещения	07
Большой риск значительных ударных нагрузок, которые могут привести к повреждению устройств	Проходы	08 (корпус с дверцей)
Максимальный риск ударных нагрузок, которые могут повредить корпус	Цеха	10

**Рис. E51:** Рекомендуемые значения IK

E29



## Глава F

# Защита от поражения электрическим током

	Содержание	
<b>1</b>	<b>Общие сведения</b>	<b>F2</b>
	1.1 Поражение электрическим током	F2
	1.2 Защита от поражения электрическим током	F3
	1.3 Прямое и косвенное прикосновения	F3
<b>2</b>	<b>Защита от прямого прикосновения</b>	<b>F4</b>
	2.1 Меры защиты от прямого прикосновения	F4
	2.2 Дополнительная мера защиты от прямого прикосновения	F5
<b>3</b>	<b>Защита от косвенного прикосновения</b>	<b>F6</b>
	3.1 Меры защиты посредством автоматического отключения питания	F6
	3.2 Автоматическое отключение в системе TT	F7
	3.3 Автоматическое отключение в системе TN	F8
	3.4 Автоматическое отключение питания при втором замыкании в системе IT	F10
	3.5 Меры защиты от прямого и косвенного прикосновений без автоматического отключения питания	F13
<b>4</b>	<b>Защита имущества от ущерба вследствие пробоя изоляции</b>	<b>F17</b>
	4.1 Меры защиты от опасности возгорания с помощью УЗО	F17
	4.2 Защита от замыканий на землю	F17
<b>5</b>	<b>Реализация системы TT</b>	<b>F19</b>
	5.1 Защитные меры	F19
	5.2 Координация устройств защиты от замыканий на землю	F20
<b>6</b>	<b>Реализация системы TN</b>	<b>F23</b>
	6.1 Предварительные условия	F23
	6.2 Защита от косвенного прикосновения	F23
	6.3 Высокочувствительные УЗО	F27
	6.4 Защита пожароопасных помещений	F28
	6.5 Защита при большом полном сопротивлении цепи замыкания на землю	F28
<b>7</b>	<b>Реализация системы IT</b>	<b>F29</b>
	7.1 Предварительные условия	F29
	7.2 Защита от косвенного прикосновения	F30
	7.3 УЗО с высокой чувствительностью	F34
	7.4 Защита пожароопасных помещений	F35
	7.5 Защита при большом полном сопротивлении цепи замыкания на землю	F35
<b>8</b>	<b>Устройства защитного отключения (УЗО)</b>	<b>F36</b>
	8.1 Типы УЗО	F36
	8.2 Описание	F37
	8.2 Чувствительность УЗО к помехам	F37

**F1**



Когда через часть тела человека проходит ток более 30 мА, этот человек оказывается в серьезной опасности, если этот ток не отключить в течение очень короткого времени.

Защита людей от поражения электрическим током в электроустановках низкого напряжения должна осуществляться согласно соответствующим национальным стандартам, нормативным правилам, официальным рекомендациям и циркулярам.

Соответствующие международные стандарты МЭК включают МЭК 60364, МЭК 60479, МЭК 61008, МЭК 61009 и МЭК 60947-2.

## 1.1 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током является патофизиологическим воздействием электрического тока, протекающего по телу человека.

Его протекание влияет в основном на мышечную, дыхательную функцию и функцию кровообращения и иногда приводит к серьезным ожогам. Степень опасности зависит от величины тока, от частей тела, через которые проходит ток, и длительности протекания тока.

В издании стандарта МЭК 60479-1 1994 года определены 4 зоны в координатах «ток - длительность» протекания, для каждой из которых описаны патофизиологические эффекты (рис. F1). Любой человек, оказывающийся в контакте с металлической частью, находящейся под напряжением, рискует получить поражение электрическим током.

Кривая C1 показывает, что если ток силой свыше 30 мА проходит по телу человека от одной руки к другой, то вероятнее всего этот человек погибнет, если ток не отключить в течение относительно короткого времени.

Точка 500 мс/100 мА рядом с кривой C1 соответствует вероятности фибрилляции сердца порядка 0.14%.

Защита людей от поражения электрическим током в электроустановках низкого напряжения должна обеспечиваться согласно соответствующим национальным стандартам, нормативным правилам, официальным рекомендациям и циркулярам. Соответствующие международные стандарты МЭК включают МЭК 60364, МЭК 60479, МЭК 61008, МЭК 61009 и МЭК 60947-2.

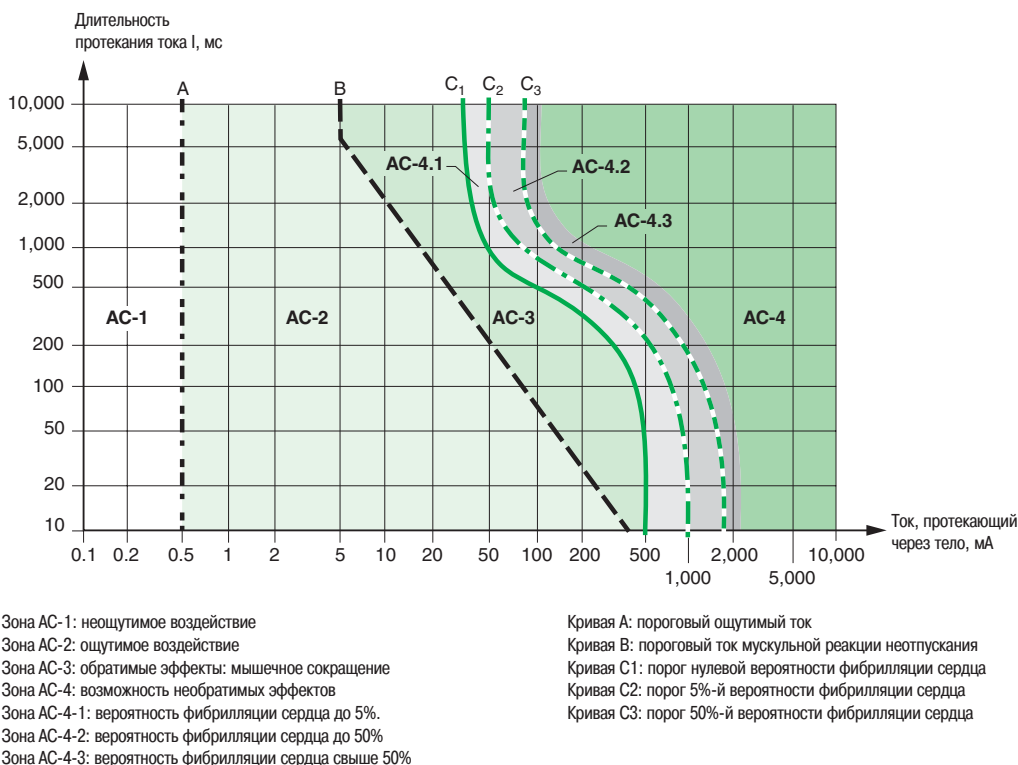


Рис. F1: Зоны воздействия протекания переменного тока через тело человека от его одной руки к другой в координатах «ток — длительность протекания»

## 1.2 Защита от поражения электрическим током

Основополагающее правило защиты от поражения электрическим током изложено в документе МЭК 61140, касающемся электрических установок и электрического оборудования.

Опасные части, находящиеся под напряжением, должны быть недоступны, а доступные проводящие части не должны оказываться под опасным напряжением.

Этот требование должно применяться при:

- нормальных условиях;
- одном коротком замыкании.

Защита при нормальных условиях соответствует защите от прямого прикосновения (базовая защита), а защита при одном коротком замыкании соответствует защите от косвенного прикосновения (защита от короткого замыкания).

Усиленные защитные меры предусматривают защиту для обоих условий.

## 1.3 Прямое и косвенное прикосновения

### Прямое прикосновение

Прямое прикосновение относится к человеку, оказавшемуся в контакте с проводником, который в нормальных условиях находится под напряжением (рис. F2).

В стандарте МЭК 61140 вместо термина «защита от прямого прикосновения» используется термин «базовая защита». Правда, первый термин сохранен, по крайней мере, для сведения.

### Косвенное прикосновение

Косвенное прикосновение относится к человеку, оказавшемуся в контакте с открытой проводящей частью, которая обычно не находится под напряжением, но которая случайно оказалась под напряжением (из-за повреждения изоляции или какой-то другой причины).

Ток короткого замыкания приводит к появлению на открытой проводящей части напряжения, которое может оказаться опасным в случае контакта человека с этой открытой проводящей частью и привести к протеканию через него тока прикосновения (рис. F3).

В стандарте МЭК 61140 вместо термина «защита от косвенного прикосновения» используется термин «защита от короткого замыкания». Правда, первый термин сохранен, по крайней мере, для сведения.

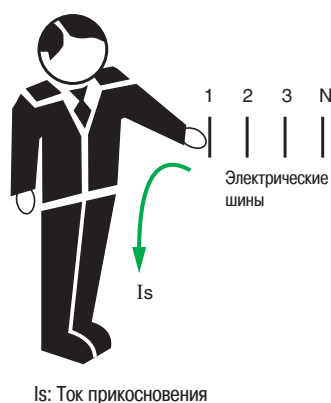


Рис. F2: Прямое прикосновение

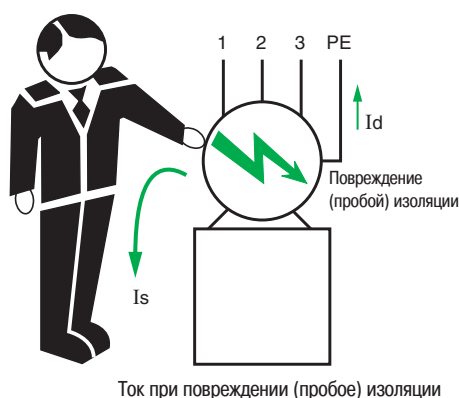


Рис. F3: Косвенное прикосновение

Для защиты от опасности прямого прикосновения обычно используются две взаимодополняющие меры:

- Физическое предотвращение прикосновения к токоведущим частям посредством ограждений, изоляции, размещения вне досягаемости и др.
- Дополнительная защита в случае, если происходит прямое прикосновение, несмотря на применение указанных выше мер или вследствие их отказа. Эта защита основана на использовании устройства защитного отключения (УЗО), обладающего высокой чувствительностью ( $I_{\Delta n} < 30 \text{ мА}$ ) и малым временем срабатывания. Такие устройства эффективны в большинстве случаев прямого прикосновения к токоведущим частям.

Международные (МЭК) и национальные стандарты часто различают два вида защиты:

- полная (изоляция, ограждения);
- частичная или специальная.

### 2.1 Меры защиты от прямого прикосновения

#### Защита посредством изоляции токоведущих частей

Такая защита состоит из изоляции, удовлетворяющей соответствующим стандартам (рис. F4). Краски, лаки и олифы не обеспечивают достаточной защиты от электрического поражения.

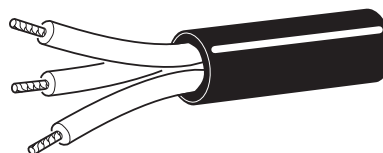


Рис. F4: Основная защита от прямого прикосновения посредством изоляции трехфазного кабеля наружной оболочкой

#### Защита посредством ограждений или оболочек

Эта мера широко используется, поскольку многие компоненты и материалы установлены в шкафах, узлах, панелях управления и распределительных щитах (рис. F5).

Чтобы рассматриваться в качестве эффективной защиты от прямого прикосновения, такие устройства должны обеспечивать уровень защиты эквивалентный, по крайней мере, IP 2X или IP XXB (см. главу E, подраздел 4.4).

Кроме того, вскрытие защитной оболочки (открытие двери, вскрытие передней панели, выдвижение ящика и др.) должно осуществляться только:

- с помощью ключа или специального инструмента, предусмотренного для этой цели;
- или после обесточивания токоведущих частей, защищенных данной оболочкой;
- или с автоматической установкой других промежуточных экранов, которые можно снять только при применении специального ключа или инструмента. Эта металлическая оболочка и все съемные защитные металлические экраны должны быть подсоединены к проводу защитного заземления соответствующей электроустановки.

#### Частичные меры защиты

- Защита посредством установки барьеров или размещения вне зоны досягаемости.

Такая защита предназначена только для тех мест, к которым имеет доступ только квалифицированный или проинструктированный персонал. Возведение такого защитного барьера подробно рассмотрено в стандарте МЭК 60364-4-41.

#### Специальные меры защиты

- Защита посредством использования безопасного сверхнизкого напряжения (БСНН) или ограничения энергии разряда.

Эти меры используются только в маломощных цепях и при особых обстоятельствах (см. раздел 3.5).



Рис. F5: Пример изоляции с помощью защитной оболочки

Дополнительной мерой защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям является использование устройств защитного отключения с минимальным током срабатывания, не превышающим 30 мА, которые называются УЗО с высокой чувствительностью.

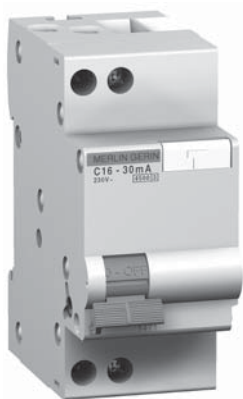


Рис. F6: УЗО с высокой чувствительностью

### 2.2 Дополнительная мера защиты от прямого прикосновения

Все предыдущие защитные меры являются предупредительными. Однако, как показал опыт, по разным причинам они не могут рассматриваться как надёжные. Среди таких причин можно указать следующие:

- отсутствие надлежащего обслуживания и ухода;
- неосторожность, невнимательность;
- обычный (или аномальный) износ изоляции, например, сгибание и истирание соединительных проводов;
- случайное прикосновение к токоведущим частям;
- погружение в воду и другая ситуация, в которой изоляция больше не является эффективной.

Для того, чтобы в таких обстоятельствах защитить пользователей, применяются высокочувствительные быстродействующие устройства защитного отключения (УЗО). Их действие основано на обнаружении дифференциальных токов утечки на землю (которые могут пойти или не пойти через человека или животное). Они автоматически и с достаточной быстротой отключают цепи питания, предотвращая тем самым нанесение человеку электротравмы, в том числе с летальным исходом (рис. F6).

Эти устройства работают на принципе измерения дифференциального тока: любая разность между током, входящим в цепь, и током, выходящим из нее (в системе питания от заземленного источника) будет уходить на землю или через поврежденную изоляцию или вследствие контакта заземленной части, например через тело человека, с проводом, находящимся под напряжением.

Стандартные устройства защитного отключения (УЗО), обладающие достаточной чувствительностью для защиты от прямого прикосновения, имеют номинальный дифференциальный ток срабатывания 30 мА.

В ряде стран эта дополнительная защита требуется для цепей питания штепсельных розеток, рассчитанных на ток 32 А и даже выше, если они установлены во влажных местах и/или на временных электроустановках (например, на строительной площадке).

В разделе 3 главы N перечисляются различные распространенные места, в которых применение высокочувствительных УЗО является обязательным (в некоторых странах), но в любом случае такие устройства рекомендуется использовать в качестве эффективной защиты от прямого и косвенного прикосновений.

### 3 Защита от косвенного прикосновения

Мерами защиты являются:

- автоматическое отключение питания (при первом или втором коротком замыкании в зависимости от типа системы заземления установки);
- специальные меры в зависимости от обстоятельств.

Открытые проводящие части, используемые в процессе изготовления электрического оборудования, изолируются от токоведущих частей этого оборудования посредством «базовой изоляции». В случае пробоя этой изоляции открытые проводящие части могут оказаться под напряжением.

Прикосновение к обычно обесточенной части электрического оборудования, оказавшейся под напряжением в результате повреждения его изоляции, называется косвенным прикосновением.

- Для защиты от косвенного прикосновения применяются различные меры, в частности:
- Автоматическое отключение подачи питания к присоединенному электрическому оборудованию.
  - Специальные меры, такие как использование:
    - изоляционных материалов класса II или изоляции эквивалентного уровня прочности;
    - изолированных (непроводящих) помещений, расположение оборудования вне досягаемости или применение барьеров;
    - систем (схем) уравнивания потенциалов;
    - гальванической развязки (электрического разделения) цепей с помощью разделяющих трансформаторов.

#### 3.1 Меры защиты посредством автоматического отключения питания

##### Принцип действия

Эта защитная мера предусматривает выполнение двух основных требований:

- заземление всех открытых проводящих частей электрооборудования в рассматриваемой электроустановке и создание системы уравнивания потенциалов;
  - автоматическое отключение питания от соответствующей секции электроустановки таким образом, чтобы требования безопасности в отношении времени отключения и напряжения прикосновения соблюдались при любом уровне напряжения прикосновения  $U_c^{(1)}$  (рис. F7).
- Чем больше величина  $U_c$ , тем выше должна быть скорость отключения питания для обеспечения защиты (рис. F8). Максимальное значение напряжения прикосновения  $U_c$ , которое человек может безопасно выдерживать бесконечно долго, составляет 50 В переменного тока.

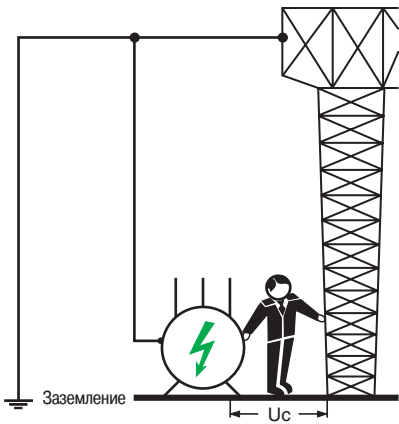


Рис. F7: Иллюстрация напряжения прикосновения  $U_c$

##### Максимально допустимое время отключения

$U_0$ , В	$50 < U_0 \leq 120$	$120 < U_0 \leq 230$	$230 < U_0 \leq 400$	$U_0 > 400$
Система TN или IT	0.8	0.4	0.2	0.1
TT	0.3	0.2	0.07	0.04

Рис. F8: Максимально допустимая длительность действия напряжения прикосновения переменного тока

(1) Напряжение прикосновения  $U_c$  - напряжение между двумя проводящими частями и между проводящей частью и землей при одновременном прикосновении к ним человека или животного.

## 3.2 Автоматическое отключение в системе TT

Автоматическое отключение для системы TT достигается применением УЗО, имеющим

$$\text{чувствительность } I_{\Delta n} \leq \frac{50}{R_A},$$

где  $R_A$  – сопротивление заземлителя электроустановки,  $I_{\Delta n}$  – дифференциальный ток срабатывания УЗО.

### Принцип действия

В этой системе все открытые проводящие части электроустановки и сторонние проводящие части должны быть обязательно подсоединены к общему заземлителю. Нейтральная точка источника питания обычно заземляется в некотором месте, находящемся вне зоны влияния заземлителя электроустановки, но это необязательно. Сопротивление контура замыкания на землю состоит в основном из сопротивления двух заземлителей (т.е. заземлителей источника питания и электроустановки), соединенных последовательно, поэтому величина тока замыкания на землю обычно слишком мала, чтобы вызвать срабатывание реле максимального тока или плавких предохранителей, и использование УЗО является необходимым.

Данный принцип защиты применим и при использовании только одного общего заземлителя. Это может быть, например, в случае местной подстанции, расположенной в пределах территории размещения электроустановки, когда ограниченность пространства диктует необходимость применения системы заземления TN, но при этом не удается выполнить все остальные условия, налагаемые системой TN.

Защита посредством автоматического отключения питания в системе TT обеспечивается применением УЗО, имеющим чувствительность:

$$I_{\Delta n} \leq \frac{50}{R_A}$$

где:

$R_A$  – сопротивление заземлителя электроустановки;

$I_{\Delta n}$  – номинальный дифференциальный ток срабатывания УЗО.

Для случаев временного электроснабжения (строительных площадок и др.) и электроснабжения сельскохозяйственных предприятий и садоводческих участков вместо величины 50 В используется 25 В.

### Пример (рис. F9)

■ Сопротивление заземлителя нейтрали трансформаторной подстанции  $R_n = 10 \text{ Ом}$ .

■ Сопротивление заземлителя электроустановки  $R_A = 20 \text{ Ом}$ .

■ Ток замыкания на землю  $I_d = 7,7 \text{ А}$ .

■ Напряжение косвенного прикосновения  $U_t = I_d \times R_A = 154 \text{ В}$  и следовательно является опасным, но  $I_{\Delta n} = 50/20 = 2,5 \text{ А}$ , и поэтому стандартное УЗО (без выдержки времени) с номинальным током 300 мА сработает примерно за 30 мс (рис. F10) и устранил КЗ, в результате которого на открытой проводящей части возникает опасное напряжение.

$U_o^{(1)}$ (В)	T (с)
$50 < U_o \leq 120$	0.3
$120 < U_o \leq 230$	0.2
$230 < U_o \leq 400$	0.07
$U_o > 400$	0.04

(1)  $U_o$  – номинальное напряжение между фазой и землей

Рис. F10: Максимальное время отключения цепей конечных потребителей переменного тока, рассчитанных на ток не более 32 А

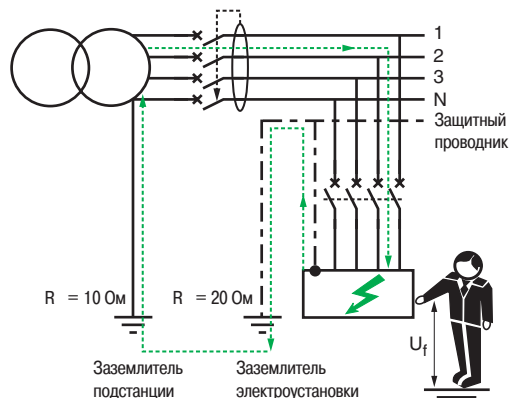


Рис. F9: Автоматическое отключение питания в системе TT

### Нормативное максимальное время отключения

Время отключения УЗО обычно меньше того, которое предусмотрено в большинстве национальных стандартов. Это облегчает их использование и позволяет применять эффективную селективную защиту.

Стандарт МЭК 60364-4-41 устанавливает максимальное время срабатывания защитных устройств, используемых в системе TT для защиты от косвенного прикосновения:

■ для всех цепей конечных потребителей с номинальным током не более 32 А максимальное время отключения не должно превышать значений, указанных на рис. F10;

■ для всех остальных цепей максимальное время отключения установлено равным 1 с. Эта величина обеспечивает селективность срабатывания нескольких УЗО, установленных в распределительных цепях. УЗО – общий термин для всех устройств, работающих на принципе дифференциальных (разностных) токов. Автоматический выключатель дифференциальных токов определен в стандартах МЭК 61008 как особый класс УЗО.

Время отключения и отключающие токи УЗО общего типа G (General) и УЗО типа S (Selective – селективное), включенных в стандарт МЭК 61008, приведены на рис. F11. Эти характеристики обеспечивают определенную степень селективного отключения при использовании нескольких УЗО с различными комбинациями номинальных значений и типов (это описано ниже в подразделе 4.3). Согласно стандарту МЭК 60947-2 промышленные УЗО обеспечивают больше возможностей селективного срабатывания благодаря регулировке времени выдержки.

$\times I_{\Delta n}$		1	2	5	> 5
Бытовые УЗО	Мгновенного действия	0.3	0.15	0.04	0.04
	Тип S	0.5	0.2	0.15	0.15
Промышлен- ные УЗО	Мгновенного действия	0.3	0.15	0.04	0.04
	Время выдержки (0,06 с)	0.5	0.2	0.15	0.15
	Время выдержки (другое)	Определяется изготовителем			

Рис. F11. Максимальное время срабатывания УЗО

### 3.3 Автоматическое отключение в системе TN

#### Принцип действия

В такой системе все открытые и проводящие части электроустановки и сторонние проводящие части должны быть присоединены к заземленной точке источника питания посредством защитных проводников.

Как отмечалось в подразделе 2.2 главы E, способ выполнения этого соединения зависит от того, какая система заземления используется TN (TN-C, TN-S, или TN-C-S). На рис. F12 показана реализация схемы TN-C, в которой нулевой рабочий провод используется в качестве защитного и нулевого проводника (PEN). Во всех системах TN пробой изоляции на землю приводит к замыканию фазы на нейтраль. Большие уровни токов КЗ позволяют использовать максимальную токовую защиту, но могут приводить к появлению в месте пробоя изоляции напряжений прикосновения, превышающих 50% напряжения между фазой и нейтралью в течение короткого времени отключения. На практике в энергосети общего пользования заземлители обычно устанавливаются через равные интервалы по длине защитного проводника (PE или PEN) этой сети, а от потребителя часто требуется установить заземлитель на вводе.

На больших электроустановках часто предусматриваются дополнительные заземлители, рассредоточенные по территории, с тем, чтобы максимально снизить напряжение прикосновения. В многоэтажных жилых зданиях на каждом уровне все сторонние проводящие части подсоединяются к защитному проводнику на каждом этаже. Чтобы обеспечить адекватную защиту, ток замыкания на землю:

$$I_d = \frac{U_0}{Z_s} \text{ или } 0.8 \frac{U_0}{Z_c} \geq I_a, \text{ где}$$

- $U_0$  = номинальное напряжение между фазой и нейтралью;
- $I_d$  = ток замыкания;
- $I_a$  = ток, равный величине, необходимой для срабатывания устройства защиты в нормативное время;
- $Z_s$  = полное сопротивление цепи замыкания на землю (петли фаза-ноль), равное сумме сопротивлений источника питания, токоведущих фазных проводников до места КЗ, защитных проводников от места КЗ к источнику питания;
- $Z_c$  = полное сопротивление неисправной цепи (см. «Традиционный метод» в подразделе 6.2).

**Примечание:** Обратный путь через заземляющие электроды до источника питания, включая заземлители, будет обычно иметь гораздо более высокие значения сопротивления, чем указанные выше, и его нет необходимости учитывать.

**Пример** (см. рис. F12)

Напряжение косвенного прикосновения  $U_f = \frac{230}{2} = 115$  В и является опасным.

Сопротивление цепи замыкания  $Z_s = Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{DE} + Z_{EN} + Z_{NA}$ .

Если  $Z_{BC}$  и  $Z_{DE}$  значительно превышают остальные члены, то:

$$Z_s = 2\rho \frac{L}{S} = 64.3 \text{ мОм, поэтому}$$

$$I_d = \frac{230}{64.3 \times 10^{-3}} = 3,576 \text{ кА (} I_d = 22I_n \text{ при использовании автоматического выключателя NS 160).}$$

Уставка на мгновенное действие отключающего электромагнитного расцепителя, входящего в состав автоматического выключателя, во много раз меньше этой величины тока замыкания, поэтому гарантируется безотказное срабатывание за минимально возможное время.

**Примечание:** некоторые регламентирующие органы используют в таких расчетах допущение о том, что на участке такой цепи BANE происходит падение напряжения до 20%.

Этот рекомендуемый метод поясняется в подразделе 6.2 главы F «Традиционный метод» и при его использовании в данном примере оцениваемая величина тока замыкания составит:

$$\frac{230 \times 0.8 \times 10^3}{64.3} = 2,816 \text{ кА (18} I_n \text{).}$$

F8

Автоматическое отключение для системы TN осуществляется устройствами максимальной токовой защиты или устройствами защитного отключения, реагирующими на дифференциальные токи.

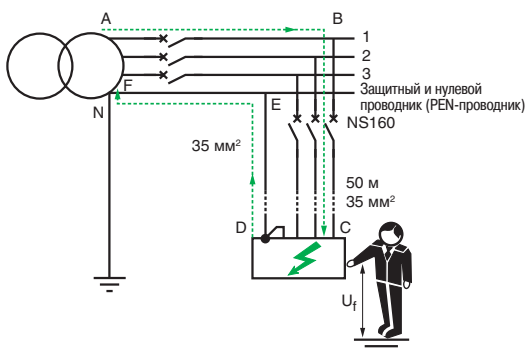


Рис. F12: Автоматическое отключение в системе TN



### 3 Защита от косвенного прикосновения

#### Нормативное максимальное время отключения

Стандарт МЭК 60364-4-41 устанавливает максимальное время срабатывания защитных устройств, используемых в системах TN для защиты от косвенного прикосновения:

- Для всех цепей конечных потребителей с номинальным током не более 32 А максимальное время отключения цепи не должно превышать величин, указанных на **рис. F13**.
- Для всех остальных цепей максимальное время отключения устанавливается равным 5 с. Эта величина обеспечивает селективность срабатывания защитных устройств, установленных в распределительных цепях.

**Примечание:** в системах заземления TN использование УЗО может оказаться необходимым. Применение УЗО в системах TN-C-S означает, что на участке цепи, расположенном ниже УЗО, защитный проводник и нулевой проводник должны быть разделены. Такое разделение обычно делается на вводе.

$U_o^{(1)}$ (В)	T (с)
$50 < U_o < 120$	0.8
$120 < U_o < 230$	0.4
$230 < U_o < 400$	0.2
$U_o > 400$	0.1

(1)  $U_o$  - номинальное напряжение между фазой и землей.

**Рис. F13:** Максимальное время отключения цепей конечных потребителей переменного тока, рассчитанных на ток не более 32 А

Если защита должна обеспечиваться автоматическим выключателем, достаточно удостовериться в том, что ток замыкания будет всегда превышать величину уставки отключающего элемента (мгновенного действия или срабатывающего с выдержкой времени) по току срабатывания ( $I_m$ ).

Величина  $I_a$  может быть определена по время-токовой характеристике предохранителя. В любом случае, если сопротивление контура  $Z_s$  или  $Z_c$  превышает определенное значение, защита предохранителем не может быть выполнена.

#### Защита посредством автоматического выключателя (рис. F14)

Расцепитель автоматического выключателя мгновенного действия отключит короткое замыкание на землю в течение менее чем 0,1 с.

В результате этого будет всегда гарантировано автоматическое отключение питания в течение максимально допустимого времени, поскольку могут применяться все типы отключающих элементов (электромагнитные, электронные, мгновенного действия или действия с небольшой выдержкой):  $I_a = I_m$ . Всегда необходимо учитывать максимальный допуск, разрешенный соответствующим стандартом. Поэтому для того чтобы быть уверенным в том, что отключение произойдет в допустимое время, достаточно, чтобы ток короткого замыкания  $\frac{U_o}{Z_s}$  или  $0.8 \frac{U_o}{Z_c}$ , определенный расчетом (или посредством замеров на месте эксплуатации), превышал уставку по току расцепителя мгновенного действия или порог срабатывания расцепителя с короткой задержкой срабатывания.

#### Защита посредством плавких предохранителей (рис. F15)

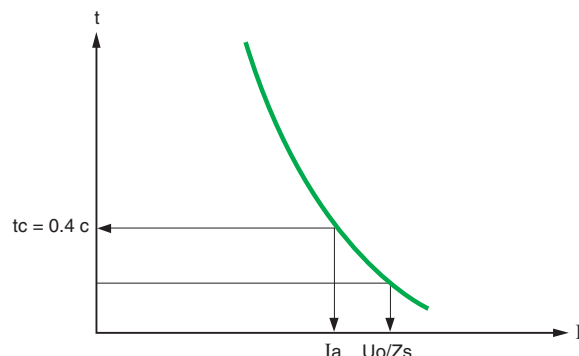
Величину тока  $I_a$  можно определить по время-токовой характеристике плавкого предохранителя. В любом случае, защита не может быть обеспечена, если полное сопротивление цепи  $Z_s$  или  $Z_c$  превышает определенное значение.

Величина тока, гарантирующая правильное срабатывание плавкого предохранителя, может быть определена по время-токовой кривой соответствующего предохранителя. Ток короткого замыкания

$\frac{U_o}{Z_s}$  или  $0.8 \frac{U_o}{Z_c}$ , определенный выше, должен значительно превосходить величину, необходимую для гарантированного срабатывания этого предохранителя. Как видно из **рис. F15**, это условие наблюдается, когда  $I_a < \frac{U_o}{Z_s}$  или  $0.8 \frac{U_o}{Z_c}$ .



**Рис. F14:** Отключение системы TN автоматическим выключателем



**Рис. F15:** Отключение системы TN плавкими предохранителями



**Пример:** номинальное фазное напряжение сети составляет 230 В, а максимальное время отключения, взятое из графика на рис. F15 – 0,4 с. По этому же графику можно определить соответствующую величину тока  $I_a$ . Используя величины напряжения (230 В) и тока  $I_a$ , полное сопротивление контура или сопротивление петли фаза-ноль могут быть определены из выражений .

$Z_s = \frac{230}{I_a}$  или  $Z_c = 0,8 \frac{230}{I_a}$  . Эта величина сопротивления не должна превышать и для обеспечения успешного срабатывания плавких предохранителей должна быть существенно меньше.

### Защита цепей TN-S посредством УЗО

Устройства защитного отключения должны применяться в тех случаях, когда:

- Нельзя определить сопротивление контура с достаточной точностью (трудно оценить длины проводников и наличие металлических предметов рядом с проводкой).
- Ток короткого замыкания настолько мал, что использование устройств максимальной токовой защиты не обеспечивает нормативного времени отключения.

Но этот ток всегда значительно превышает уставку УЗО (30 мА - 1 А).

На практике они часто устанавливаются на распределительных подстанциях низкого напряжения, и во многих странах автоматическое отключение цепей конечных потребителей осуществляется устройствами защитного отключения.

## 3.4 Автоматическое отключение при двойном замыкании (КЗ) в системе IT

При этом типе системы:

- Установка изолирована от земли или нейтральная точка источника питания заземлена через большое сопротивление.
- Все открытые и сторонние проводящие части присоединены к заземляющему устройству установки.

### Первое замыкание

При первом замыкании на землю ток повреждения крайне низкий, так что выполняется правило  $I_d \times R_A < 50 \text{ В}$  (см. F3.2) и не возникает опасных напряжений косвенного прикосновения.

На практике ток  $I_d$  мал и не представляет опасности для персонала или установки.

Однако, при этой системе:

- Необходимо обеспечить постоянный контроль изоляции установки, а также предупредительную сигнализацию (звуковую и/или мигающие лампы и т.д.), срабатывающую при первом замыкании на землю (см. Рис. F16).
- Необходимо , по возможности быстро найти и устранить первое замыкания, чтобы в полной мере реализовать преимущества системы IT. Бесперебойность питания – это одно из основных преимуществ этой системы.

Для кабельной сети с хорошей изоляцией протяженностью 1 км, сопротивление утечки на землю ( $Z_f$ ) является емкостным и составляет примерно 3500 Ом. Поэтому, при нормальном режиме работы емкостной тока землю составляет:

$$\frac{U_o}{Z_f} = \frac{230}{3,500} = 66 \text{ мА на фазу.}$$

При замыкании фазы на землю (см. **Рис. F17** на следующей странице) ток, проходящий через сопротивление электрода ( $R_{pA}$ ), является векторной суммой емкостных токов в двух неповрежденных фазах и нейтрали (если она распределена). Напряжения неповрежденных фаз повышаются до линейных, и емкостные токи увеличиваются соответственно. Эти токи смещены друг от друга на 60°; поэтому, их векторная сумма в этом примере равна  $3 \times 66 \text{ мА} = 198 \text{ мА}$ .

Следовательно, напряжение косвенного прикосновения ( $U_f$ ) равно  $198 \times 5 \times 10^{-3} = 0,99 \text{ В}$  и, очевидно, не представляет опасности.

Ток через замыкание на землю равен векторной сумме тока резистора нейтрали  $I_{d1}$  (153 мА) и емкостного тока  $I_{d2}$  (198 мА).

Поскольку открытые проводящие части установки соединены непосредственно с землей, полное сопротивление нейтрали ( $Z_{ct}$ ) практически не влияет на напряжение косвенного прикосновения относительно земли.



**Рис. F16:** Устройство контроля изоляции между фазами и землей обязательно для системы IT

(1) В этом примере активный ток утечки на землю через изоляцию полагается пренебрежимо малым.

### 3 Защита от косвенного прикосновения

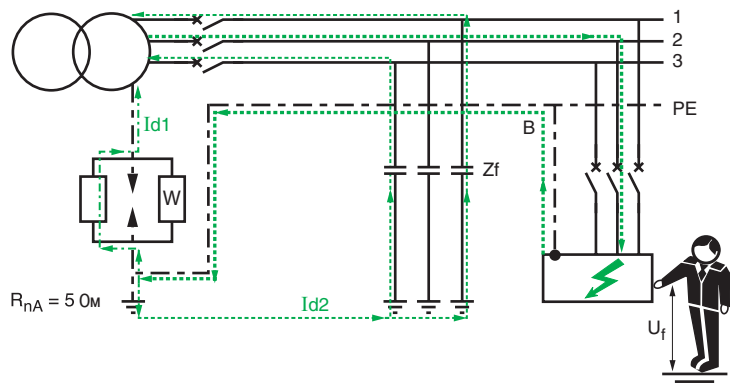


Рис. F17: Путь тока повреждения при первом замыкании в системе IT

F11

#### Двойное замыкание (КЗ)

Необходимо обеспечить быстрое отключение при возникновении второго замыкания (КЗ) на другой фазе или нейтрали. Отключение КЗ осуществляется разными способами в каждом из следующих случаев:

##### 1-й случай

Одновременное возникновение двух замыканий на землю (разных фаз) представляет опасность; их быстрое устранение посредством плавких предохранителей или выключателя зависит от типа схемы заземления и использования отдельных заземляющих электродов на установке

Все открытые проводящие части установки соединены с общим проводником PE (см. Рис. F18).

В этом случае ток повреждения не проходит через заземляющие устройства. Поэтому, имеет место высокий уровень тока и используются традиционные устройства защиты максимального тока (например, выключатели и плавкие предохранители).

Первое замыкание может возникнуть в конце цепи в удаленной части установки, а второе повреждение – на противоположном конце установки.

По этой причине принято удваивать полное сопротивление цепи при расчете тока КЗ для проверки чувствительности устройств защиты максимального тока.

Если система включает нейтраль в дополнение к 3 фазным проводникам, минимальные токи КЗ возникают, когда одним из двух повреждений является замыкание нейтрали на землю (в схеме IT все четыре проводника изолированы от земли). Поэтому, в 4-проводных системах IT для расчета тока

КЗ должно использоваться фазное напряжение, например,  $0,8 \frac{U_0}{2 Z_c} \geq I_a^{(1)}$ , где:

$U_0$  = напряжение между фазой и нейтралью

$Z_c$  = полное сопротивление контура КЗ (см. F3.3)

$I_a$  = уровень тока уставки на отключение

Если нейтральный провод не распределен по сети, то для расчета тока повреждения следует

использовать линейное напряжение, например,  $0,8 \frac{\sqrt{3} U_0}{2 Z_c} \geq I_a^{(1)}$

##### ■ Максимальное время отключения

Нормативное время отключения для системы IT зависит от схемы соединения заземляющих электродов установки и подстанции.

Для конечных цепей, питающих электрооборудование с номинальным током не выше 32А и открытыми проводящими частями, соединенными с заземляющим электродом подстанции, максимальное время отключения приводится в Таблице F8. Для других цепей той же группы с соединенными открытыми проводящими частями, максимальное время отключения составляет 5 с, поскольку любое двойное замыкание в этой группе приводит к току КЗ как в системе TN.

Для конечных цепей, питающих электрооборудование с номинальным током не выше 32А и открытыми проводящими частями, соединенными с заземляющим устройством, обособленным от заземляющего устройства подстанции, максимальное время отключения приводится в Таблице F13. Для других цепей той же группы несоединенных открытых проводящих частей, максимальное время отключения составляет 1 с. Это объясняется тем, что любое замыкание на землю в этой группе одновременно с замыканием на землю в другой группе вызывает ток, ограниченный сопротивлениями заземляющих устройств, как в системе TT.

(1) На основе "традиционного метода", указанного в первом примере п.3.3.



### 3 Защита от косвенного прикосновения

Это требуется в силу того, что корпуса отдельных групп соединены через землю. Поэтому, междофазный ток КЗ ограничивается при прохождении через заземление за счет сопротивлений контакта электродов с землей, что делает ненадежной защиту максимального тока. Поэтому, необходимо использовать более чувствительные УЗО. Однако, при этом ток срабатывания УЗО должен превышать ток, возникающий при первом замыкании (см. **Рис. F19**).

Суммарная длина кабелей, км	Ток первого замыкания, А
1	0.07
5	0.36
30	2.17

Рис. F19: Зависимость между длиной кабелей и током первого замыкания

При двойном замыкании (КЗ), возникающем в группе, имеющей общее заземляющее устройство, защита максимального тока работает, как описывается выше для случая 1.

**Примечание 1:** См. также Главу G, п.7.2, защита нейтрали.

**Примечание 2:** В случае 3-фазных 4-проводных установок, для защиты от сверхтоков в одножильном нейтральном проводнике иногда удобнее использовать кольцевой трансформатор тока (см. **Рис. F20**).

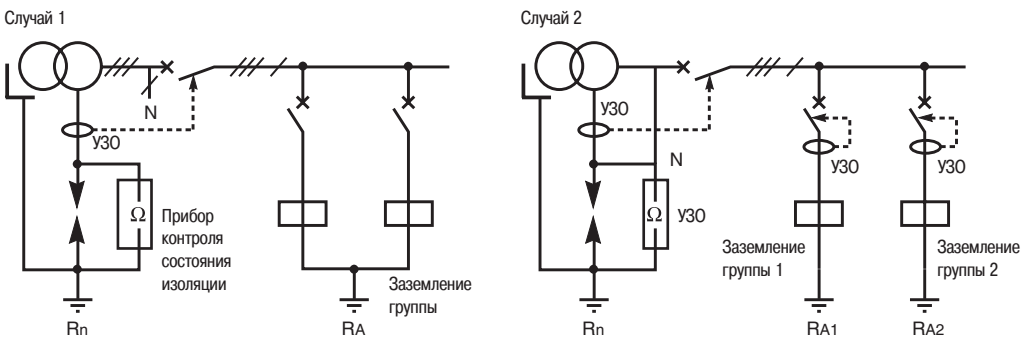


Рис. F20: Применение устройств УЗО, когда открытые проводящие части заземлены отдельно или по группам по схеме IT

Сверхнизкое напряжение используется там, где есть большие риски поражения электрическим током: плавательные бассейны, переносные лампы и другие переносные бытовые электроприборы для использования вне помещений.

#### 3.5 Меры защиты от прямого или косвенного прикосновений без автоматического отключения питания

##### Применение системы БСНН (безопасного сверхнизкого напряжения)

Системы БСНН применяются в тех случаях, когда эксплуатация электрического оборудования представляет серьезную опасность (плавательные бассейны, парки с аттракционами и т.д.) Данная мера основана на подаче питания сверхнизкого напряжения от вторичных обмоток изолирующих (разделительных) трансформаторов, специально разработанных в соответствии с национальными или международным (МЭК 60742) стандартами. Уровень импульсного напряжения, выдерживаемого изоляцией между первичной и вторичной обмотками, является очень высоким. Иногда между этими обмотками устанавливается заземленный металлический экран. Напряжение на вторичной обмотке никогда не превышает эффективного значения 50 В.

Три условия эксплуатации должны соблюдаться для того, чтобы обеспечить адекватную защиту от косвенного прикосновения:

- Токосоведущие проводники в системе БСНН не должны соединяться с землей
- Открытые проводящие части оборудования, питающегося от системы БСНН не должны соединяться с землей, другими открытыми проводящими частями или внешними проводящими частями.
- Все токосоведущие части цепей системы БСНН и других цепей более высокого напряжения должны быть разделены расстоянием, равным, по крайней мере, расстоянию между первичной и вторичной обмотками безопасного разделяющего трансформатора.

Эти меры требуют того, чтобы:

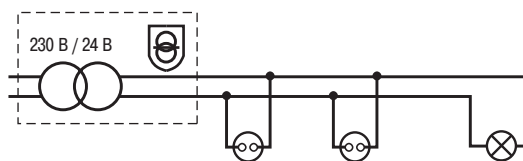
- В цепях системы БСНН использовались проводники, предусмотренные исключительно для них, если только в этих цепях не используются кабели, изолированные с учетом наивысшего напряжения других цепей.
- Штепсельные розетки для системы БСНН не имели заземляющего контакта. Вилки и розетки для системы БСНН должны быть специальными, с тем, чтобы исключить возможность непреднамеренного подключения к другому уровню напряжения.

**Примечание:** в нормальных условиях, когда БСНН менее 25 В, нет необходимости предусматривать защиту от прямого прикосновения. Конкретные требования рассмотрены в главе N, раздел 3 «Специальные места».

### Использование ЗСНН (заземленной цепи системы БСНН) (рис. F21)

Система ЗСНН предназначена для общего применения там, где низкое напряжение необходимо или предпочтительно по причинам безопасности, за исключением мест повышенного риска, указанных выше. По концепции она аналогична системе БСНН за исключением того, что вторичная цепь заземлена в одной точке.

Стандартом МЭК 60364-4-41 точно определены особенности и преимущества применения системы ЗСНН. Защита от прямого прикосновения обычно не требуется, если электрооборудование находится в зоне действия системы уравнивания потенциалов, и номинальное напряжение не превышает 25 В переменного тока при условии, что оборудование нормально эксплуатируется только в сухих помещениях, и где ожидается большая площадь контакта человеческого тела с частями, могущими оказаться под напряжением. Во всех остальных случаях, когда не предусмотрена защита от прямого прикосновения, максимально допустимым напряжением является 6 В переменного тока.



**Рис. F21:** Поддача низкого напряжения от безопасного разделяющего трансформатора

### Система ФСНН (функционального сверхнизкого напряжения)

В тех случаях, когда по условиям эксплуатации (функционирования) электроустановки используется напряжение 50 В или менее, и при этом выполняются не все требования, касающиеся применения систем БСНН и ЗСНН, то для обеспечения защиты от прямого и косвенного прикосновений должны применяться соответствующие меры, описанные в стандарте МЭК 60364-4-41, с учетом местоположения и использования этих цепей.

**Примечание:** такие условия могут, например, иметь место, когда цепь содержит оборудование, недостаточно изолированное относительно цепей с более высоким напряжением (трансформаторы, реле, дистанционные переключатели, контакторы и т.п.).

### Электрическое разделение цепей (рис. F22)

Принцип электрического разделения цепей (обычно однофазных) для целей безопасности базируется на следующих соображениях.

Два проводника от незаземленной однофазной вторичной обмотки разделяющего трансформатора изолируются от земли.

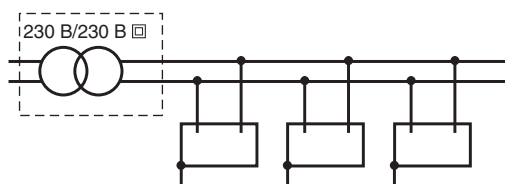
Если произошло прямое прикосновение к одному проводнику, то через человека, совершившего это, протечет лишь небольшой ток через землю и обратно к другому проводнику через свойственную этому проводнику емкость относительно земли. Поскольку емкость проводника относительно земли очень мала, то ток обычно ниже уровня ощущения. С увеличением длины кабеля цепи ток прямого прикосновения будет постепенно возрастать до величины, при которой произойдет опасное поражение электрическим током.

Даже если короткая длина кабеля предотвращает какую-либо опасность от емкостного тока, низкая величина сопротивления изоляции относительно земли может привести к опасности, поскольку в этом случае ток пройдет через человека, коснувшегося токоведущей части, землю и обратно к другому проводнику через низкое сопротивление изоляции этого проводника относительно земли.

По этим причинам в системах разделения необходимо использовать относительно короткие хорошо изолированные кабели.

Специально для этой цели были разработаны трансформаторы с высокой степенью изоляции между первичной и вторичной обмотками или с эквивалентной защитой, например, с заземленным металлическим экраном, установленным между этими обмотками. Конструкция такого трансформатора соответствует требованиям изоляции класса II.

Электрическое разделение цепей применяется для относительно небольших длин кабелей и высоких уровней сопротивления изоляции. Его предпочтительно использовать для индивидуального электроприбора.



**Рис. F22:** Безопасное питание от разделяющего трансформатора класса II

### 3 Защита от косвенного прикосновения

Как указывалось выше, для успешной реализации этого принципа требуется, чтобы:

- Ни один проводник или открытая проводящая часть вторичной цепи не были соединены с землей.
- Длина кабелей, подключенных к вторичной обмотке, должна быть ограничена во избежание больших значений емкости<sup>1</sup>.
- Было обеспечено большое сопротивление изоляции кабелей и бытовых электроприборов. Эти условия обычно ограничивают применение этой меры безопасности отдельным бытовым электроприбором.

В случае, когда от разделяющего трансформатора питаются несколько электроприборов, необходимо следить за соблюдением следующих требований:

- Открытые проводящие части всех электроприборов должны быть соединены изолированным защитным проводником, но не соединены с землей.
- Штепсельные розетки должны иметь защитный (заземляющий) контакт. Такой защитный контакт используется в этом случае только для того, чтобы обеспечить соединение между собой всех открытых проводящих частей.

В случае второго короткого замыкания максимальная защита от сверхтока должна обеспечить автоматическое отключение в тех же условиях, которые требуются для заземления энергосистемы по схеме IT.

#### Оборудование класса II

Такие бытовые электроприборы также называются электроприборами с «двойной изоляцией», поскольку в бытовых электроприборах класса II помимо основной изоляции используется дополнительная изоляция (рис. F23). Открытые проводящие части бытового электроприбора класса II не должны соединяться с защитным проводником:

- Большая часть переносного или полустационарного оборудования, определенные лампы и некоторые типы трансформаторов проектируются с двойной изоляцией. Важно соблюдать особую осторожность при использовании оборудования класса II и регулярно или достаточно часто проверять выполнение требований класса II (отсутствие повреждений внешней оболочки и др.). Электронные устройства, радио и телеприемники имеют уровни электробезопасности, эквивалентные классу II, но формально они не относятся к электроприборам класса II.
- Дополнительная изоляция электроустановок: более подробно необходимые меры для обеспечения дополнительной изоляции в процессе монтажа электроустановок описаны в стандарте МЭК 60364-4-41 (подпункт 413-2) и в некоторых национальных стандартах, например во французском стандарте NF C 15-100.

Простым примером является размещение кабеля в ПВХ (поливинилхлоридных) трубах. Описаны также способы изоляции для распределительных щитов.

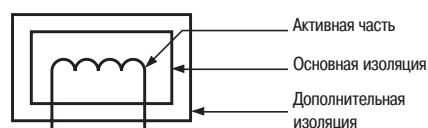


Рис. F23: Принцип обеспечения изоляции класса II

- Для распределительных щитов и аналогичного оборудования, в стандарте МЭК 60439-1 изложен перечень требований к так называемой «полной изоляции», эквивалентной классу I.
- Во многих национальных стандартах некоторые кабели рассматриваются как эквивалентные классу II.

#### Размещение вне зоны досягаемости или установка барьеров

С помощью этих средств можно достичь крайне низкой вероятности прикосновения к открытой проводящей части, находящейся под напряжением, при одновременном касании сторонней проводящей части, находящейся под потенциалом земли (рис. F24). На практике эта мера может применяться лишь в сухих помещениях и реализуется при соблюдении следующих условий:

- Пол и стена помещения должны быть непроводящими, т.е. в любой точке сопротивление относительно земли должно быть:
  - > 50 кОм (напряжение электроустановки ≤ 500 В);
  - > 100 кОм (500 В < напряжение электроустановки ≤ 1000 В).

Сопротивление измеряется с помощью приборов типа мегомметр (ручной генератор или электронный прибор с аккумуляторным питанием) между электродом, размещенным на полу или приставленным к стене, и землей (т.е. ближайшим защитным заземлителем). Давление на контрольную площадь электрода должно быть одинаковым при всех испытаниях.

Различные производители измерительных приборов предлагают специальные электроды для своих собственных приборов, поэтому необходимо обращать внимание на то, чтобы используемые электроды соответствовали тем, которые входят в комплект данного измерительного прибора

Условное обозначение:



В принципе, обеспечение электробезопасности посредством размещения проводящих частей, к которым возможен одновременный доступ, вне зоны досягаемости или установки ограждающих барьеров требует также непроводящего пола и поэтому является непростой задачей.

(1) В стандарте МЭК 364-4-41 рекомендуется, чтобы произведение номинального напряжения цепи в вольтах и длины проводки в метрах не превышало 100000, и чтобы длина проводки не превышала 500 м.

## 3 Защита от косвенного прикосновения

- Размещение оборудования и барьеров должно быть таким, чтобы исключалась возможность прикосновения человека одновременно к двум открытым проводящим частям или к открытой проводящей части и внешней проводящей части.
- Открытый защитный проводник не должен вводиться в рассматриваемую камеру.
- Входы в такую камеру должны быть устроены так, чтобы входящие в нее люди не подвергались опасности. Например, человек, стоящий на проводящем полу за пределами этой камеры, не должен быть способен дотянуться через дверной проем до открытой проводящей части, допущен до выключателя освещения, установленного, например, в промышленной распределительной коробке.

F16

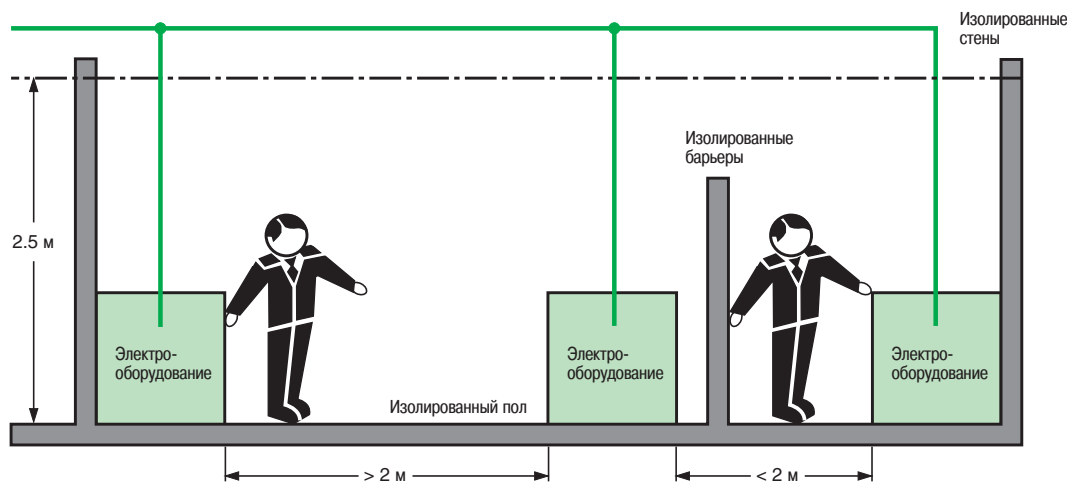


Рис. F24: Защита размещением вне зоны досягаемости и установкой непроводящих барьеров

Незаземленные эквипотенциальные камеры относят к специальным электроустановкам (лабораториям и др.) и их практическая реализация связана с рядом трудностей.

### Незаземлённые эквипотенциальные камеры

В такой схеме все открытые проводящие части, включая пол<sup>1</sup>, соединяются проводниками достаточно большого сечения с тем, чтобы не было значительного различия потенциалов между двумя точками. Пробой изоляции между токоведущей частью и металлическим корпусом электроприбора приведет к тому, что напряжение в этой «клетке» повысится до фазного напряжения, но ток короткого замыкания протекать не будет. В этих условиях человек, входящий в такую камеру, окажется в опасности (поскольку он ступит на пол, находящийся под напряжением). Для защиты персонала от такой опасности должны быть приняты соответствующие меры предосторожности (например, непроводящий пол на входе и др.). Кроме того, требуются специальные защитные устройства для обнаружения пробоя изоляции в случае отсутствия значительного тока замыкания.

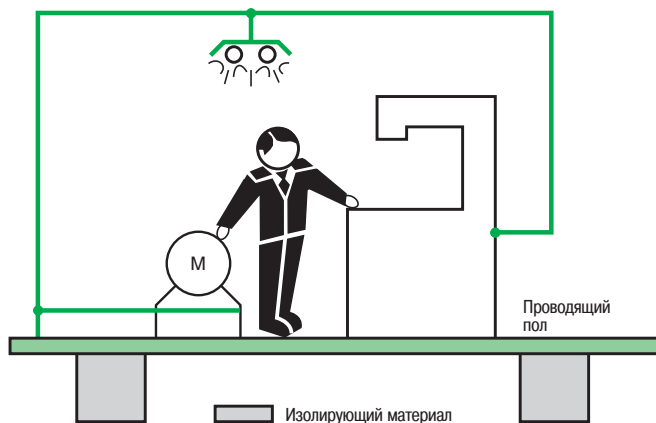


Рис. F25: Эквипотенциальное соединение всех одновременно достигаемых открытых проводящих частей

(1) Сторонние проводящие части, входящие в эквипотенциальное пространство (или выходящие из него), например, водопроводные трубы, должны быть заключены в соответствующий изоляционный материал и исключены из данной эквипотенциальной сети, поскольку где-то в другом месте данной электроустановки такие части могут быть соединены с защитными (заземленными) проводниками.



## 4 Защита имущества от ущерба вследствие пробоя изоляции

В существующих стандартах ущерб, который причиняется имуществу главным образом пожаром, вызванным пробоем изоляции, оценивается как значительный. Поэтому в местах с большой опасностью возгорания должны применяться УЗО с током срабатывания не выше 300 мА. Для других помещений некоторые стандарты рекомендуют использовать метод защиты от замыканий на землю.

### 4.1 Меры защиты от опасности возгорания с помощью УЗО

Устройства защитного отключения (УЗО) являются очень эффективными средствами защиты от опасности возгорания, вызванного пробоем изоляции. Они могут обнаружить токи утечки на землю (например, величиной 300 мА), которые слишком малы, чтобы их могли обнаружить другие средства защиты, но достаточны, чтобы вызвать пожар.

Устройства защитного отключения (УЗО) обеспечивают очень эффективную защиту от опасности возгорания, вызванного пробоем изоляции. Возникающий при этом ток утечки слишком мал, чтобы его могли обнаружить другие устройства защиты, например устройства максимальной токовой защиты.

Для систем TT, IT и TN-S, в которых может возникать ток утечки на землю, применение УЗО с чувствительностью 300 мА обеспечивает хорошую защиту от опасности возгорания, вызванного таким типом неисправности цепи.

Исследования показали, что стоимость ущерба от пожаров в зданиях промышленного и обслуживающего сектора может быть очень большой.

Анализ происходящих при этом явлений указывает на то, что риск возгорания вследствие повреждений электрической сети связан с перегревом, вызванным несогласованием максимального номинального тока в кабеле (или изолированном проводнике) и уставки максимальной защиты.

Кроме того, причиной перегрева может быть изменение монтажа электроустановки (например, добавление кабелей на одной и той же трассе (полке, лотке)).

Во влажной среде такой перегрев может привести к возникновению электрической дуги. Подобные электрические дуги возникают, когда сопротивление цепи короткого замыкания превышает 0,6 Ом, и существуют только там, где происходит пробой изоляции. Некоторые испытания показали, что ток утечки 300 мА может вызвать реальную опасность пожара (рис. F26).

F17

### 4.2 Защита от замыканий на землю

#### Различные типы устройств защиты от замыканий на землю (рис. F27)

В зависимости от установленных измерительных устройств возможны три типа устройств защиты от замыканий на землю:

■ Система RS (измерение дифференциального тока)

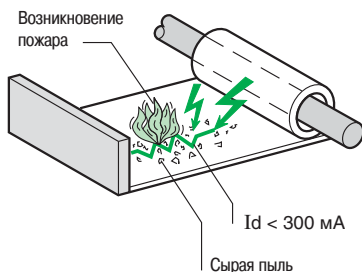
Ток замыкания на землю вычисляется путем векторного суммирования токов во вторичных обмотках трансформаторов тока. Дополнительный трансформатор тока устанавливается на нулевом проводнике и часто располагается вне блока автоматического выключателя.

■ Система SGR (возврат тока «источник-земля»)

Ток замыкания на землю измеряется в линии нейтраль-земля низковольтного трансформатора. Применяемый трансформатор тока располагается вне блока автоматического выключателя.

■ Система ZS (измерение тока нулевой последовательности)

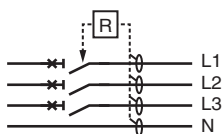
Ток замыкания на землю измеряется непосредственно на первичной обмотке трансформатора тока суммированием токов в токоведущих проводниках. Данный тип устройства используется только при малых токах замыкания.



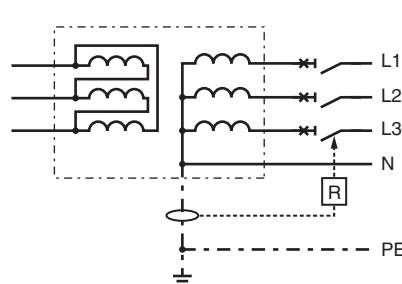
Ряд испытаний показали, что очень маленький ток утечки (несколько мА) может нарастать и, начиная с 300 мА, вызвать в пыльной и влажной среде пожар.

Рис. F26: Возникновение пожара в зданиях

Система RS



Система SGR



Система ZS

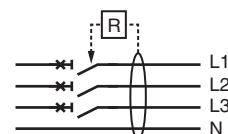


Рис. F27. Различные типы защит от замыканий на землю



## 4 Защита имущества от ущерба вследствие пробоя изоляции

### Размещение устройств защиты от замыканий на землю в электроустановке

Тип / Уровень электроустановки	Главный распределительный щит	Вторичный распределительный щит	Примечания
Система SGR	□		Используются
Система RS	□	■	Используются часто
Система ZS	□	■	Используются редко

- Могут применяться  
■ Рекомендуются к применению или применение необходимо

## 5.1 Защитные меры

### Защита от косвенного прикосновения

#### Общий случай

Защита от косвенного прикосновения обеспечивается устройствами защитного отключения, у которых чувствительность по току  $I\Delta n$  удовлетворяет условию  $I\Delta n \leq \frac{50 \text{ В}}{R_A}$  <sup>(1)</sup>

Выбор чувствительности УЗО зависит от сопротивления заземлителя электроустановки  $R_A$  (рис. F28).

$I\Delta n$	Максимальное сопротивление заземлителя	
	(50 В)	(25 В)
3 А	16 Ом	8 Ом
1 А	50 Ом	25 Ом
500 мА	100 Ом	50 Ом
300 мА	166 Ом	83 Ом
30 мА	1666 Ом	833 Ом

Рис. F28: Верхний предел сопротивления заземлителя электроустановки, который не должен превышать для данных уровней чувствительности УЗО и для максимальных сверхнизких напряжений 50 и 25 В

#### Случай распределительных цепей (рис. F29)

Международный стандарт МЭК 60364-4-41 и ряд национальных стандартов устанавливают максимальное время отключения распределительных цепей электроустановки 1 с (в отличие от цепей питания конечных потребителей). Это обеспечивает селективность срабатывания УЗО за счет применения:

- на уровне А: УЗО с выдержкой времени, например, тип "S" (селективный);
- на уровне В: УЗО мгновенного действия.

#### Случай соединения открытых проводящих частей электроприбора или группы электроприборов с отдельным заземлителем (рис. F30)

Защита от косвенного прикосновения посредством применения УЗО на уровне автоматического выключателя, защищающего каждую группу бытовых электроприборов или отдельно заземленный электроприбор.

В каждом случае чувствительность УЗО должно выбираться в зависимости от сопротивления соответствующего заземлителя.

#### УЗО с высокой чувствительностью (рис. F31)

Стандарт МЭК 60364 предписывает использовать УЗО с высокой чувствительностью ( $\leq 30 \text{ мА}$ ) в следующих случаях:

- цепи штепсельных розеток на номинальные токи  $\leq 32 \text{ А}$  в любом месте;
- цепи штепсельных розеток во влажных местах для всех номинальных значений токов;
- цепи штепсельных розеток во временных электроустановках;
- цепи питания помещений для стирки и плавательных бассейнов;
- цепи питания рабочих площадок, домов-фургонов, прогулочных катеров и передвижных выставок-ярмарок.

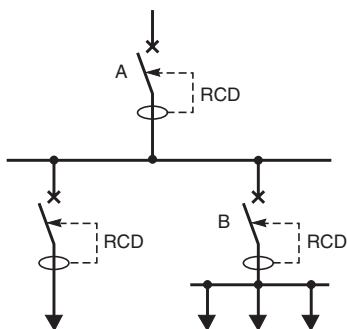


Рис. F29: Распределительные цепи

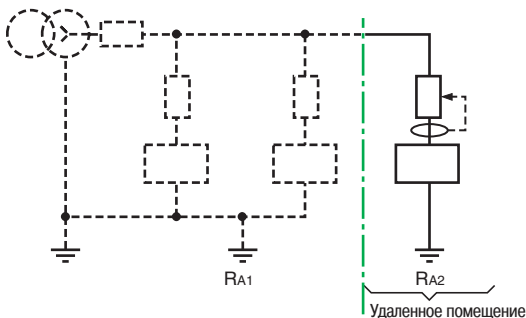


Рис. F30: Отдельный заземлитель

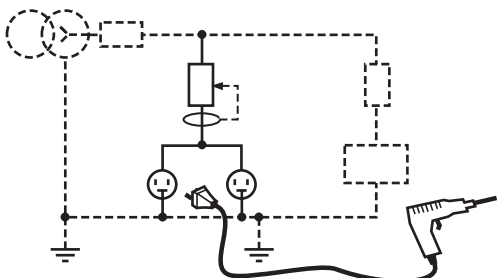


Рис. F31: Цепь питания штепсельных розеток

(1) 25 В для электроустановок на рабочих площадках, сельскохозяйственных предприятиях и т.п.

F20

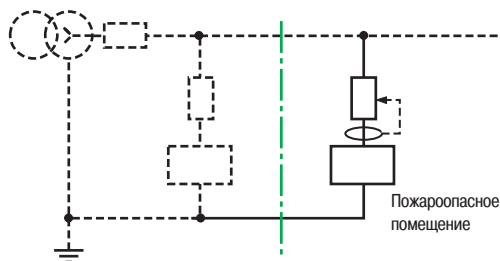


Рис. F32: Пожароопасное помещение

### В пожароопасных местах (рис. F32)

Защита от косвенного прикосновения в помещениях с высокой опасностью возгорания должна обеспечиваться с помощью УЗО, установленного в автоматическом выключателе, контролирующем подачу питания, и во многих странах такое использование УЗО является обязательным.

Чувствительность УЗО должна составлять  $\leq 500$  мА.

Использование УЗО с чувствительностью 300 мА позволяет также обеспечить защиту от опасности возгорания.

### Защита в случаях, когда открытые проводящие части не соединены с землей (рис. F33)

(Когда существующая электроустановка размещается в сухом месте и соединение с заземлением невозможно, или в случае обрыва защитного заземляющего провода)

УЗО с высокой чувствительностью ( $\leq 30$  мА) обеспечат защиту как от косвенного прикосновения, так и дополнительную защиту от прямого прикосновения.

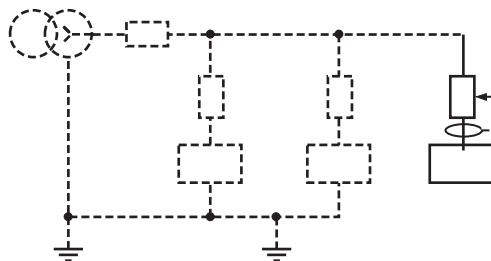


Рис. F33: Незаземленные открытые проводящие части (А)

## 5.2 Координация устройств защиты от токов утечки на землю

Согласованное селективное отключение обеспечивается посредством выдержки времени или разделения цепей, которые затем защищаются отдельно или по группам, или посредством двух этих методов.

Такая селективная защита обеспечивает срабатывание только устройства УЗО, расположенного непосредственно перед точкой повреждения.

■ Имеющееся оборудование обеспечивает селективную защиту на трех или четырех различных уровнях распределения:

- На уровне главного распределительного устройства
- На уровне вторичных распределительных устройств
- На уровне распределительных устройств конечных потребителей
- На уровне штепсельных розеток для защиты отдельных ЭП

■ Если косвенные прикосновения возможны, то, как правило, распределительные устройства (включая вторичные, при наличии), отдельное защищаемое оборудование и устройства автоматического отключения обеспечиваются дополнительной защитой от опасности косвенного прикосновения.

### Селективность между УЗО

Общие требования к обеспечению полной селективности между двумя УЗО:

- Отношение между токами срабатывания должно быть  $> 2$
- УЗО верхнего уровня должно иметь выдержку времени.

Селективность достигается за счет использования нескольких уровней стандартной чувствительности: 30 мА, 100 мА, 300 мА и 1 А и соответствующее время отключения (см. Рис. F34).

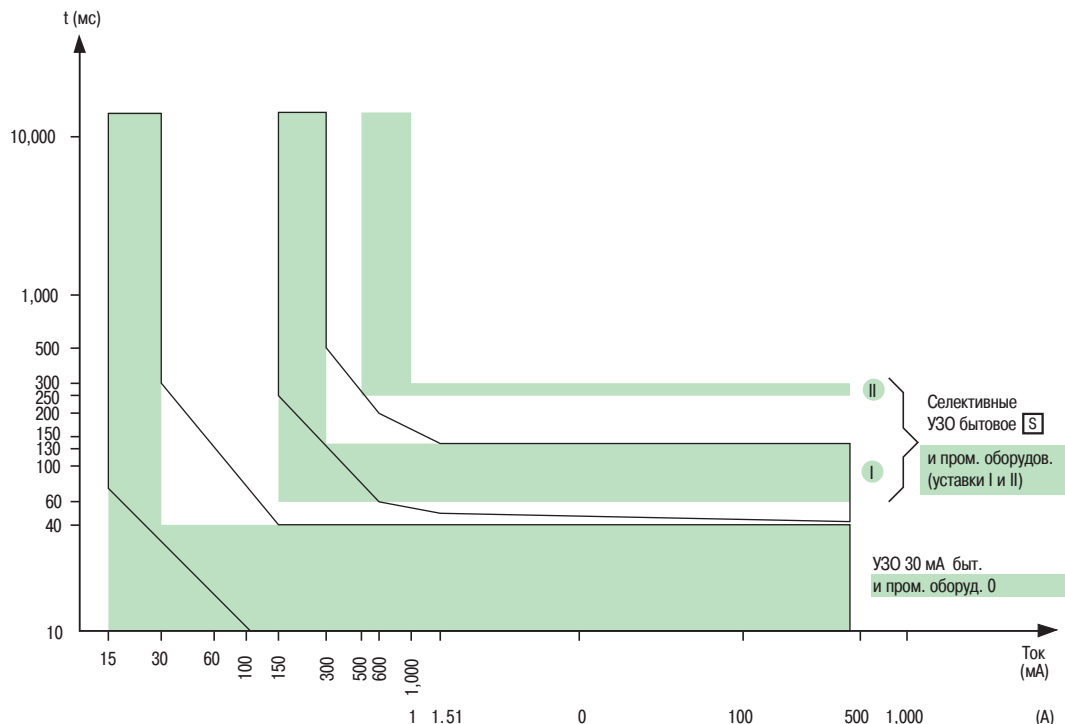


Рис. F34: Полная селективность действия УЗО на двух уровнях

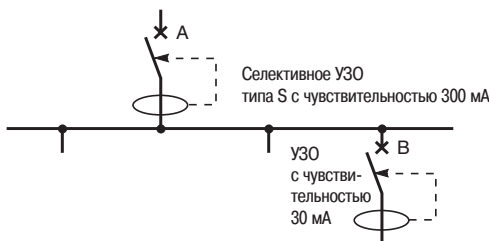


Рис. F35: Полная селективность действия УЗО на двух уровнях

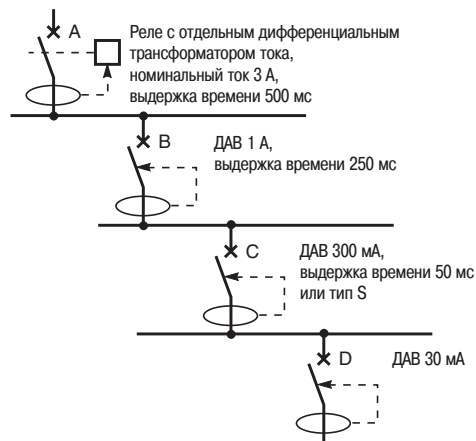


Рис. F36: Полная селективность действия УЗО на трех или четырех уровнях

## Селективность действия УЗО на двух уровнях (рис. F35)

### Защита

- Уровень А: уставка 1 с выдержкой времени (для промышленного УЗО) или тип S (для бытового УЗО) для защиты от косвенных прикосновений.
- Уровень В: УЗО мгновенного действия с высокой чувствительностью для цепей питания штепсельных розеток или электроприборов, представляющих повышенную опасность (стиральные машины и т.п., см. также главу L, раздел 3).

### Решения, предлагаемые компанией Schneider Electric

- Уровень А: автоматический выключатель Compact или Multi 9 с подключаемым модулем УЗО (Vigi NS160 или Vigi NC100), уставка I или тип S.
- Уровень В: автоматический выключатель с встроенным модулем УЗО (DPN Vigi) или подключаемым модулем УЗО (например, Vigi C60 или Vigi NC100), или Vigicompact.

**Примечание:** уставка вышеразмещенного дифференциального автоматического выключателя (ДАВ) должна соответствовать требованиям селективности и учитывать все токи утечки на землю на нижерасположенных участках сети.

## Избирательность на трех или четырех уровнях (рис. F36)

### Защита

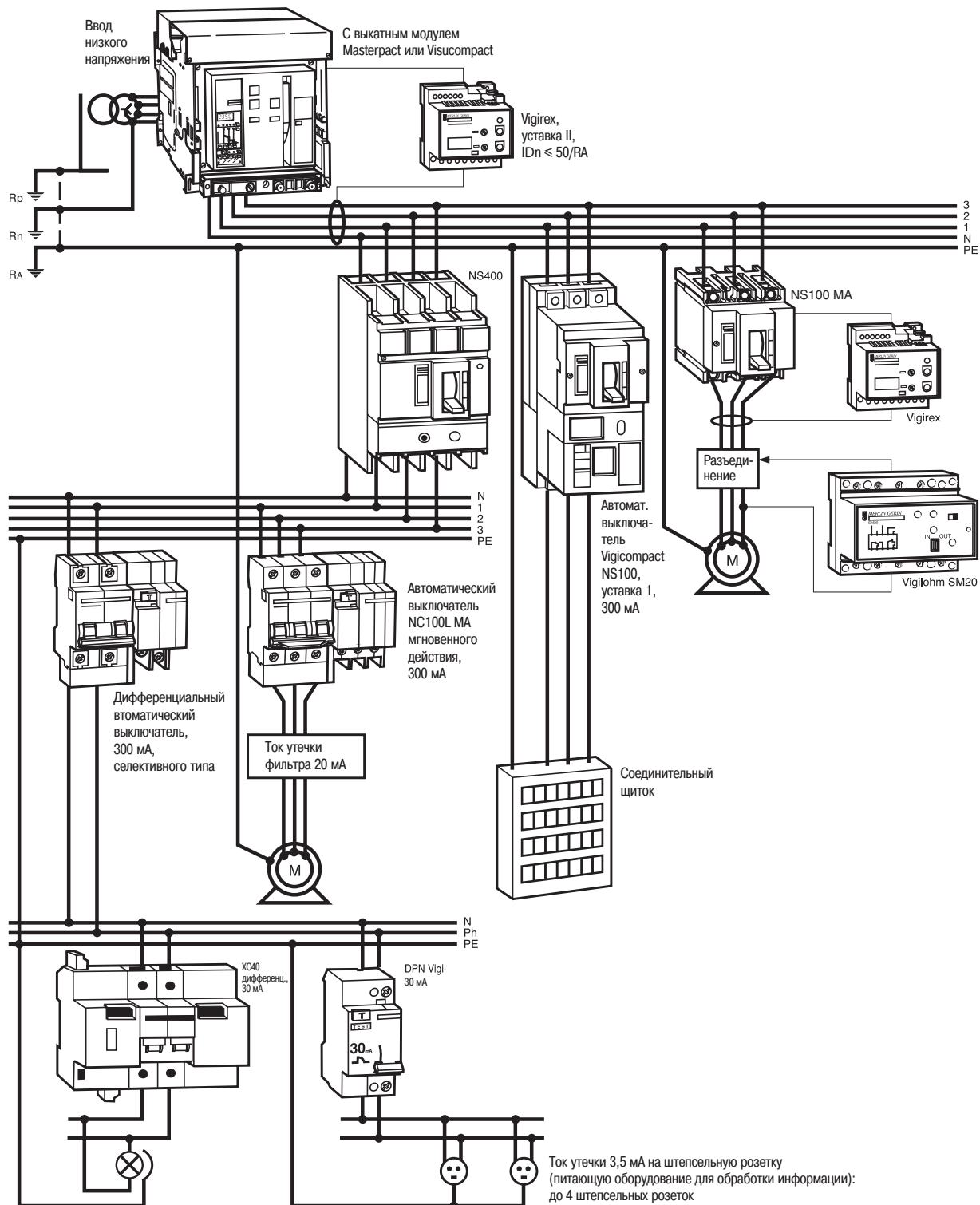
- Уровень А: УЗО с выдержкой времени (уставка III).
- Уровень В: УЗО с выдержкой времени (уставка II).
- Уровень С: УЗО с выдержкой времени (уставка I) или тип S.
- Уровень D: УЗО мгновенного действия.

### Решения, предлагаемые компанией Schneider Electric

- Уровень А: Автоматический выключатель, объединенный с УЗО и отдельным дифференциальным трансформатором тока (Vigirex RH54A).
- Уровень В: Vigicompact или Vigirex.
- Уровень С: Vigirex, Vigicompact или Vigi NC100 или Vigi C60.
- Уровень D:
  - Vigicompact;
  - или Vigirex;
  - или Multi 9 со встроенным или подключаемым модулем УЗО: Vigi C60 или DPN Vigi.

**Примечание:** Уставка вышеразмещенного ДАВ должна соответствовать требованиям селективности и учитывать все токи утечки на землю на нижерасположенных участках сети.

## F22



**Рис. F37:** Типичная трехуровневая электроустановка с защитой распределительных цепей (системой заземления TT). Один из электродвигателей снабжен специальной защитой

## 6 Реализация системы TN

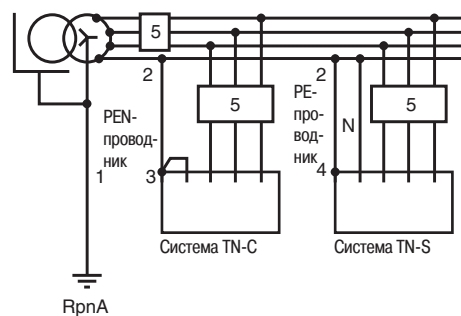
### 6.1 Предварительные условия

На стадии проектирования необходимо рассчитать максимально допустимую длину кабеля, расположенного ниже защитного автоматического выключателя (или комплекта плавких предохранителей), а при монтаже строго выполнять определенные правила.

Должны соблюдаться определенные условия, перечисленные ниже и изображенные на **рис. F38**.

1. РЕ-проводник должен регулярно и как можно чаще соединяться с заземлителем.
2. РЕ-проводник не должен монтироваться в ферромагнитном кабелепроводе, коробе и т.п. или на металлоконструкции, поскольку индуктивные эффекты и/или эффект близости могут увеличить его эффективное сопротивление.
3. В случае PEN-проводника (нулевого проводника, используемого также в качестве защитного проводника), соединение должно быть сделано непосредственно к клемме заземления бытового электроприбора (см. 3 на **рис. F38**), а потом к клемме нейтрали того же электроприбора.
4. Если сечение проводника менее 6 мм<sup>2</sup> для меди или 10 мм<sup>2</sup> для алюминия, или если кабель переносной, то нулевой и защитный проводники должны быть разделены (т.е. для рассматриваемой электроустановки должна быть выбрана система TN-S).
5. Замыкания на землю могут устраняться устройствами максимальной токовой защиты, т.е. плавкими предохранителями и автоматическими выключателями.

В этом списке указаны условия, которые должны соблюдаться при реализации схемы TN для обеспечения защиты людей от косвенных прикосновений.



#### Примечания:

- При использовании схемы TN нейтраль низковольтной обмотки понижающего трансформатора, открытые проводящие части соответствующей подстанции и электроустановки, а также сторонние проводящие части этой подстанции и электроустановки были все соединены с общей системой заземления.
- В случае подстанции, в которой учет электроэнергии осуществляется по низкому напряжению, на вводе в электроустановку низкого напряжения требуется применение устройства разделения, и такое разделение должно быть визуально различимым.
- PEN-проводник не должен прерываться ни при каких обстоятельствах. Контрольно-защитное распределительное устройство для нескольких схем TN должно быть:
  - 3-полюсным, если в цепи используется PEN-проводник;
  - предпочтительно 4-полюсным (3 фазы + нейтраль), если эта цепь содержит нейтраль с отдельным РЕ-проводником.

**Рис. F38:** Реализация системы заземления типа TN

### 6.2 Защита от косвенного прикосновения

#### Методы определения уровней тока короткого замыкания

В системах заземления TN по цепи замыкания на землю будет в принципе всегда проходить ток достаточной величины для срабатывания устройства максимальной токовой защиты.

Сопротивления источника питания и питающей сети гораздо ниже, чем сопротивление цепей электроустановки, поэтому любое ограничение величины токов замыкания на землю будет в основном вызываться проводниками этой электроустановки (длинные гибкие провода, идущие к бытовым электроприборам, значительно увеличивают сопротивление цепи замыкания и соответственно снижают величину тока короткого замыкания).

Самая новая рекомендация МЭК в отношении защиты от косвенного прикосновения в системах заземления TN лишь устанавливает соотношение между максимально допустимыми временами отключения и номинальным напряжением системы (**рис. F13** в подразделе 3.3).

Обычно используются три метода расчета:

- метод полных сопротивлений, основанный на векторном суммировании полных сопротивлений системы;
- композиционный метод;
- традиционный метод, основанный на предполагаемой величине падения напряжений и использовании специальных таблиц.

*Современная практика выполнения расчетов предусматривает использование программного обеспечения, разрешенного уполномоченными национальными органами и основанного на методе полных сопротивлений, например Ecodial 3. Как правило, национальные органы публикуют свои рекомендации, в которых приводятся типовые значения, длины проводников и т.п.*

Указанные рекомендации основаны на следующем: для того, чтобы повысить потенциал открытой проводящей части до 50 В или выше, ток, который должен протекать в цепях системы TN, является настолько большим, что может случиться одно из двух:

- цепь замыкания перегорит практически мгновенно;
- произойдет металлическое короткое замыкание проводника, и ток будет достаточной величины, чтобы вызвать срабатывание устройства максимальной токовой защиты.

Чтобы в последнем случае обеспечить правильное срабатывание устройств защиты от сверхтока, на этапе проектирования объекта необходимо провести достаточно точную оценку уровней токов замыкания на землю.

Тщательный анализ предусматривает применение метода симметричных составляющих к каждой цепи по очереди. Данный метод является несложным, но объем вычислений является чрезмерно большим, особенно с учетом того, что на типичной электроустановке низкого напряжения очень трудно определить полные сопротивления нулевой последовательности с приемлемой степенью точности.

Более предпочтительны другие упрощенные методы, обеспечивающие приемлемую точность. Ниже описаны три таких практических метода:

- **«метод полных сопротивлений»**, основанный на суммировании всех полных сопротивлений (только прямой последовательности) каждого элемента цепи замыкания на землю;
- **«композиционный метод»**, представляющий собой оценку тока короткого замыкания на дальнем конце цепи при известном уровне тока короткого замыкания на ближнем конце этой цепи;
- **«традиционный метод»** расчета минимальных уровней токов замыкания на землю с использованием таблиц значений для получения быстрых результатов.

Эти методы дают надежные оценки лишь для случая, когда кабели, составляющие цепь замыкания на землю, находятся в непосредственной близости друг от друга и не разделены ферромагнитными материалами.

### Метод полных сопротивлений

В этом методе суммируются полные сопротивления прямой последовательности для каждого элемента цепи замыкания на землю (кабеля, РЕ-проводника, трансформатора и др.), на основе чего определяется ток короткого замыкания на землю по следующей формуле:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}}$$

где:

$(\sum R)^2$  - сумма всех активных сопротивлений в цепи замыкания на этапе проектирования строящегося объекта;

$(\sum X)^2$  - сумма всех индуктивных реактивных сопротивлений в цепи замыкания;

U - номинальное фазное напряжение в системе.

Применение данного метода иногда затрудняется тем, что должны быть известны значения всех параметров системы и характеристики элементов цепи замыкания. Национальные нормативные документы могут содержать рекомендации по типовым значениям параметров для целей оценки.

### Композиционный метод

Данный метод позволяет определить ток короткого замыкания на дальнем конце цепи по известной величине тока короткого замыкания на ближнем конце этой цепи с помощью приближенной формулы:

$$I = I_{sc} \cdot \frac{U}{U + Z_s I_{sc}}$$

где:

$I_{sc}$  - ток короткого замыкания на вышестоящем участке цепи;

I - ток короткого замыкания на дальнем конце цепи;

U — номинальное фазное напряжение в системе;

$Z_s$  — полное сопротивление цепи.

**Примечание:** в отличие от предыдущего «метода полных сопротивлений», в данном методе полные сопротивления отдельных элементов суммируются арифметически<sup>(1)</sup>.

### Традиционный метод

Этот метод позволяет достаточно точно определить максимально допустимые длины кабелей.

#### Принцип

Принцип данного метода основан на расчете тока короткого замыкания и предполагает, что на входе рассматриваемой цепи (т.е. в месте установки УЗО), напряжение остается на уровне 80% или более от номинального фазного напряжения. Эта величина вместе с величиной полного сопротивления цепи используется для расчета тока короткого замыкания.

(1) Это приводит к тому, что рассчитанная величина тока оказывается меньше фактической. Если уставки максимальной токовой защиты основаны на этой рассчитанной величине, то срабатывание реле или плавкого предохранителя гарантируется.

Максимальная длина любой цепи электроустановки при использовании системы заземления TN:

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 S_{ph}}{\rho(1+m) I_a}$$

В следующих таблицах указана длина цепи, которая не должна превышать, с тем чтобы можно было обеспечить защиту людей от косвенного прикосновения с помощью защитных устройств

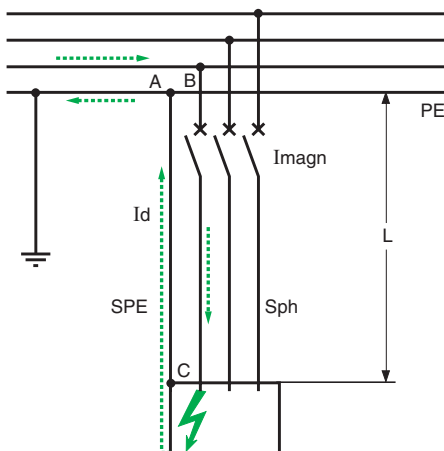


Рис. F39: Расчет  $L_{\max}$  для системы заземления TN с использованием традиционного метода

Данный коэффициент учитывает все падения напряжения на участках, расположенных выше по цепи от рассматриваемой точки. В низковольтных кабелях, когда все проводники трехфазной четырехпроводной цепи находятся близко друг к другу (что является нормальным случаем), индуктивное сопротивление как самих проводников, так и между ними пренебрежимо мало по сравнению с активным сопротивлением кабеля.

Такое допущение считается справедливым для кабелей с сечением до 120 мм<sup>2</sup>. Пример см. рис. F39.

При превышении этой длины активное сопротивление R увеличивается следующим образом:

Площадь сечения жилы (мм <sup>2</sup> )	Величина активного сопротивления
S = 150 мм <sup>2</sup>	R+15%
S = 185 мм <sup>2</sup>	R+20%
S = 240 мм <sup>2</sup>	R+25%

Максимальная длина любой цепи электроустановки при использовании системы заземления TN определяется формулой:

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 S_{ph}}{\rho(1+m) I_a}$$

где:

$L_{\max}$  – максимальная длина кабеля в метрах

$U_0$  – фазное напряжение в вольтах (230 В для системы напряжением 230/400 В);

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление при нормальной рабочей температуре в Ом·мм<sup>2</sup>/м (22,5 · 10<sup>-3</sup> для меди и 36 · 10<sup>-3</sup> для алюминия);

$I_a$  – уставка по току отключения для режима мгновенного срабатывания автоматического выключателя или

$I_a$  – ток, при котором гарантировано срабатывание используемого защитного плавкого предохранителя в течение нормативного времени.

$$m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$$

$S_{ph}$  – площадь сечения фазных проводников соответствующей цепи в мм<sup>2</sup>;

$S_{PE}$  – площадь сечения рассматриваемого защитного проводника в мм<sup>2</sup>

(см. рис. F39).

## Таблицы

Приведенные ниже таблицы для систем TN были составлены с помощью описанного выше «традиционного метода».

В них указаны максимальные длины цепей, при превышении которых омическое сопротивление проводников ограничит величину тока короткого замыкания до уровня ниже того, который требуется для срабатывания автоматического выключателя (или плавкого предохранителя), защищающего эту цепь, с достаточной быстротой, чтобы обеспечить безопасность от косвенного прикосновения.

### Поправочный коэффициент m

На рис. F40 представлен поправочный коэффициент, который должен применяться к значениям, указанным на рис. F42 - F44, с учетом отношения  $S_{ph}/S_{PE}$ , типа цепи и материалов проводников.

В этих таблицах учитывается:

- тип защиты: автоматические выключатели или плавкие предохранители;
- уставки по току срабатывания;
- площади сечения фазных и защитных проводников;
- тип системы заземления (рис. F45 на стр. F27);
- тип автоматического выключателя (т.е. B, C или D).

Эти таблицы можно использовать для систем напряжением 230/400 В.

Эквивалентные таблицы для защиты с помощью автоматических выключателей марки Merlin Gerin (Compact и Multi 9) включены в соответствующие каталоги.

Цепь	Материал проводника	m = S <sub>ph</sub> /S <sub>PE</sub> (или PEN)			
		m = 1	m = 2	m = 3	m = 4
3 фазы + нейтраль	Медь	1	0.67	0.50	0.40
или фаза + нейтраль	Алюминий	0.62	0.42	0.31	0.25

Рис. F40: Поправочный коэффициент для длин цепей, приведенных в таблицах F40 - F43 для систем TN



Цепи, защищенные автоматическими выключателями общего назначения (рис. F41)

Номинальное сечение проводников	Отключающий ток I <sub>m</sub> при мгновенном срабатывании выключателя или срабатывании с короткой выдержкой времени (А)																														
	мм <sup>2</sup>	50	63	80	100	125	160	200	250	320	400	500	560	630	700	800	875	1000	1120	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000	12500	
1.5	100	79	63	50	40	31	25	20	16	13	10	9	8	7	6	6	5	4	4												
2.5	167	133	104	83	67	52	42	33	26	21	17	15	13	12	10	10	8	7	7	5	4										
4	267	212	167	133	107	83	67	53	42	33	27	24	21	19	17	15	13	12	11	8	7	5	4								
6	400	317	250	200	160	125	100	80	63	50	40	36	32	29	25	23	20	18	16	13	10	8	6	5	4						
10			417	333	267	208	167	133	104	83	67	60	53	48	42	38	33	30	27	21	17	13	10	8	7	5	4				
16				427	333	267	213	167	133	107	95	85	76	67	61	53	48	43	33	27	21	17	13	11	8	7	5	4			
25					417	333	260	208	167	149	132	119	104	95	83	74	67	52	42	33	26	21	17	13	10	8	7				
35						467	365	292	233	208	185	167	146	133	117	104	93	73	58	47	36	29	23	19	15	12	9				
50							495	396	317	283	251	226	198	181	158	141	127	99	79	63	49	40	32	25	20	16	13				
70								417	370	333	292	267	233	208	187	146	117	93	73	58	47	37	29	23	19						
95									452	396	362	317	283	263	198	158	127	99	79	63	50	40	32	25							
120											457	400	357	320	250	200	160	125	100	80	63	50	40	32							
150													435	388	348	272	217	174	136	109	87	69	54	43	35						
185														459	411	321	257	206	161	128	103	82	64	51	41						
240																	400	320	256	200	160	128	102	80	64	51					

Рис. F41: Максимальные длины цепи (в метрах) для различных сечений медного проводника и уставок по току мгновенного отключения при использовании автоматических выключателей общего назначения в системе TN напряжением 230/240 при  $t = 1$

Цепи, защищенные автоматическими выключателями Compact<sup>(1)</sup> или Multi 9<sup>(1)</sup> для  
промышленных или бытовых применений (рис. F42 - F44)

Sph	Номинальный ток (A)															
мм²	1	2	3	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
1.5	1200	600	400	300	200	120	75	60	48	37	30	24	19	15	12	10
2.5		1000	666	500	333	200	125	100	80	62	50	40	32	25	20	16
4			1066	800	533	320	200	160	128	100	80	64	51	40	32	26
6				1200	800	480	300	240	192	150	120	96	76	60	48	38
10						800	500	400	320	250	200	160	127	100	80	64
16							800	640	512	400	320	256	203	160	128	102
25									800	625	500	400	317	250	200	160
35										875	700	560	444	350	280	224
50												760	603	475	380	304

Рис. F42: Максимальные длины цепи (в метрах) для различных сечений медного проводника и номинальных токов для автоматических выключателей типа B(2) в одно- или трехфазной системе TN напряжением 230/240 В при  $t = 1$

Sph	Номинальный ток (A)																
мм²	1	2	3	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	
1.5	600	300	200	150	100	60	37	30	24	18	15	12	9	7	6	5	
2.5		500	333	250	167	100	62	50	40	31	25	20	16	12	10	8	
4			533	400	267	160	100	80	64	50	40	32	25	20	16	13	
6				600	400	240	150	120	96	75	60	48	38	30	24	19	
10					667	400	250	200	160	125	100	80	63	50	40	32	
16						640	400	320	256	200	160	128	101	80	64	51	
25							625	500	400	312	250	200	159	125	100	80	
35								875	700	560	437	350	280	222	175	140	112
50									760	594	475	380	301	237	190	152	

Рис. F43: Максимальные длины цепи (в метрах) для различных сечений медного проводника и номинальных токов для автоматических выключателей типа C2 в одно- или трехфазной системе TN напряжением 230/240 В при  $t = 1$

(1) Изделия торговой марки Merlin Gerin.

(2) Идентификация автоматического выключателя типа В рассматривается в главе Н (подраздел 4.2).

Sph	Номинальный ток (А)															
мм <sup>2</sup>	1	2	3	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
1.5	429	214	143	107	71	43	27	21	17	13	11	9	7	5	4	3
2.5	714	357	238	179	119	71	45	36	29	22	18	14	11	9	7	6
4		571	381	286	190	114	71	80	46	36	29	23	18	14	11	9
6			857	571	429	286	171	107	120	69	54	43	34	27	21	14
10				952	714	476	286	179	200	114	89	71	57	45	36	23
16					762	457	286	320	183	143	114	91	73	57	46	37
25						714	446	500	286	223	179	143	113	89	71	57
35							625	700	400	313	250	200	159	125	80	100
50								848	543	424	339	271	215	170	136	109

**Рис. F44:** Максимальные длины цепи (в метрах) для различных сечений медного проводника и номинальных токов для автоматических выключателей типа D(1) в одно- или трехфазной системе TN напряжением 230/240 В при  $m = 1$

## Пример

Трехфазная четырехпроводная электроустановка напряжением 230/400 В выполнена по системе заземления TN-C. Цепь защищена автоматическим выключателем типа В с номинальным током срабатывания 63 А и состоит из кабеля с алюминиевыми жилами с сечением фазных проводников 50 мм<sup>2</sup> и нулевого проводника (PEN) сечением 25 мм<sup>2</sup>.

Какова максимальная длина цепи, ниже которой обеспечивается гарантированная защита людей от опасностей косвенного прикосновения с помощью электромагнитного отключающего реле мгновенного действия, входящего в состав автоматического выключателя?

Из таблицы, приведенной на **рис. F42**, для сечения проводника 50 мм<sup>2</sup> и автоматического выключателя типа В с номинальным током 63 А получаем длину 603 м, к которой должен быть

применен поправочный коэффициент 0,42 (**рис. F40** для  $m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}} = 2$ ).

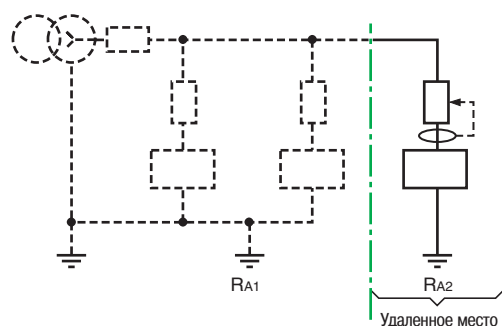
Таким образом, максимальная длина цепи составит:

$603 \times 0,42 = 253 \text{ м}$ .

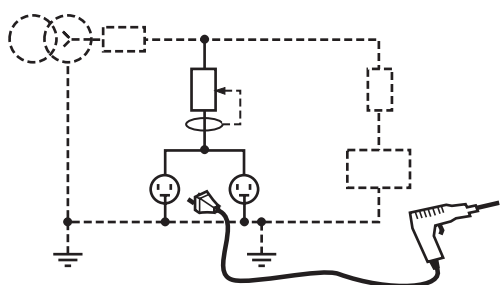
## Частный случай, когда одна или несколько открытых проводящих частей соединены с отдельными заземлителями

Защита от косвенного прикосновения должна быть обеспечена посредством установки УЗО на вводе любой цепи, питающей бытовой электроприбор или группу бытовых электроприборов, открытые проводящие части которых соединены с отдельным заземлителем.

Чувствительность этого УЗО должна быть согласована с сопротивлением заземлителя (RA2 на **рис. F45**). См. технические требования к системе TT.



**Рис. F45:** Отдельный заземлитель



**Рис. F46:** Цепь питания штепсельных розеток

## 6.3 Высокочувствительные УЗО (см. Рис. F31)

В соответствии со стандартом I EC 60364-4-41, высокочувствительные устройства УЗО (30 мА) должны использоваться для защиты штепсельных розеток с номинальным током 20 А на всех объектах. Использование таких УЗО также рекомендуется в следующих случаях (**рис. F46**)

- Цепи со штепсельными розетками при влажных условиях при всех номинальных токах
- Цепи со штепсельными розетками на временных установках
- Цепи питания химчисток и плавательных бассейнов
- Цепи питания жилых прицепов, прогулочных судов и передвижных выставок.

См. п.2.2 и Главу Р, Раздел 3.

(1) Для идентификации автоматического выключателя типа D см. главу Н, подраздел 4.2.

(2) Эти случаи рассматриваются подробно в главе Н, раздел 3.

## 6.4 Защита пожароопасных помещений

Согласно международному стандарту МЭК 60364-482-2.10, в помещениях, в которых риск возгорания является большим, использование системы заземления TN-C часто запрещается и следует применять систему TN-S. В некоторых странах защита посредством применения УЗО с чувствительностью  $\leq 500$  мА на входе цепи, питающей такое помещение, является обязательной (рис. F47).

Применение УЗО с чувствительностью 300 мА позволяет также обеспечить защиту от пожара.

## 6.5 Защита при большом полном сопротивлении цепи замыкания на землю

Когда ток замыкания на землю ограничен высоким сопротивлением цепи замыкания, и поэтому максимальная токовая защита может не отключить цепь в течение нормативного времени, должны быть рассмотрены следующие дополнительные меры:

### Вариант решения 1 (рис. F48)

■ Необходимо установить автоматический выключатель с пониженным порогом срабатывания магнитного расцепителя мгновенного действия, например:

$$2I_n \leq I_{rm} \leq 4I_n$$

Это обеспечит защиту людей от поражения током в цепях аномально большой длины. При этом, однако, следует проверить, что большие переходные токи, например пусковые токи электродвигателей, не вызовут ложных срабатываний.

■ Решения, предложенные компанией Schneider Electric

□ Автоматический выключатель Compact типа G ( $2I_n \leq I_{rm} \leq 4I_n$ ).

□ Автоматический выключатель Multi 9 типа B.

### Вариант решения 2 (рис. F49)

■ Необходимо установить в рассматриваемой цепи УЗО. Такое устройство не обязательно должно иметь высокую чувствительность (от нескольких ампер до нескольких десятков ампер). Если предусмотрено использование штепсельных розеток, то в любом случае определенные цепи должны быть защищены УЗО с высокой чувствительностью ( $\leq 30$  мА); обычно одно УЗО устанавливается на несколько штепсельных розеток в цепи.

■ Решения, предложенные компанией Schneider Electric

□ УЗО Multi 9 NG125:  $I_{\Delta n} = 1$  или 3 А;

□ Vigicomact REH или REM:  $I_{\Delta n} = 3 - 30$  А;

□ Автоматический выключатель Multi 9 типа B.

### Вариант решения 3

Необходимо увеличить сечение РЕ- или PEN-проводников и/или фазных проводников с тем, чтобы снизить сопротивление цепи замыкания на землю.

### Вариант решения 4

Установить дополнительные проводники уравнивания потенциалов. Это обеспечит такой же эффект, что и вариант решения 3, т.е. снижение сопротивления цепи замыкания на землю, но одновременно дополнительно усилит существующие меры защиты людей от напряжения прикосновения. Эффективность такого усовершенствования можно проверить, измерив сопротивления между каждой открытой проводящей частью и местным главным защитным проводником.

Для электроустановок с типом заземления TN-C соединение, показанное на рис. F50, не допускается, и следует применить вариант решения 3.

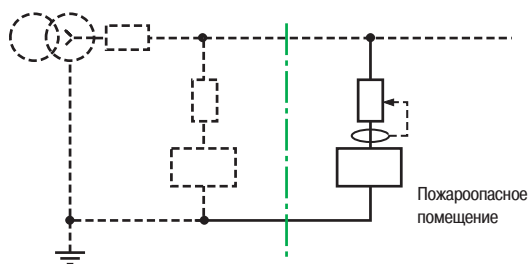


Рис. F47: Защита пожароопасного помещения

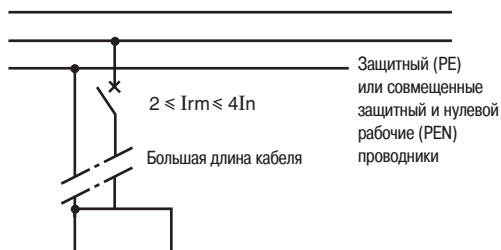


Рис. F48: Автоматический выключатель с магнитным расцепителем мгновенного действия с пониженным порогом срабатывания

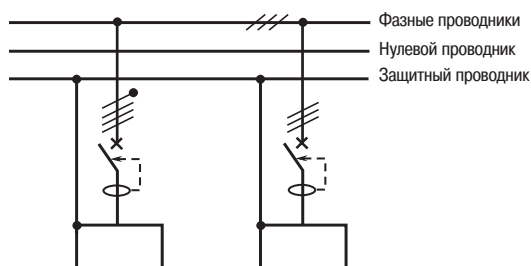


Рис. F49: Защита систем типа TN с большим сопротивлением цепи замыкания на землю с помощью УЗО

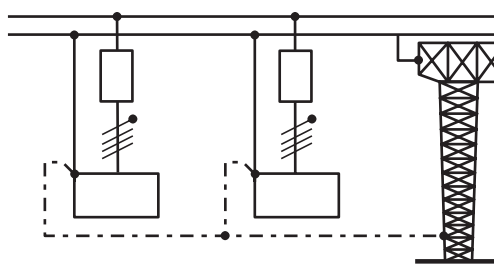


Рис. F50: Усовершенствованная схема уравнивания потенциалов

Основная особенность системы заземления ИТ заключается в том, что в случае замыкания на землю такая система может продолжать функционировать без перерыва питания. Это замыкание называется «первым замыканием».

В такой системе все открытые проводящие части электроустановки соединяются РЕ-проводниками с заземлителем этой электроустановки, а нейтраль питающего трансформатора:

- или изолируется от земли;
- или соединяется с землей через достаточно большое сопротивление (обычно 1000 Ом или более) при частоте 50 Гц.

Это означает, что ток замыкания на землю будет измеряться в миллиамперах, поэтому не вызовет серьезных повреждений в месте первого замыкания, не приведет к появлению опасных напряжений прикосновения и не представит опасности возгорания. Поэтому такую систему допускается нормально эксплуатировать до тех пор, пока не представится удобная возможность отключить поврежденный участок цепи для проведения ремонтных работ. Это способствует обеспечению бесперебойности электропитания.

На практике же, для успешной эксплуатации такой системы заземления требуется применение специальных мер:

- постоянный контроль состояния изоляции относительно земли с подачей звукового или светового сигнала в случае первого замыкания;
- устройство для ограничения напряжения, которое может возникнуть в нейтральной точке питающего трансформатора относительно земли;
- существует отработанная процедура обнаружения места «первого замыкания» высококвалифицированным персоналом; поиск места короткого замыкания значительно облегчается при использовании существующих автоматических устройств;
- в случае, если до устранения первого замыкания происходит «второе замыкание», должны сработать соответствующие автоматические выключатели. По определению, второе замыкание – замыкание на землю проводника другой фазы или рабочего нейтрального проводника<sup>1</sup>.

Двойное замыкание приводит к короткому замыканию через землю и/или РЕ-проводники сети уравнивания потенциалов.

7.1 Предварительные условия (рис. 51 и рис. 52)

Минимальные требуемые функции	Компоненты и устройства	Примеры реализации
Защита от перенапряжений	(1) Ограничитель напряжения	Cardew C
Резистор цепи заземления нейтрали (для изменения полного сопротивления в цепи заземления)	(2) Резистор	Полное сопротивление Zx
Общий контроль замыканий на землю с подачей предупредительного сигнала в случае первого замыкания	(3) Устройство постоянного контроля изоляции с подачей предупредительного сигнала	Vigilohm TR22A или XM 200
Автоматическое отключение КЗ при втором замыкании и максимальная токовая защита нулевого проводника	(4) Четырехполюсные автоматические выключатели (для случая распределенной нейтрали) Все 4 полюса + отключающий элемент	Автоматический выключатель Compact или УЗО средней чувствительности RCD-MS
Обнаружение места первого замыкания	(5) Устройство обнаружения места замыкания под напряжением или последовательное отключение цепей	Система Vigilohm

Рис. F51: Основные функции в цепях системы ИТ и примеры их реализации с помощью изделий марки Merlin Gerin

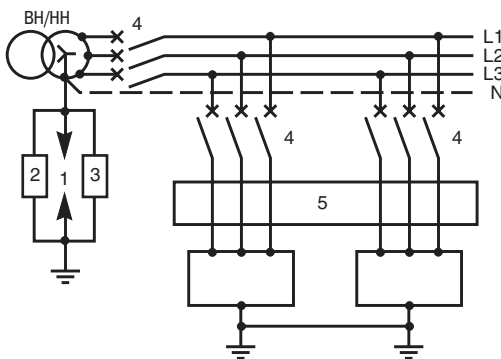


Рис. F52: Местоположение основных функций в трехфазной трехпроводной системе заземления ИТ

(1) В системах с распределенной нейтралью (рис. F56)

Современные системы контроля значительно облегчают обнаружение места первого замыкания и его устранение.

Системы обнаружения замыканий соответствуют стандарту МЭК 61157-9.

## 7.2 Защита от косвенного прикосновения

### Первое замыкание

Ток замыкания на землю, который протекает при первом замыкании, измеряется в миллиамперах.

Напряжение на корпусе относительно земли является произведением этого тока на сопротивление заземлителя электроустановки и РЕ-проводника (от поврежденного элемента до заземлителя). Это напряжение является неопасным и в худшем случае может составлять всего несколько вольт (например, через сопротивление цепи заземления в 1000 Ом пройдет ток 230 мА<sup>1</sup>, а на неэффективном заземлителе электроустановки сопротивлением 50 Ом напряжение составит 11,5 В).

Предупредительный сигнал подается устройством постоянного контроля состояния изоляции.

### Принцип контроля замыканий на землю

Генератор переменного тока очень низкой частоты или постоянного тока (применяемый для снижения влияния емкости кабеля до пренебрежимо малых уровней) подает напряжение между нейтралью питающего трансформатора и землей. Это напряжение вызывает появление небольшого тока, величина которого зависит от сопротивления изоляции, по отношению к заземлителю всей электроустановки.

В системах переменного тока могут применяться низкочастотные приборы, которые при замыкании генерируют переходные постоянные составляющие тока. Некоторые модели могут выделять активную и емкостную составляющие тока утечки.

Новые разработанные приборы позволяют регистрировать изменения тока утечки, что позволяет предотвратить появление первого замыкания.

### Примеры оборудования

#### ■ Ручной поиск мест коротких замыканий (рис. F53)

Генератор может быть стационарным (например, XM100) или портативным (например, GR10X, позволяющий проверять обесточенные цепи), а приемник вместе с токовыми клещами нулевой последовательности – портативные.

#### ■ Автоматический (стационарный) поиск мест коротких замыканий (рис. F54 на следующей странице)

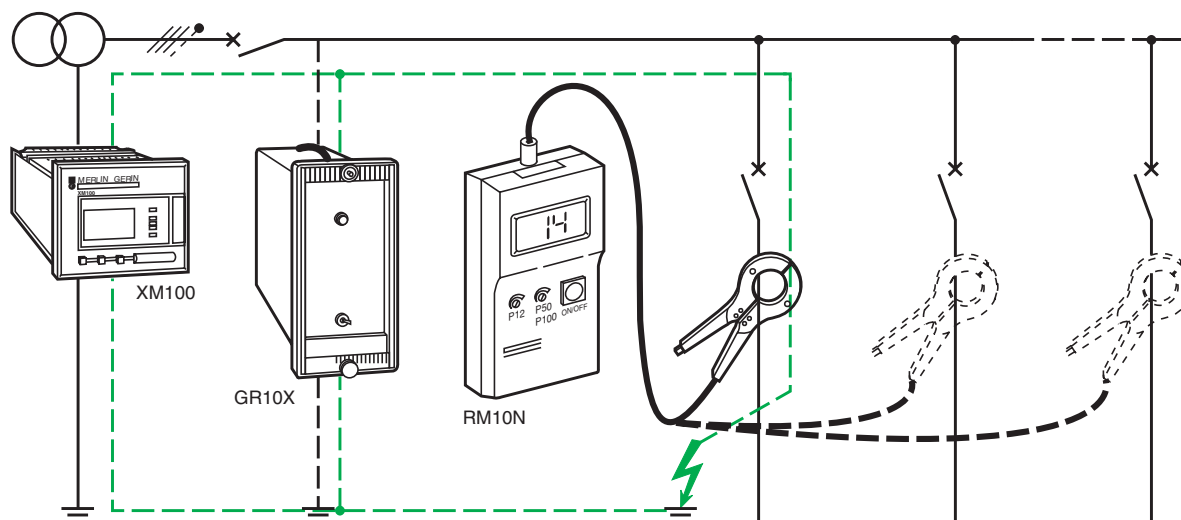


Рис. F53: Неавтоматический (ручной) поиск места короткого замыкания

Контрольное реле XM100 вместе со стационарными детекторами XD1 или XD12 (каждый из них подсоединен к кольцевому трансформатору тока нулевой последовательности, охватывающему проводники соответствующей цепи) образуют систему автоматического обнаружения мест короткого замыкания в электроустановке, находящейся под напряжением.

Кроме того, для каждой контролируемой цепи отображается уровень сопротивления изоляции и контролируются два уровня: первый уровень предупреждает о необычно низком сопротивлении изоляции с тем, чтобы принять соответствующие меры, а второй уровень указывает на наличие короткого замыкания и подает предупредительный сигнал.

(1) Для трехфазной системы 230/400 В.

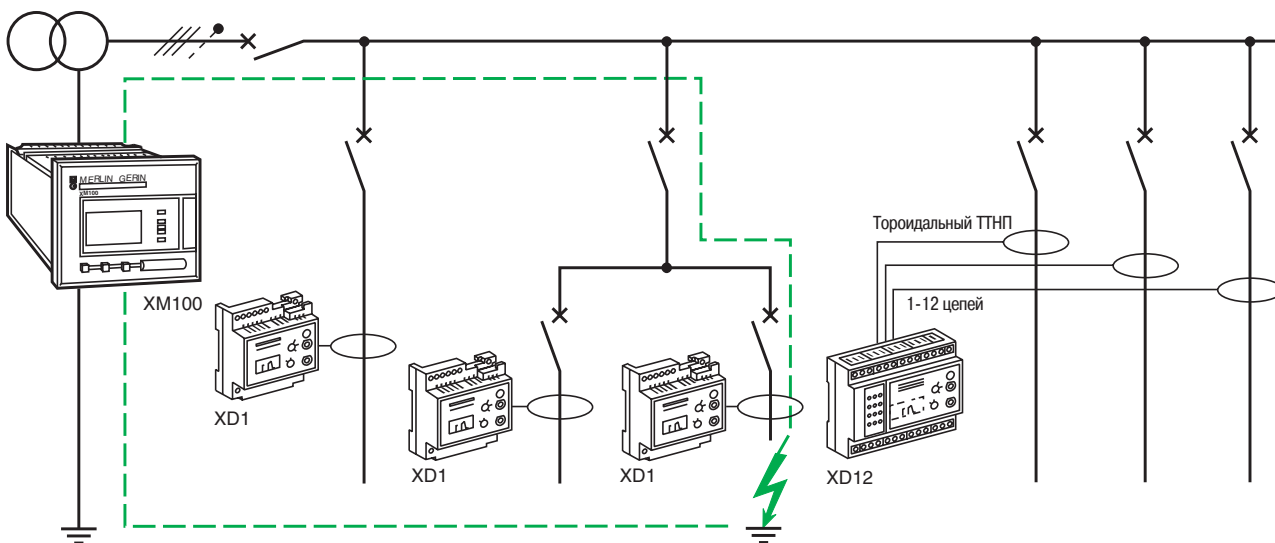


Рис. F54: Стационарный автоматический поиск мест коротких замыканий

## ■ Автоматический контроль, регистрация и поиск мест замыканий (рис. F55)

Система Vigiloht обеспечивает также доступ к принтеру и/или персональному компьютеру, осуществляющему глобальный контроль состояния уровня изоляции всей рассматриваемой электроустановки, и регистрирующему хронологическое изменение уровня изоляции каждой цепи. Центральное устройство контроля XM100 вместе с детекторами мест коротких замыканий XD08 и XD16, связанными с кольцевыми трансформаторами тока нулевой последовательности (рис. F55), обеспечивает автоматическое обнаружение замыканий.

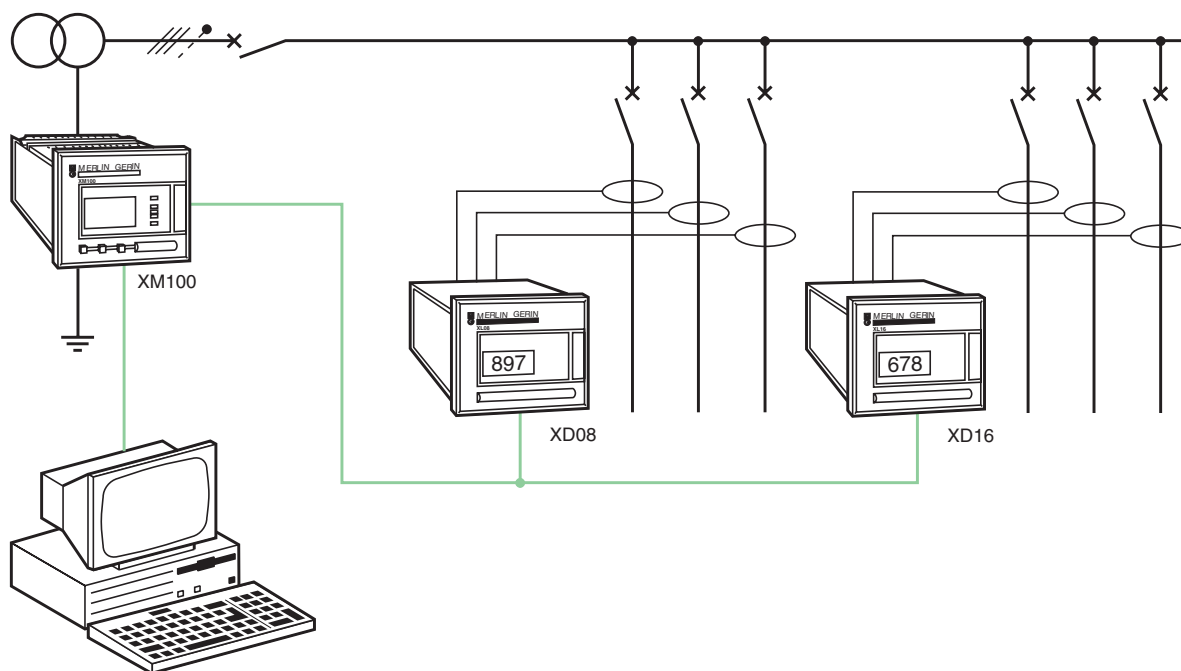


Рис. F55: Автоматический поиск замыканий и автоматическая регистрация данных по сопротивлению изоляции

### Реализация устройств постоянного контроля состояния изоляции

#### ■ Соединение

Такое устройство обычно включается между нейтралью (или искусственной нейтралью) питающего трансформатора и его заземлителем.

#### ■ Питание

Питание к устройству контроля изоляции должно подводиться от надежного источника питания. На практике это обычно осуществляется непосредственно от контролируемой электроустановки через устройства максимальной токовой защиты с соответствующим номиналом.

#### ■ Уставки уровней

Некоторые национальные стандарты рекомендуют использовать первую уставку на уровне 20% ниже уровня изоляции новой электроустановки. Эта величина позволяет обнаружить снижение качества изоляции и в ситуации зарождающегося отказа требует принятия предупредительных мер.

Пороговый уровень для подачи предупредительного сигнала о замыкании на землю будет соответствовать гораздо более низкой величине сопротивления.

Например, такими двумя уровнями могут быть:

- уровень изоляции новой электроустановки: 100 кОм;
- безопасный ток утечки: 500 мА (риск пожара при токе утечки > 500 мА);
- уровни индикации, установленные пользователем:
  - порог для профилактического технического обслуживания:  $0,8 \times 100 = 80$  кОм;
  - порог для подачи сигнала о первом замыкании: 500 Ом.

#### Примечания:

- После длительного периода вывода из работы электроустановки, когда вся электроустановка или часть ее оставались обесточенными, из-за влажности может произойти снижение общего уровня сопротивления изоляции. Такая ситуация, обусловленная главным образом током утечки по сырой поверхности неповрежденной изоляции, не означает аварийного состояния изоляции. Сопротивление изоляции быстро восстановится, как только в результате нормального повышения температуры токоведущих частей снизится поверхностная влажность изоляции.
- Устройство контроля состояния изоляции (ХИ) способно измерять активную и емкостную составляющую тока утечки на землю в отдельности. Это позволяет на основании полного постоянного тока утечки определить истинное сопротивление изоляции.

### Случай двойного замыкания

Второе замыкание на землю в системе IT (если оно не происходит на том же проводнике, что и первое замыкание) представляет собой межфазное замыкание или замыкание между фазой и нейтралью. Независимо от того происходит ли оно в той же цепи, что и первое замыкание, или в другой цепи, устройства максимальной токовой защиты (плавкие предохранители или автоматические выключатели) нормально сработают, что приведет к автоматическому устранению короткого замыкания.

Уставки отключения максимальных токовых реле и номинальные токи срабатывания плавких предохранителей являются основными параметрами, которые определяют максимальную практическую длину цепи, которая может быть удовлетворительно защищена (этот вопрос рассматривается в подразделе 6.2).

**Примечание:** при нормальных обстоятельствах ток короткого замыкания проходит по общим РЕ-проводникам, соединяющим все открытые проводящие части электроустановки, и поэтому сопротивление цепи замыкания является достаточно низким для того, чтобы обеспечить необходимый уровень тока замыкания.

В случаях, когда цепи являются чрезмерно длинными, и, особенно, если бытовые электроприборы цепи заземлены отдельно (так, что ток короткого замыкания проходит по двум заземлителям), то надежное отключение с помощью максимальной токовой защиты может оказаться невозможным. В этом случае в каждой из цепей электроустановки рекомендуется установить по УЗО.

Однако, в случае, если система IT заземлена через сопротивление, необходимо следить за тем, чтобы УЗО было не слишком чувствительным, иначе первое замыкание может привести к нежелательному отключению.

Отключение защитных устройств, реагирующих на дифференциальный ток и удовлетворяющих стандартам МЭК, может происходить при величинах от  $0,5 I_{\Delta n}$  до  $I_{\Delta n}$ , где  $I_{\Delta n}$  — номинальный уровень уставки по дифференциальному току.

#### Методы определения уровней тока короткого замыкания

Достаточно точная оценка уровней тока короткого замыкания должна проводиться на этапе проектирования объекта.

На этом этапе тщательный анализ не требуется, поскольку величины токов важны только для соответствующих защитных устройств (например, нет необходимости определять сдвиги фаз), поэтому обычно применяются упрощенные приближенные методы, дающие заведомо заниженные оценки параметров. Такими практическими методами являются:

- «Метод полных сопротивлений», основанный на векторном суммировании всех полных сопротивлений цепи короткого замыкания.
- «Композиционный метод», дающий приближенную оценку тока короткого замыкания на дальнем конце цепи при известном уровне тока короткого замыкания на ближнем конце этой цепи. В этом методе полные сопротивления суммируются арифметически.

Обычно используются три расчетных метода:

- метод полных сопротивлений, основанный на суммировании векторов полных сопротивлений системы;
- композиционный метод;
- традиционный метод, основанный на предполагаемой величине падения напряжения и использовании специальных таблиц.



Программное обеспечение Ecodial основано на «методе полных сопротивлений».

Максимальная длина цепи с заземлением типа IT составляет :

■ для цепи с заземлением типа IT

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 \sqrt{3} S_{ph}}{2 \rho I_a (1+m)}$$

■ для трехфазной четырехпроводной схемы

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 S_1}{2 \rho I_a (1+m)}$$

■ «Традиционный метод», в котором предполагается, что минимальная величина напряжения на входе в поврежденную цепь оставляет 80% от номинального напряжения сети, а длины цепей определяются с помощью таблиц, основанных на этом допущении.

Данные методы дают надежные оценки лишь для случая, когда кабели и проводка, образующие цепь замыкания на землю, находятся в непосредственной близости друг от друга и не разделены ферромагнитными материалами.

## Метод полных сопротивлений

Данный метод, описанный в подразделе 6.2, идентичен для систем заземления IT и TN.

## Композиционный метод

Данный метод, описанный в подразделе 6.2, идентичен для систем заземления IT и TN.

## Традиционный метод (рис. F56)

Принцип этого метода для системы IT аналогичен тому, который описан в подразделе 6.2 для системы TN: расчет максимальных длин цепей, расположенных ниже автоматического выключателя или плавких предохранителей, при которых может быть обеспечена защита посредством максимальных токовых реле.

Очевидно, что нельзя проверить длины цепей для каждой возможной комбинации двух совпадающих во времени коротких замыканий.

Однако, все случаи можно учесть, если уставка отключения по максимальному току основана на допущении, что первое замыкание происходит на дальнем конце рассматриваемой цепи, а второе — на дальнем конце аналогичной цепи, как уже отмечалось выше в подразделе 3.4. В целом это может привести только к одному отключению (в цепи с более низким уровнем уставки отключения по максимальному току), в результате чего система останется в состоянии первого замыкания, но с одной отключенной неисправной цепью.

■ В случае трехфазной трехпроводной электроустановки второе замыкание может лишь вызвать межфазное короткое замыкание, поэтому в формуле для максимальной длины цепи в качестве напряжения следует использовать  $\sqrt{3} \cdot U_0$ .

Тогда максимальная длина цепи в метрах определится по формуле:

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 \sqrt{3} S_{ph}}{2 \rho I_a (1+m)}, \text{ м}$$

■ В случае трехфазной четырехпроводной электроустановки наименьшая величина тока замыкания будет тогда, когда одно из замыканий является замыканием на нулевой проводник. Тогда при расчете максимальной длины цепи в качестве напряжения следует использовать  $U_0$  и:

$$L_{\max} = \frac{0.8 U_0 S_1}{2 \rho I_a (1+m)}, \text{ м}$$

т.е. всего 50% от длины кабеля, допускаемой для системы TN1.

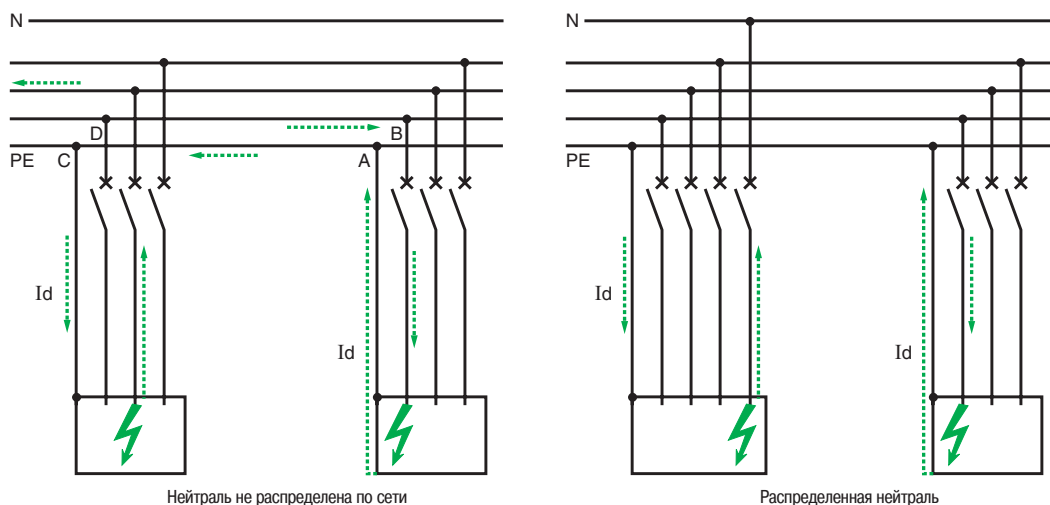


Рис. F56: Расчет величины  $L_{\max}$  для системы с заземлением типа IT. Показан путь тока для случая двойного замыкания

(1) Напоминание: При использовании схемы заземления TT отсутствует ограничение на длину цепи, поскольку защита обеспечивается применением УЗО высокой чувствительности.



В следующих таблицах<sup>(1)</sup> указана длина цепи, которая не должна превышать для обеспечения защиты людей от косвенного прикосновения с помощью защитных устройств.

В приведенных выше формулах:

$L_{\max}$  - максимальная длина цепи в метрах;

$U_0$  - фазное напряжение в вольтах (230 В для системы напряжением 230/400 В);

$\rho$  - удельное электрическое сопротивление при нормальной рабочей температуре в Ом·мм<sup>2</sup>/м (22,5 10<sup>-3</sup> для меди и 36 10<sup>-3</sup> для алюминия);

$I_a$  - уставка отключения по максимальному току в амперах или  $I_a$  — ток в амперах, необходимый для срабатывания плавкого предохранителя в течение установленного времени.

$$m = \frac{S_{ph}}{S_{PE}}$$

где:

$S_{PE}$  - площадь сечения защитного РЕ-проводника в мм<sup>2</sup>;

$S_1$  - площадь сечения нулевого проводника, если рассматриваемая цепь включает нулевой проводник;

$S_1$  - площадь сечения фазных проводников ( $S_{ph}$ ), если рассматриваемая цепь не включает в себя нулевой проводник.

## Таблицы

Приведенные ниже таблицы были составлены с помощью описанного выше «традиционного метода».

В них указаны максимальные длины цепей, при превышении которых омическое сопротивление этих проводников ограничит величину тока короткого замыкания до уровня ниже того, который требуется для срабатывания автоматического выключателя (или плавкого предохранителя), защищающего эту цепь, с достаточной быстротой, чтобы обеспечить защиту людей от косвенного прикосновения при двойном замыкании. В этих таблицах учитываются:

- тип защиты: автоматические выключатели или плавкие предохранители, уставки по току срабатывания;
- площади сечения фазных и защитных проводников;
- тип системы заземления;
- Поправочный коэффициент: в таблице на **рис. F57** представлены значения поправочного коэффициента, которые следует применять к длинам, указанным в таблицах F41 - F43, для системы IT.

## Пример

Цепь	Материал проводника	m = S <sub>ph</sub> /S <sub>PE</sub>			
		m = 1	m = 2	m = 3	m = 4
3 фазы	Медь	0.86	0.57	0.43	0.34
	Алюминий	0.54	0.36	0.27	0.21
3 фазы + нейтраль или 1 фаза + нейтраль	Медь	0.50	0.33	0.25	0.20
	Алюминий	0.31	0.21	0.16	0.12

**Рис. F57:** Поправочный коэффициент для длин, приведенных в таблицах F41 - F44 для систем TN

Трехфазная трехпроводная электроустановка на напряжение 230/400 В система заземления IT.

Одна из ее цепей защищена автоматическим выключателем типа В с номинальным током срабатывания 63 А и состоит из кабеля с алюминиевыми жилами с сечением фазных проводников 50 мм<sup>2</sup>. Используется РЕ-проводник из алюминия сечением 25 мм<sup>2</sup>. Какова максимальная длина цепи, ниже которой посредством электромагнитного расцепителя мгновенного действия, входящего в состав автоматического выключателя, обеспечивается гарантированная защита людей от опасности косвенного прикосновения?

Из таблицы на рис. F42 получаем длину 603 м, к которой должен быть применен поправочный коэффициент 0,36 (для алюминиевого проводника m = 2).

Таким образом, максимальная длина цепи составит 217 метров.

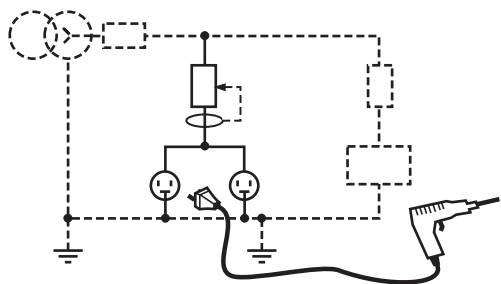
## 7.3 УЗО с высокой чувствительностью

Стандарт МЭК 60364-4-471 рекомендует использовать УЗО с высокой чувствительностью (≤ 30 мА) в следующих случаях (см. **рис. F58**):

- в цепях штепсельных розеток на номинальные токи ≤ 32 А в любых помещениях<sup>(2)</sup>;
- в цепях штепсельных розеток в сырых помещениях для всех номинальных токов<sup>(2)</sup>;
- в цепях штепсельных розеток во временных электроустановках<sup>(2)</sup>;
- в цепях, питающих помещения прачечных и плавательные бассейны<sup>(2)</sup>;
- в цепях питания рабочих площадок, домов-фургонов, прогулочных катеров и передвижных выставок-ярмарок<sup>(2)</sup>.

Установка УЗО может быть предусмотрена для отдельных цепей или групп цепей:

- Рекомендуется для цепей штепсельных розеток на ток ≥ 20 А и обязательна, если они предназначены для питания портативного оборудования для использования вне помещений.
- В некоторых странах это требование является обязательным для всех цепей штепсельных розеток на ток ≤ 32 А. Также рекомендуется ограничивать количество штепсельных розеток, защищаемых одним УЗО (например, 10 розеток на УЗО).



**Рис. F58:** Цепь питания штепсельных розеток

(1) Эти таблицы приведены в подразделе 6.2 (F41 - F44). Однако таблица поправочных коэффициентов (рис. F57), в которой учитываются отношение  $S_{ph}/S_{PE}$ , тип цепи (трехфазная трехпроводная, трехфазная четырехпроводная, однофазная двухпроводная) и материал проводника, является специфической для системы IT и отличается от такой же таблицы для системы TN.

(2) Эти случаи рассматриваются подробно.

## 7.4 Защита пожароопасных помещений

В некоторых странах защита посредством установки УЗО с чувствительностью 500 мА на входе цепи, питающей пожароопасное помещение, является обязательной (рис. F59).

Использование УЗО с чувствительностью 300 мА позволяет также обеспечить защиту от пожара.

## 7.5 Защита при большом полном сопротивлении цепи замыкания на землю

Когда ток двойного замыкания ограничен из-за очень большого сопротивления цепи замыкания, и поэтому максимальная токовая защита может не отключить цепь в течение нормативного времени, должны быть рассмотрены следующие дополнительные меры:

### Вариант решения 1 (рис. F60)

■ Необходимо установить автоматический выключатель с пониженным порогом срабатывания магнитного расцепителя мгновенного действия, например:

$$2I_n \leq I_{rm} \leq 4I_n$$

Это обеспечит защиту людей от поражения током в цепях аномально большой длины. При этом однако следует проверить, что большие переходные токи, например пусковые токи электродвигателей, не вызовут ложных срабатываний.

■ Решения, предложенные компанией Schneider Electric:

- автоматический выключатель Compact типа G ( $2I_n \leq I_{rm} \leq 4I_n$ );
- автоматический выключатель Multi 9 типа B.

### Вариант решения 2 (рис. F61)

Необходимо установить в рассматриваемой цепи УЗО. Такое устройство не обязательно должно иметь высокую чувствительность (от нескольких ампер до нескольких десятков ампер). Если предусмотрено использование штепсельных розеток, то в любом случае определенные цепи должны быть защищены УЗО с высокой чувствительностью ( $\leq 30$  мА); обычно одно УЗО устанавливается на несколько штепсельных розеток в цепи.

■ Решения, предложенные компанией Schneider Electric

- УЗО Multi 9 NG125:  $I_{\Delta n} = 1$  или  $3$  А;
- Vigicompact REH или REM:  $I_{\Delta n} = 3 - 30$  А.

### Вариант решения 3

Необходимо увеличить сечение РЕ-проводников и/или фазных проводников с тем, чтобы снизить сопротивление цепи двойного замыкания.

### Вариант решения 4 (рис. F62)

Необходимо установить дополнительные проводники уравнивания потенциалов. Это обеспечит такой же эффект, что и вариант решения 3, т.е. снижение сопротивления цепи двойного замыкания, но одновременно дополнительно усилит существующие меры защиты людей от напряжения прикосновения. Эффективность такого усовершенствования можно проверить, измерив сопротивления между каждой открытой проводящей частью и местным главным защитным проводником.

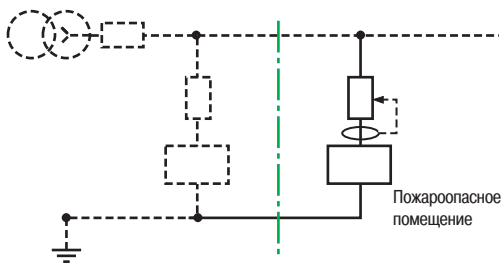


Рис. F59: Защита пожароопасного помещения

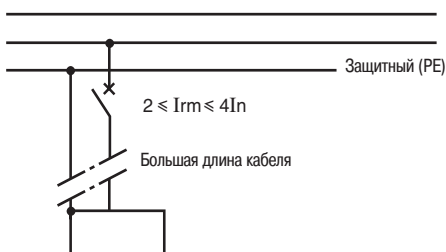


Рис. F60: Автоматический выключатель с магнитным расцепителем мгновенного действия с пониженной уставкой срабатывания

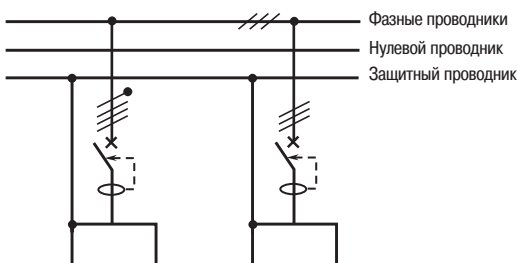


Рис. F61: Защита с помощью УЗО

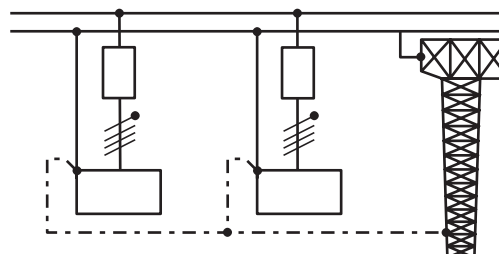


Рис. F62: Усовершенствованная схема уравнивания потенциалов

## 8 Устройства защитного отключения (УЗО)

### 8.1 Типы УЗО

Устройства защиты от токов утечки (УЗО) обычно встраиваются в следующие компоненты или связаны с ними:

- Выключатели в литом корпусе (МССВ) промышленного назначения в соответствии со стандартом МЭК 60947-2 и его приложениями В и М
- Автоматические выключатели (МСВ) промышленного назначения в соответствии со стандартом МЭК 60947-2 и его приложениями В и М
- Бытовые и аналогичные автоматические выключатели (МСВ) в соответствии со стандартами МЭК 60898, МЭК 61008, МЭК 61009
- Выключатель нагрузки тока утечки (ВДТ) в соответствии со специальными национальными нормами
- Дифференциальные реле с отдельными тороидальными (кольцевыми) трансформаторами тока в соответствии со стандартом МЭК 60947-2, Приложение М

УЗО должны использоваться на входе установок, заземленных по схеме ТТ, где их взаимодействие с другими УЗО обеспечивает селективное отключение, тем самым, обеспечивая требуемый уровень бесперебойности питания.

F36

Промышленные выключатели со встроенным УЗО определяются стандартом МЭК 60947-2 и его Приложением В

**Выключатели промышленного назначения со встроенным или совместимым модулем УЗО** (см. Рис. F63)



Промышленный выключатель  
Vigi Compact



Промышленный выключатель Multi 9 с шиной стандарта DIN и модулем УЗО Vigi



Рис. F63 : Промышленный выключатель с модулем УЗО

Поставляются выключатели токов утечки, включая блоки, смонтированные на шине по стандарту DIN (например, Compact или Multi 9), на которых может устанавливаться модуль УЗО (например, Vigi).

Такой комплект обеспечивает полный набор функций защиты (разъединение, защита от КЗ, перегрузки и замыканий на землю).

Бытовые выключатели со встроенным модулем УЗО определяются в стандартах МЭК 60898, МЭК 61008 и МЭК 61009

**Бытовые и аналогичные автоматические выключатели с модулем УЗО** (см. Рис. F64)



Вводные выключатели могут иметь выдержку времени и встроенный модуль УЗО (тип S).



Дифференциальные выключатели "Monobloc" Declic Vigi предназначены для защиты цепей со штепсельными розетками в жилых зданиях и на объектах сферы услуг.

Рис. F64 : Бытовые выключатели токов утечки (ВДТ) для защиты от утечек на землю

## 8 Устройства защитного отключения (УЗО)

УЗО - выключатели нагрузки (ВДТ) определяются специальными национальными нормами. Устройства УЗО с отдельными тороидальными трансформаторами тока определяются стандартом МЭК 60947-2 и его Приложением М

### УЗО с отдельным тороидальным трансформатором тока (см. Рис. F65)

Устройства УЗО с отдельными тороидальными трансформаторами тока могут использоваться вместе с выключателями или контакторами.



Рис. F65 : Устройства УЗО с отдельными тороидальными трансформаторами тока

F37

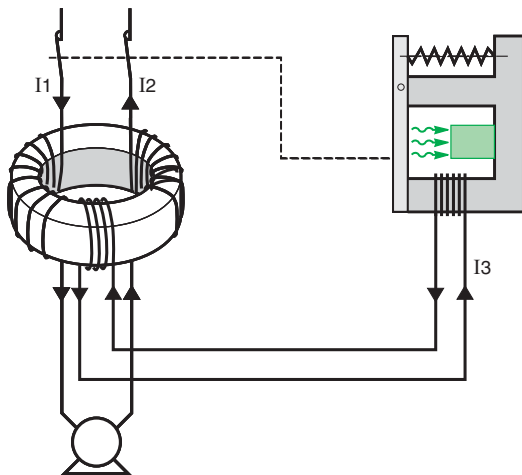


Рис. F66 : Принцип работы УЗО

### 8.2 Описание

#### Принцип работы

Принцип действия УЗО показан на Рис. F66 ниже

Магнитный сердечник охватывает все токоведущие проводники электрической цепи. Магнитный поток, генерируемый в сердечнике, зависит в любой момент от арифметической суммы токов, проходящих по первичным обмоткам; токи, проходящие в одном направлении, считаются положительными ( $I_1$ ), а в противоположном направлении – отрицательными ( $I_2$ ).

В неповрежденной цепи  $I_1 + I_2 = 0$ , отсутствует поток в магнитном сердечнике и эдс в его вторичной обмотке равна нулю.

Ток замыкания на землю ( $I_d$ ) проходит через одну из первичных обмоток до точки повреждения и возвращается к источнику через землю или через защитные проводники.

Поэтому, баланс токов в первичных обмотках, нарушается, и разность токов приводит к возникновению магнитного потока в сердечнике.

Разность токов известна как дифференциальный ток, а принцип называется принципом дифференциального тока или тока нулевой последовательности.

Получаемый переменный поток в сердечнике индуцирует эдс во вторичной обмотке дифференциального трансформатора. При этом ток  $I_3$  поступает на рабочую катушку магнитоэлектрической защелки. Если дифференциальный ток (ток утечки на землю) превышает значение, требуемое для срабатывания защелки, то непосредственно или через электронное реле, срабатывает соответствующий выключатель.

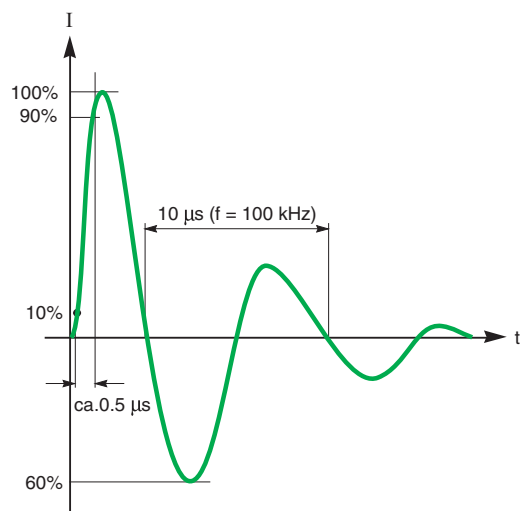
### 8.3 Чувствительность УЗО к помехам

В определенных случаях внешние воздействия могут нарушать работу УЗО:

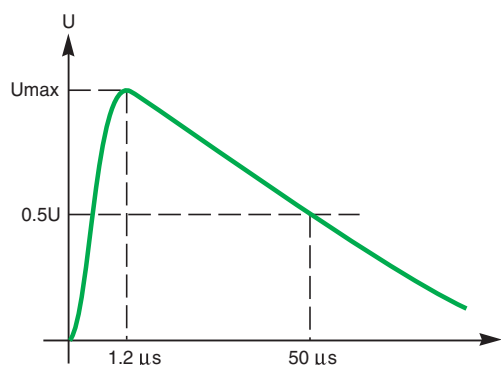
- «Ложное» срабатывание: выключение питания без наличия реальной опасности. Этот тип отключения носит повторяющийся характер, создавая неудобства и ухудшая качество электроснабжения пользователя.

- Неотключение в случае опасности. Менее ощутимое нарушение, чем ложное срабатывание. Этот тип нарушения подлежит тщательному изучению, поскольку снижает уровень безопасности пользователя.

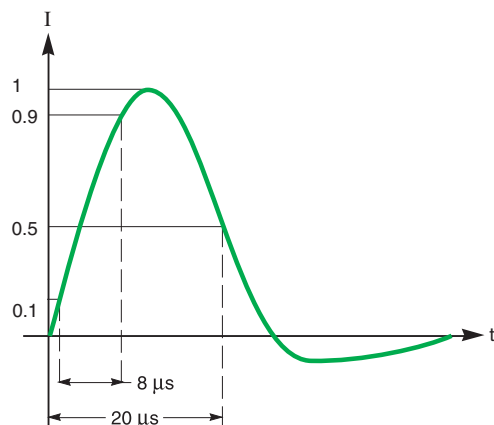
Поэтому, международные стандарты определяют 3 класса УЗО в зависимости от их устойчивости к такому типу нарушения (см. ниже).



**Рис. F67 :** Стандартная нестационарная волна тока 0,5  $\mu$ s/100 кГц



**Рис. F68 :** Стандартная нестационарная волна напряжения 1,2/50 мкс



**Рис. F69 :** Стандартная волна импульса тока 8/20 мкс

## Основные типы помех

### Фоновые токи утечки на землю

Каждая низковольтная установка имеет фоновый ток утечки на землю в силу следующего:

- Несимметрия внутренней емкости между проводниками под напряжением и землей для трехфазных цепей или

- Емкости между проводниками и землей в однофазных цепях

Чем больше установка, тем больше ее емкость и, как следствие, ток утечки.

Емкостной ток на землю иногда значительно повышается из-за фильтрующих конденсаторов, связанных с электронным оборудованием (автоматизация, оборудование передачи данных, компьютеры и т.д.).

При отсутствии более точных данных, фоновый ток утечки установки может оцениваться на основе следующих значений, измеряемых при 230В 50 Гц:

Однофазная или трехфазная линия: 1,5 мА/100 м

- Пол с подогревом: 1 мА/кВт

- Факс-терминал, принтер: 1 мА

- Микрокомпьютер, АРМ: 2 мА

- Копировально-множительное устройство: 1,5 мА

В соответствии со стандартами МЭК и многими национальными нормами, фоновый ток утечки должен быть ограничен до 0,25 А путем разделения цепей - это устраняет ложные срабатывания.

В особых случаях, таких как расширение или частичная реконструкция установок с заземлением по схеме IT, необходимо обращаться за консультацией к изготовителям устройств.

Высокочастотные составляющие (гармоники, переходные процессы и т.д.) присутствуют в источниках питания компьютерного оборудования, преобразователях, двигателях с регуляторами скорости, системах люминесцентного освещения и вблизи устройств переключения высокой мощности и батарей компенсации реактивной мощности.

Часть таких высокочастотных токов может течь на землю через паразитные емкости. Хотя они не представляют опасности для пользователя, такие токи могут вызывать отключение дифференциальных устройств.

### Включение

Подача напряжения на вышеуказанные емкости приводит к повышению высокочастотных неустановившихся токов крайне малой длительности, аналогичных показанным на **Рис. F67**.

Внезапное возникновение первого замыкания в системе IT также вызывает токи утечки на землю высокой частоты из-за резкого повышения напряжения между неповрежденными фазами и землей.

### Синфазные перенапряжения

Электросети подвержены перенапряжениям из-за ударов молнии или резких изменений режима работы системы (КЗ, срабатывание плавких предохранителей, переключение и т.д.). Такие резкие изменения часто вызывают высокие переходные напряжения и токи в индуктивных и емкостных цепях. Имеющиеся данные показывают, что в низковольтных системах перенапряжения, как правило, ниже 6 кВ и могут быть адекватно представлены традиционной импульсной волной 1,2/50 мкс.

Такие перенапряжения вызывают повышение неустановившихся токов, представляемых волной импульса тока традиционной формы 8/20 мкс с пиком в несколько десятков ампер (см. Рис. F69). Неустановившиеся токи текут на землю через емкости установки.

### Несинусоидальные токи повреждения (КЗ)

УЗО должно выбираться с учетом типа питаемой нагрузки. В частности, это требование применяется для устройств на основе полупроводников, для которых токи повреждения не всегда являются синусоидальными.

### Тип АС, А, В

Стандарт МЭК 60755 (Общие требования к устройствам токов утечки) определяет три типа устройств УЗО в зависимости от характеристик тока повреждения :

- Тип АС

Устройства УЗО, которые реагируют только на синусоидальные токи утечки.

- Тип А

Устройства УЗО, для которых отключение обеспечивается:

- для синусоидальных токов утечки,

- для пульсирующих токов утечки

# 8 Устройства защитного отключения (УЗО)

- Тип В
- Устройства УЗО, для которых отключение обеспечивается:
  - как для типа А
  - для чистых постоянных токов утечки, которые могут происходить от трехфазных выпрямителей.
- Низкие температуры:** в случае температур ниже - 5 °C, высокочувствительные электромеханические реле в устройстве УЗО могут отказывать из-за конденсации и промерзания. Устройства типа "Si" рассчитаны на температуры до - 25 °C.
- Атмосфера с высокими концентрациями химреагентов или пыли:** используются специальные сплавы для защиты УЗО от коррозии. Пыль может также блокировать перемещение механических частей.
- См. меры, которые должны приниматься в зависимости от уровней опасности, установленными нормами, на **Рис. F70**.
- Нормы определяют выбор защиты от утечки на землю и методы реализации такой защиты.
- Основные справочные документы:
  - Стандарт МЭК 60364-3:
  - Содержит классификацию (AFx) внешних воздействий в присутствии агрессивных или загрязняющих веществ.
  - Определяет выбор материалов в зависимости от внешних воздействий.

F39

Сеть с нарушениями	Сверхстойкие УЗО	SiE Устройства УЗО	SiE Устройства УЗО	SiE Устройства УЗО
	Тип А, если:			
Воздействие электросети	Станд. стойкие УЗО		+	+
	Тип AC		Соотв. дополн. защита (гермет. шкаф или секция)	дополн. защита (гермет. шкаф или секция + изб. давление)
Сеть без нарушений				
	AF1	AF2	AF3	AF4
	■ Внешние воздействия: пренебр. малы	■ Внешние воздействия: агрессивные или загрязняющие вещества в атмосфере	■ Внешние воздействия: периодич. или случайные воздействия определ. химикатов	■ Внешние воздействия: пост. воздействие агрессив. или загрязняющих веществ
	■ Хар-ки оборудования: норма.	■ Хар-ки оборудования: напр., стойкость к соляному туману или атм. загрязнителям	■ Хар-ки оборудования: защита от коррозии.	■ Хар-ки оборудования: спец. анализ воздействия химич. веществ.

Примеры объектов	Внешние воздействия
Металлоконструкции.	Сера, пары серы, сероводород.
Пристани, торговые порты, суда, береговые сооружения, судоверфи.	Соляные атмосферы, влажность, низкие температуры.
Плавательные бассейны, больницы, продуктовые магазины.	Хлорированные смеси.
НПЗ	Водород, горючие газы, окислы азота.
Фермы.	Сероводород.

Рис. F70 : Классификация внешних воздействий по стандарту МЭК 60364-3

Уровень устойчивости устройств УЗО Merlin Gerin

Серия Merlin Gerin включает разные типы устройств УЗО, обеспечивающих защиту от утечки на землю для каждой установки. Таблица ниже показывает выбор устройств в зависимости от типа возможных нарушений в месте установки.

Тип устройства	Ложные срабатывания	Несрабатывание			
		Ток повреждения		Низкие температуры (до - 25 °C)	Коррозия Пыль
		Высооч. ток утечки	Выпрямленный переменный Чистый постоянный		
AC	■				
A	■	■			
SI	■ ■ ■	■		■	
SiE	■ ■ ■	■		■	■
B	■ ■ ■	■	■	■	

Рис. F71 : Уровень устойчивости устройств УЗО Merlin Gerin

Защита от ложных срабатываний

УЗО типа Si/SiE предотвращают ложное срабатывание или несрабатывание в случае загрязненной сети, воздействия грозовых разрядов, высокочастотных токов, длинных волн и т.д. Рис. F72 ниже показывает уровни испытаний, которые проходят УЗО этого типа.

Тип нарушения	Контрольная волна	Устойчивость  Multi9 : ID-RCCB, DPN Vigi, Vigi C60, Vigi C120, Vigi NG125 SI / SiE type
Постоянные нарушения		
Гармоники	1 кГц	Ток утечки на землю = 8 x IΔn
Переходные процессы		
Перенапряжение от грозового разряда	Импульс 1.2/50 us (МЭК/EN 61000-4-5)	4,5 кВ между проводниками 5,5 кВ / землей
Ток, индуцированный грозовым разрядом	Импульс 8 / 20 us (МЭК/EN 61008)	Пик 5 кА
Переходный процесс при коммутации, косвенные грозовые токи	0,5 MS/100 кГц "кольцевая волна" (МЭК/EN 61008)	Пик 400 А
Срабатывание грозозащитного разрядника, емкостная нагрузка	Импульс 10 мс	500 А
Электромагнитная совместимость		
Переключения индуктивных нагрузок (люминесц. лампы, двигатели и т.д.)	Повторные всплески (МЭК 61000-4-4)	4 кВ / 400 кГц
Люминесц. лампы, цепи с тиристорным управлением и т.д.	Кондуктивные длинные волны (МЭК 61000-4-6)	66 мА (15 -150 кГц) 30 В (150 - 230 МГц)
Длинные волны (ТВ, радио, вещание, телекоммуникации и т.д.)	Излучаемые длинные волны 80 МГц - 1 ГГц (МЭК 61000-4-3)	30 В / м

Рис. F72 : Уровни испытаний УЗО Merlin Gerin



Рекомендации по установке УЗО с отдельными тороидальными трансформаторами тока нулевой последовательности

Детектором тока нулевой последовательности служит замкнутый магнитопровод (обычно кольцевой) высокой магнитной проницаемости со вторичной обмоткой; все это составляет тороидальный (или кольцевой) трансформатор тока, называемый трансформатором тока нулевой последовательности (ТТНП).

В силу высокой проницаемости, малейшее отклонение от идеальной симметрии проводников, охватывающих сердечник, и металлических частей (стальной корпус, элементы монтажной опоры и т.д.) может нарушать баланс МДС при больших токах нагрузки (пусковой ток двигателя, толчок тока намагничивания трансформатора и т.д.), вызывая ложное срабатывание УЗО

Если не принимаются специальные меры, отношение тока срабатывания  $I_{\Delta n}$  к максимальному фазному току  $I_{ph}$  (макс.) обычно меньше 1/1000.

Этот предел может быть значительно увеличен (т.е., снижена чувствительности к возмущениям) посредством мер, указанных на Рис. F73 и Рис. F74.

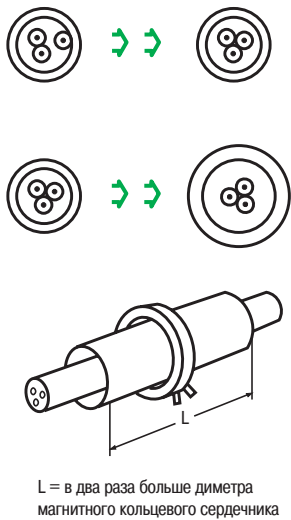


Рис. F73 : Три меры по снижению отношения  $I_{\Delta n} / I_{ph}$  (макс.)

Меры	Диаметр (мм)	Коефф. снижения чувствительности
Центровка кабелей в окне магнитопровода		3
Увеличение диаметра кольц. сердечника	$\varnothing 50 \rightarrow \varnothing 100$	2
	$\varnothing 80 \rightarrow \varnothing 200$	2
	$\varnothing 120 \rightarrow \varnothing 300$	6
Использование экранирующей втулки из стали или мягкого железа	$\varnothing 50$	4
■ Толщина стенки 0,5 мм	$\varnothing 80$	3
■ Длина 2 x внутр. диам. кольц. сердечника	$\varnothing 120$	3
■ Полное окружение проводников и одинаковое перекрытие кольцевого сердечника на обоих концах	$\varnothing 200$	2

Эти меры могут объединяться. При центровке кабелей в кольцевом сердечнике диаметром 200 мм (при достаточном диаметре 50 мм) и использовании втулки отношение 1/1000 снижается до 1/30000.

Рис. F74 : Способы снижения отношения  $I_{\Delta n} / I_{ph}$  (макс.)



F42

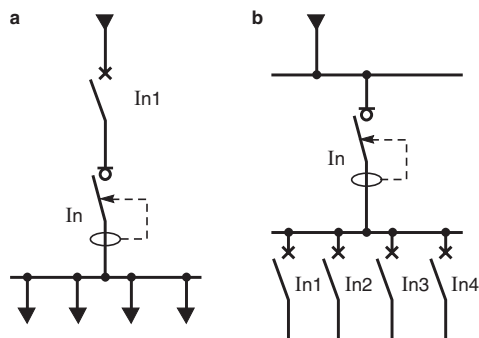


Рис. F75 : Выключатели дифференциального тока (ВДТ)

### Выбор характеристик дифференциального выключателя (УЗО-выключателя нагрузки)

#### Номинальный ток

Номинальный ток дифференциального выключателя или ВДТ (аппарата, имеющего ограниченную отключающую способность) выбирается в зависимости от максимального установившегося тока нагрузки.

■ Если ВДТ располагается последовательно за автоматическим выключателем, то рабочий ток обоих выключателей одинаков, но должно соблюдаться условие  $I_n > I_{n1}(1)$  (см. Рис. F75a)

■ Если ВДТ расположен перед группой цепей, защищенных автоматическими выключателями (см. Рис. F75b), номинальный ток ВДТ рассчитывается следующим образом:

$$I_n \geq k_u \times k_s (I_{n1} + I_{n2} + I_{n3} + I_{n4})$$

#### Требования к электродинамической устойчивости

Защита от КЗ должна обеспечиваться предвключенным устройством защиты от КЗ. Если ВДТ расположен в одном распределительном устройстве (согласно нормам) с выключателем (или плавким предохранителем) перед ним, защита от КЗ, обеспечиваемая такими устройствами, считается приемлемой. Необходима координация работы ВДТ и устройств защиты от КЗ. Как правило, изготовители приводят таблицы возможных комбинаций ВДТ и выключателей или плавких предохранителей (см. Рис. F76).

Возможные комбинации выключателя и ВДТ – Отключающая способность  $I_{cs}$  (действ.знач.), кА

Выключатель перед ВДТ	DT40	DT40N	C60N	C60H	C60L	C120N	C120H	NG125N	NG125H	
ВДТ 2P 230 В	I 20A	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	3	4.5	4.5	4.5
	IN-A 40A	6	10	20	30	30	10	10	15	15
	IN-A 63A	6	10	20	30	30	10	10	15	15
	I 100A						15	15	15	15
ВДТ 4P 400 В	I 20A	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2	3	3	3
	IN-A 40A	6	10	10	15	15	7	7	15	15
	IN-A 63A	6	10	10	15	15	7	7	15	15
	NG 125NA						10	16	25	50

Возможные комбинации плавких предохранителей и ВДТ – Отключающая способность  $I_{cs}$  (действ.знач.), кА

gGПредохранитель перед ВДТ	20A	63A	100A	125A
ВДТ 2P 230 В	I 20A	8		
	IN-A 40A		30	20
	IN-A 63A		30	20
	I 100A		6	
ВДТ 4P 400 В	I 20A	8		
	IN-A 40A		30	20
	IN-A 63A		30	20
	NG 125NA			50

Рис. F76 : Типовая таблица изготовителей для выбора комбинация ВДТ и выключателей или плавких предохранителей (изделия компании Merlin Gerin)

	Содержание	
<b>1</b>	<b>Общие положения</b>	<b>G2</b>
	1.1 Методика и определения	G2
	1.2 Принципы защиты от токовых перегрузок	G4
	1.3 Практические значения для схемы защиты	G4
	1.4 Расположение защитных устройств	G6
	1.5 Параллельное соединение проводов	G6
<b>2</b>	<b>Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи</b>	<b>G7</b>
	2.1 Общие положения	G7
	2.2 Общие принципы прокладки кабелей	G7
	2.3 Рекомендуемый упрощенный метод определения сечения кабелей	G16
	2.4 Шинопроводы	G18
<b>3</b>	<b>Расчет потерь напряжения</b>	<b>G20</b>
	3.1 Максимальная потеря напряжения	G20
	3.2 Расчет потери напряжения при постоянной нагрузке	G21
<b>4</b>	<b>Ток короткого замыкания</b>	<b>G24</b>
	4.1 Ток короткого замыкания на зажимах вторичной обмотки понижающего распределительного трансформатора	G24
	4.2 Ток трехфазного короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) в любой точке установки низкого напряжения	G25
	4.3 Ток $I_{sc}$ в конце линии в зависимости от $I_{sc}$ в ее начале	G28
	4.4 Ток короткого замыкания, подаваемый от генератора переменного тока или инвертора	G32
<b>5</b>	<b>Частные случаи тока короткого замыкания</b>	<b>G30</b>
	5.1 Расчет минимальных величин тока короткого замыкания	G30
	5.2 Проверка кабелей на нагрев токами короткого замыкания	G35
<b>6</b>	<b>Нулевой защитный проводник (PE)</b>	<b>G37</b>
	6.1 Схема соединений и выбор провода	G37
	6.2 Выбор сечения провода	G38
	6.3 Защитный провод между понижающим трансформатором и главным распределительным щитом	G40
	6.4 Эквипотенциальный проводник	G41
<b>7</b>	<b>Нейтральный провод</b>	<b>G42</b>
	7.1 Определение сечения нейтрального провода	G42
	7.2 Защита нейтрального провода	G44
	7.3 Отключение нейтрального провода	G44
	7.4 Изоляция нейтрального провода	G44
<b>8</b>	<b>Пример расчета кабелей</b>	<b>G46</b>

Элементы электрической сети и их защита определяются с учетом удовлетворения всех нормальных и аварийных эксплуатационных ограничений

## 1.1 Методика и определение

### Методика (см. рис. G1)

После предварительного анализа потребляемой мощности установки, который описан в главе В пункте 4, проводится изучение кабельной сети<sup>(1)</sup> и её электрической защиты, начиная от источника через промежуточные ступени к конечным цепям.

Кабельная сеть и ее защита на каждом уровне должны удовлетворять одновременно нескольким условиям, с целью обеспечения безопасности и надежности установки:

- сеть должна проводить длительно ток полной нагрузки и нормальные кратковременные токи перегрузки;
- сеть не должна допускать отклонений напряжения, способных привести к низкой производительности при определенных нагрузках, например, чрезмерно долгий пуск двигателя и т.д.

Более того, защитные устройства (автоматические выключатели или предохранители) должны:

- защищать кабельные сети и шины от токовых перегрузок любой величины, включая токи короткого замыкания;
- обеспечивать защиту персонала от опасности косвенного прикосновения, в особенности, в системах заземления TN и IT, где длина цепи может ограничивать величину токов короткого замыкания, таким образом, задерживая автоматическое отключение (нужно помнить, что установки с системой заземления TT обязательно должны быть защищены на входе устройством дифференциальной защиты (УЗО), обычно на номинальный ток 300 мА).

Площади поперечного сечения проводов определяются по общему методу, описанному в подпункте 1.2 текущей главы. Кроме этого метода, некоторые национальные стандарты могут предписывать минимальное значение площади поперечного сечения, которое необходимо соблюдать с целью обеспечения механической стойкости. Определенные нагрузки (как указывается в главе М) требуют, чтобы питающий их кабель имел увеличенное сечение, и чтобы защита цепи была необходимым образом модифицирована.



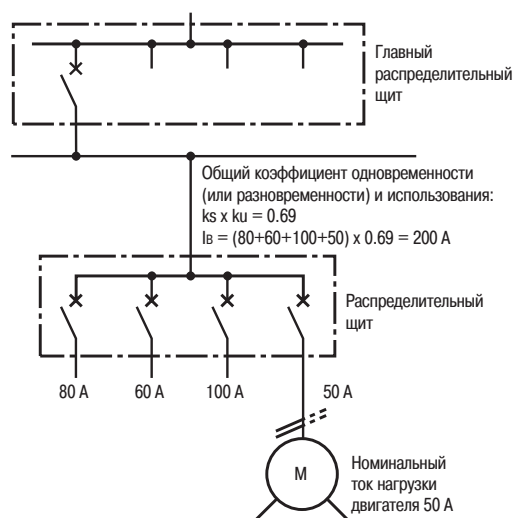
Рис. G1: Логическая схема для выбора сечения кабеля и защитного устройства для заданной цепи

(1) Термин «кабельная сеть» в данной главе подразумевает все изолированные провода, включая многожильные и одножильные кабели, и изолированные провода, проложенные в трубах и т.д.

## Определения

### Максимальный ток нагрузки: $I_b$

- На последнем уровне цепи, этот ток соответствует номинальной мощности нагрузки. В случае запуска двигателя или других нагрузок, при которых возникает большой начальный бросок тока, в особенности там, где происходит быстрый запуск (например двигатели лифтов, точечная сварка и т.д.), должно быть учтено суммарное тепловое действие токовых перегрузок. Этому воздействию подвергаются как кабели, так и тепловые реле.
- На всех верхних уровнях цепи этот ток соответствует полной потребляемой мощности, с учетом коэффициентов одновременности (разновременности) и использования,  $k_s$  и  $k_u$  соответственно, как показано на **рис. G2**.



**Рис. G2:** Расчет максимального тока нагрузки  $I_b$

### Максимально допустимый ток: $I_z$

Это максимальный ток, который кабель может проводить неограниченно долго, без снижения его номинального срока службы.

Ток для данного сечения проводов зависит от нескольких параметров:

- тип кабеля и кабелепровода (проводники из меди или алюминия, изоляция из поливинилхлорида или пропилена и количество активных проводников);
- температура окружающей среды;
- способ монтажа;
- влияние соседних цепей.

### Токовые перегрузки

Токовая перегрузка возникает каждый раз, когда величина тока превышает максимально допустимый ток.

Этот ток необходимо отключать за кратчайшее время, которое зависит от его амплитуды, чтобы не допустить неустраняемое повреждение кабеля (и оборудования, если токовая перегрузка вызвана неисправным элементом нагрузки).

Однако токовые перегрузки относительно короткой продолжительности могут возникать во время нормальной работы. Различают два типа токовых повреждений:

#### ■ Перегрузки

Эти токовые перегрузки могут возникать в исправных электрических цепях, например, из-за ряда небольших кратковременных нагрузок, случайно возникающих время от времени, нагрузки при запуске двигателя и т.д. Если любое из этих условий будет продолжаться дольше заданного времени (в зависимости от настроек защитных реле и параметров предохранителей), цепь будет автоматически отключена.

#### ■ Токи короткого замыкания

Эти токи являются результатом пробоя изоляции между фазными проводами или/и между фазными проводами и землей (в системах с нейтральным проводом, заземленным через низкое сопротивление) в любой комбинации, а именно:

- короткое замыкание трех фаз (и с нейтралью и/или землей, или нет);
- короткое замыкание двух фаз (и с нейтралью и/или землей, или нет);
- короткое замыкание одной фазы с нейтралью (и/или с землей).

## 1.2 Принципы защиты от токовых перегрузок

Защитное устройство устанавливается на входе рассматриваемой цепи (см. **рис. G3** и **рис. G4**).

■ Срабатывает на отключение тока за время, меньшее, чем определяемое характеристикой  $I^2t$  кабеля.

■ Но допускает протекание максимального тока нагрузки  $I_b$  неограниченно долго.

Характеристики изолированных проводов, когда по ним текут токи короткого замыкания, для промежутка времени до 5 секунд после возникновения короткого замыкания, могут быть приблизительно определены по формуле:

$I^2t = k^2 S^2$ , которая показывает, что допустимое количество вырабатываемого тепла пропорционально квадрату площади поперечного сечения провода,

где:

$t$  - продолжительность тока короткого замыкания (с)

$S$  - величины изолированного проводника ( $\text{мм}^2$ )

$I$  - ток короткого замыкания (А, средневектр. значение)

$k$  - постоянная изолированного провода (значения  $k^2$  приведены на рис. G54)

Для данного изолированного провода, максимально допустимый ток изменяется в зависимости от окружающей среды. Например, при высокой температуре окружающей среды ( $\theta_{a1} > \theta_{a2}$ ),  $I_{z1}$  меньше, чем  $I_{z2}$  (см. **рис. G5**).  $\theta$  означает «температура».

**Примечание:**

□  $I_{sc}$  - ток трехфазного короткого замыкания;

□  $I_{scb}$  - номинальный ток отключения (отключающая способность);

□  $I_r$  (или  $I_{rth}$ )<sup>(1)</sup> - регулируемая «номинальная» величина тока, например, автоматический выключатель на номинальный ток 50 А может быть отрегулирован на защитный диапазон, т.е. на стандартный уровень отключения при токовой перегрузке (см. **рис. G6** на сл. стр.), подобный диапазону автоматического выключателя на 30 А.

## 1.3 Практические значения для схемы защиты

Следующие методы основаны на правилах, изложенных в стандартах МЭК, и используются на практике во многих странах.

### Общие правила

Защитное устройство (автоматический выключатель или предохранитель) работает исправно, если:

■ его номинальный ток или ток установки  $I_n$  больше, чем ток максимальной нагрузки  $I_b$ , но меньше, чем максимально допустимый ток  $I_z$  для цепи, т.е.  $I_b \leq I_n \leq I_z$ , что соответствует зоне «а» на рис. G6;

■ «стандартная» уставка его тока отключения  $I_2$  меньше, чем  $1.45 I_z$ , что соответствует зоне «b» на рис. G6 (ток  $I_2$  учитывает неточность изготовления защитного аппарата. Для автоматов он на 10-40 % превышает ток  $I_r$  или  $I_n$ ).

«Стандартное» время отключения может быть 1 или 2 часа, согласно местным стандартам и фактическому значению, выбранному для  $I_2$ . Для предохранителей,  $I_2$  – это ток (обозначаемый как  $I_r$ ), при котором предохранитель сработает со стандартной выдержкой времени.

■ Его отключающая способность больше, чем ток трехфазного короткого замыкания, существующий в месте его установки. Этому соответствует зона «с» на рис. G6.

G4

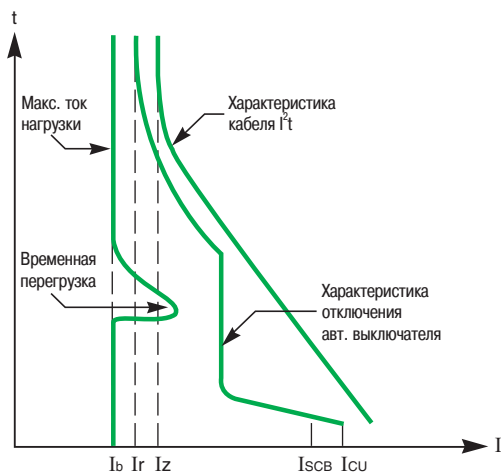


Рис. G3: Защита цепи автоматическим выключателем

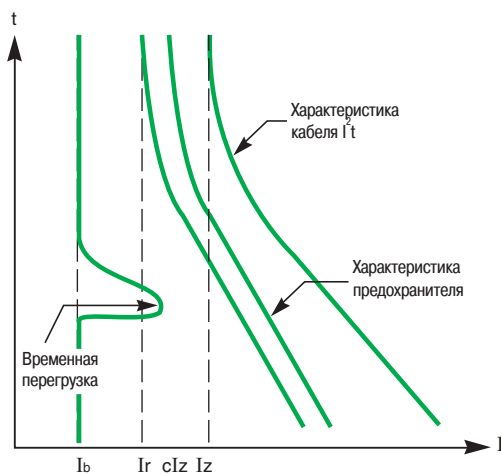


Рис. G4: Защита цепи предохранителями

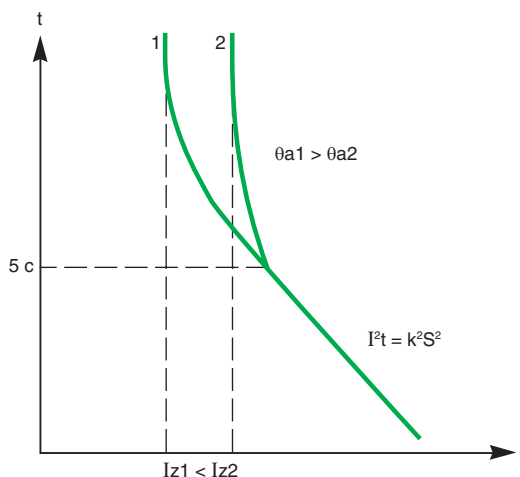


Рис. G5: Характеристика  $I^2t$  изолированного провода для двух различных температур окружающей среды

(1) Оба обозначения широко используются в различных стандартах.

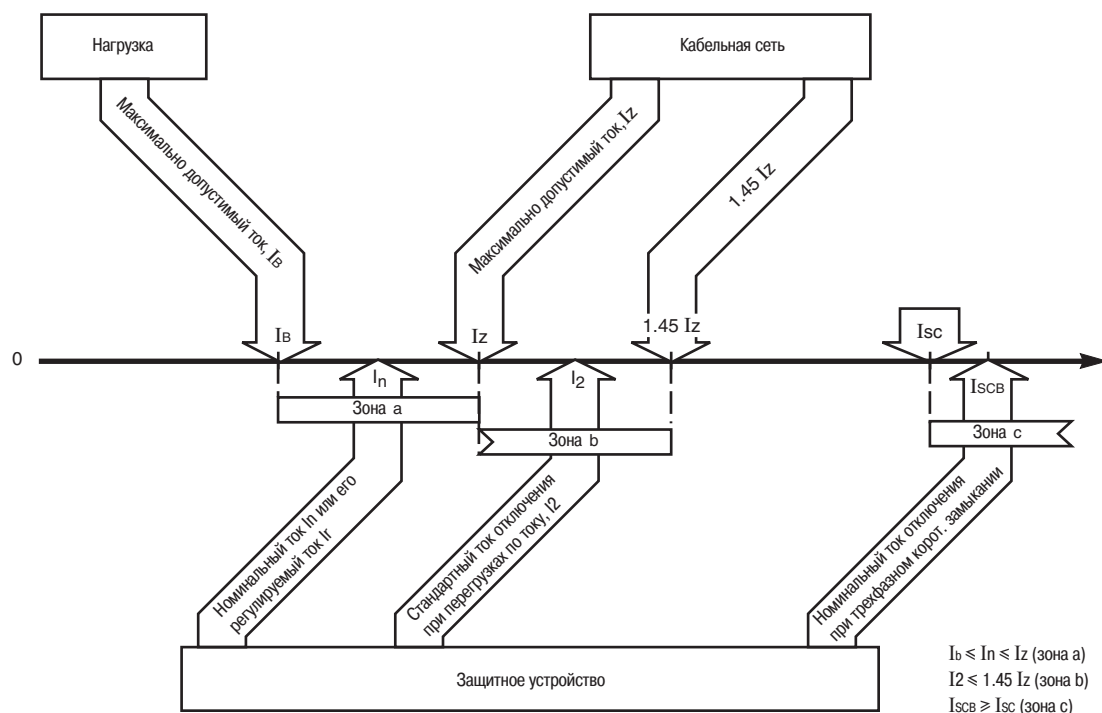


Рис. G6: Величины тока для определения характеристик автоматического выключателя или предохранителя

## Применение

### ■ Защита автоматическим выключателем

Благодаря высокому уровню точности ток  $I_2$  всегда меньше, чем  $1.45 I_n$  (или  $1.45 I_r$ ), поэтому условие  $I_2 \leq 1.45 I_z$  (как указано выше в «общих правилах») будет всегда выполняться.

### □ Частный случай

Если сам автоматический выключатель не защищает от перегрузок, необходимо, чтобы во время наименьшего значения тока короткого замыкания была обеспечена исправная работа устройства максимальной токовой защиты, защищающего цепь. Этот частный случай рассмотрен в подпункте 5.1.

### ■ Защита предохранителями

Условие  $I_2 \leq 1.45 I_z$  должно быть также учтено, где  $I_2$  – ток перегорания предохранителя (уровень перегорания), равный  $k_2 \times I_n$  ( $k_2$  лежит в пределах от 1.6 до 1.9) в зависимости от конкретного предохранителя.

Добавочный коэффициент  $k_3$  был введен ( $k_3 = k_2 / 1.45$ ) с тем, чтобы условие  $I_2 \leq 1.45 I_z$  выполнялось при  $I_n \leq I_z / k_3$ .

Для предохранителей типа gG:

$I_n < 16A \rightarrow k_3 = 1.31$

$I_n \geq 16A \rightarrow k_3 = 1.10$

Более того, отключающая способность предохранителя  $I_{scf}$  должна превышать величину тока при трехфазном коротком замыкании в месте установки предохранителя(ей).

### ■ Комбинация различных защитных устройств

Использование защитных устройств, отключающая способность которых ниже, чем фактические, существующие в месте их установки токи КЗ, разрешено МЭК и многими национальными стандартами при выполнении следующих условий:

- на верхнем уровне цепи существует другое защитное устройство, которое имеет необходимые параметры срабатывания при коротких замыканиях;
- ток и время срабатывания этого устройства, т.е. количество передаваемой энергии ( $I^2t$ ), поступающей в расположенную за ним установку (устройства защиты, кабели, оборудование), должны быть меньше, чем может выдержать оборудование защищаемой установки.

На практике такое расположение обычно используется:

- при соединении автоматических выключателей/предохранителей;
- при способе соединения, известном как «каскадное включение» или «режим последовательного включения», в котором высокие показатели по ограничению тока некоторых автоматических выключателей эффективно снижают токи коротких замыканий ниже по цепи.

Возможные комбинации, которые были испытаны в лабораториях, указаны в соответствующих каталогах производителя.

Критерии для автоматических выключателей:

$I_b \leq I_n \leq I_z$  и  $I_{scb} \geq I_{sc}$ .

Критерии для предохранителей:

$I_b \leq I_n \leq I_z / k_3$  и  $I_{scf} \geq I_{sc}$ .

Защитное устройство, в общем случае, необходимо на входе каждой цепи.

## 1.4 Расположение защитных устройств

### Общее правило (см. рис. G7a )

Защитное устройство необходимо на входе каждой цепи, где возникает снижение величины максимально допустимого тока.

### Возможные варианты расположения в определенных обстоятельствах (см. рис. G7b )

Защитное устройство может располагаться не в начале цепи:

- если участок АВ не имеет поблизости горючих материалов;
- если на уровнях сети ниже участка АВ нет розеточных подключений или ответвлений сети.

На практике могут использоваться три случая:

- Случай (1) на схеме
- $AB \leq 3$  метра;
- АВ выполнен с применением мер по уменьшению риска возникновения короткого замыкания до практического минимума (например, провода в толстостенной стальной трубе).
- Случай (2)
- Устройство P1 на верхнем уровне защищает участок АВ от коротких замыканий в соответствии с подпунктом 5.1.
- Случай (3)
- устройство защиты от перегрузки S установлено рядом с нагрузкой. Такое расположение удобно для цепей двигателей. Устройство S осуществляет защиту и управление (пуск/останов) и защиту от перегрузки двигателя, а SC представляет собой либо автоматический выключатель (спроектированный для защиты двигателя), либо предохранители типа M;
- защита от короткого замыкания SC, расположенная на входе цепи, соответствует принципам, изложенным в подпункте 5.1.

### Цепи без защиты (см. рис. G7c )

Возможны два случая:

- Защитное устройство P1 калибровано для защиты кабеля S2 от перегрузок и коротких замыканий.
- Там, где отключение цепи может вызывать опасность, например:
  - цепи возбуждения вращающихся машин;
  - цепи больших подъемных электромагнитов;
  - вторичные цепи трансформаторов тока.

Отключение цепей не допускается, поэтому защита кабеля имеет второстепенное значение.

## 1.5 Параллельное соединение проводов

Провода одинакового сечения, одинаковой длины и из одинакового материала могут быть соединены параллельно.

Максимально допустимый ток равен сумме допустимых токов каждого отдельного провода в пучке, с учетом явления взаимного нагрева, способа монтажа и т.д. Защита от перегрузок и коротких замыканий аналогична защите однопроводных цепей.

Необходимо принять следующие меры предосторожности во избежание опасности возникновения коротких замыканий параллельно соединенных кабелей:

- дополнительная защита от механических повреждений и влаги;
- кабельная трасса не должна проходить в непосредственной близости от горючих материалов.

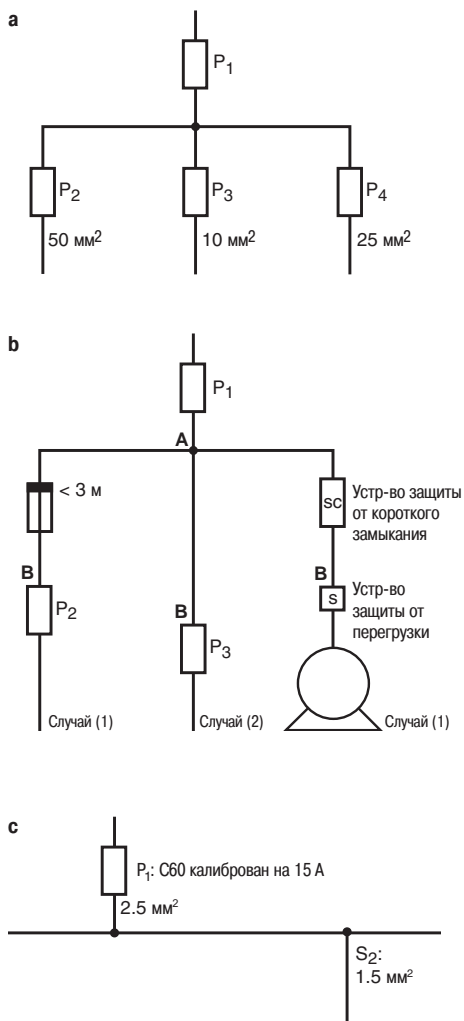


Рис. G7: Расположение защитных устройств

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

### 2.1. Общие положения

Изучение кабельной сети проводится в соответствии с международным стандартом МЭК 60364-5-52 «Электрические установки зданий. Часть 5-52: Выбор и монтаж электрооборудования. Система электропроводки».

В этом разделе рассматриваются требования данного стандарта с указанием примеров наиболее распространенных способов монтажа. Значения пропускной способности по току проводов для всех различных вариантов монтажа указаны в приложении А к стандарту. Упрощенный метод использования данных таблиц приложения А приводится в информативном приложении В к стандарту.

### 2.2. Общие принципы прокладки кабелей

#### Возможные способы монтажа, используемые для различных типов проводов или кабелей

На **рис. G8** показаны различные применяемые способы монтажа с указанием различных типов проводов и кабелей.

Провода и кабели		Способ монтажа							
		Без крепления	Крепление непосред. с помощью зажимов	В кабельном канале	В кабельном коробе (включая окаймляющий короб, встроенный в пол короб)	Кабельный трубопровод	Кабел. лестница Кабельный лоток Кабельные кронштейны	На изоляторах	Несущий трос
Неизолированные провода		—	—	—	—	—	—	+	—
Изолированные провода		—	—	+	+	+	—	+	—
Кабели в оболочке (в том числе бронированные кабели и кабели в оболочке, пропитанной минеральным маслом)	Многожильный кабель	+	+	+	+	+	+	0	+
	Одножильный кабель	0	+	+	+	+	+	0	+

+ Разрешен.

— Не разрешен.

0 Не применяется или обычно не используется на практике.

**Рис. G8:** Выбор способа прокладки кабелей (таблица 52-1 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)



Возможные способы монтажа для различных вариантов применения

Различные способы монтажа могут использоваться для различных вариантов применения. На рис. G9 показаны возможные комбинации.

Номер, указанный в таблице, обозначает различные рассматриваемые системы электропроводки (см. также рис. G10).

Варианты монтажа	Способ монтажа							
	Без крепле-ния	Крепление с помощью зажимов	В трубах	В кабельном коробе	В кабель-ном канале	Кабельные полки, кабельный лоток, кронштейны	На изоляторах	Несущий трос
Пустые полости в зданиях	40, 46, 15, 16	0	15, 16, 41, 42	–	43	30, 31, 32, 33, 34	–	–
Кабельный канал	56	56	54, 55	0	44, 45	30, 31, 32, 33, 34	–	–
Подземная прокладка	72, 73	0	70, 71	–		70, 71	0	–
Внутри конструкции	57, 58	3	1, 2, 59, 60	50, 51, 52, 53	44, 45	0	–	–
Наружный монтаж	–	20, 21	4, 5	6, 7, 8, 9, 12, 13, 14, 22, 23	6, 7, 8, 9	30, 31, 32, 33, 34	36	–
Воздушная прокладка	–	–	0	10, 11	–	30, 31, 32, 33, 34	36	35
Утопленный монтаж	80	80	0	–	0	0	–	–

– Не разрешен.  
0 Не применяется или обычно не используется на практике.

Рис. G9: Монтаж кабелей (таблица 52-2 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

G8

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

### Примеры систем электропроводки и соответствующих способов монтажа

На рис. G10 показаны некоторые из многочисленных различных вариантов электропроводки и способов монтажа.

Определяются некоторые основные способы монтажа (обозначены буквенным кодом от А до G), объединенные в группы с одинаковыми характеристиками в отношении пропускной способности по току системы электропроводки.

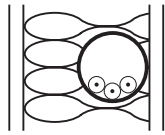
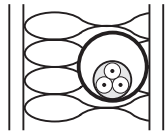
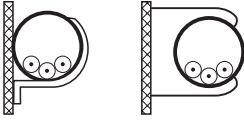
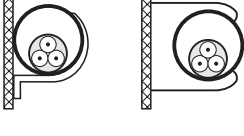
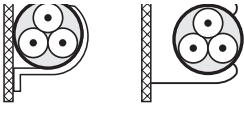
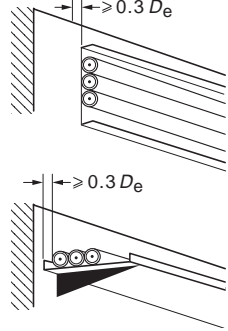
Номер варианта	Способ монтажа	Описание	Способ монтажа, применяемый для обеспечения пропускной способности по току
1	 Помещение	Изолированные провода или одножильные кабели в кабельном канале в стене с термоизоляцией	A1
2	 Помещение	Многожильные кабели в кабельном канале в стене с термоизоляцией	A2
4		Изолированные провода или одножильные кабели в трубе на деревянной стене, на каменной стене или проложенные на расстоянии от стены, меньшем 0,3 диаметра трубы	B1
5		Многожильный кабель в трубе на деревянной стене, на каменной стене или проложенный на расстоянии от стены, меньшем 0,3 диаметра кабельного канала	B2
20		Одножильные или многожильные кабели: - прикрепленные к стене или проложенные на расстоянии от деревянной стены, меньшем 0,3 диаметра кабеля	C
30		На неперфорированном кабельном лотке	C

Рис. G10: Примеры способов монтажа (часть таблицы 52-3 согласно стандарту МЭК 60364-5-52) (продолжение на следующей странице)

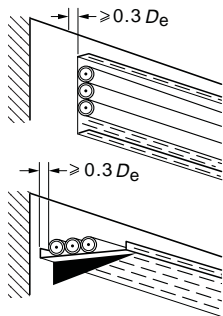

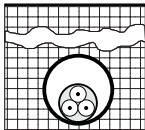
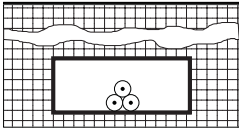
Номер варианта	Способ монтажа	Описание	Способ монтажа, применяемый для обеспечения пропускной способности по току
31		На перфорированном кабельном лотке	Е или F
36		Не изолированные или изолированные провода на изоляторах	G
70		Многожильные кабели в кабельном канале или в трубах, уложенных в земле	D
71		Одножильный кабель в кабельном канале или в трубах, уложенных в земле	D

Рис. G10: Примеры способов монтажа (часть таблицы 52-3 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

Максимальная рабочая температура

Значения предельной пропускной способности по току, указанные в последующих таблицах, определены с таким расчетом, чтобы максимальная температура изоляции не превышалась в течение длительного периода времени.

На рис. G11 указаны значения максимальной допустимой температуры для различных типов изоляционных материалов.

Тип изоляции	Температ. предел, °C
Поливинилхлорид (ПВХ)	70 на проводнике
Сшитый полиэтилен (XLPE) и этиленпропиленовый каучук (EPR)	90 на проводнике
Минеральная (ПВХ с покрытием или без покрытия открытого доступа)	70 на оболочке
Минеральная (без покрытия, без открытого доступа и вне контакта с горючими материалами)	105 на оболочке

Рис. G11: Значения максимальной рабочей температуры для различных типов изоляции (таблица 52-4 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

Поправочные коэффициенты

Чтобы учесть условия окружающей среды или особые условия при прокладке кабелей и проводов, используются поправочные коэффициенты.

Площадь поперечного сечения кабелей определяется с использованием номинального значения тока нагрузки I<sub>b</sub>, деленного на различные поправочные коэффициенты: k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, ...:

$$I'_{b} = \frac{I_b}{k_1 \cdot k_2}$$

I'б является откорректированным (поправленным) значением тока нагрузки, которое сравнивается со значением пропускной способности по току соответствующего кабеля.

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

### ■ Температура окружающей среды

Расчет пропускной способности по току кабелей, проложенных в воздухе, основывается на использовании среднего значения температуры воздуха, равного 30 °С. Для других значений температуры применяются поправочные коэффициенты, указанные на рис. G12 для изоляции из ПВХ (PVC), этиленпропиленового каучука (EPR) и сшитого полиэтилена (XLPE).

Ниже даны значения поправочного коэффициента  $k_1$ .

Температура окружающей среды, °С	Изоляция	
	ПВХ (PVC)	Сшитый полиэтилен (XLPE) Этиленпропиленовый каучук (EPR)
10	1.22	1.15
15	1.17	1.12
20	1.12	1.08
25	1.06	1.04
35	0.94	0.96
40	0.87	0.91
45	0.79	0.87
50	0.71	0.82
55	0.61	0.76
60	0.50	0.71
65	-	0.65
70	-	0.58
75	-	0.50
80	-	0.41

**Рис. G12:** Поправочные коэффициенты для температуры воздуха, отличной от 30 °С, используемые для расчета пропускной способности по току кабелей в воздухе (таблица A.52-14 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

Расчет пропускной способности по току кабелей, проложенных в земле, основывается на использовании среднего значения температуры почвы, равного 20 °С. Для других значений температуры применяются поправочные коэффициенты, указанные на рис. G13 для изоляции из ПВХ (PVC), этиленпропиленового каучука (EPR) и сшитого полиэтилена (XLPE).

Ниже даны значения поправочного коэффициента  $k_2$ .

Температура почвы, °С	Изоляция	
	ПВХ (PVC)	Сшитый полиэтилен (XLPE) Этиленпропиленовый каучук (EPR)
10	1.10	1.07
15	1.05	1.04
25	0.95	0.96
30	0.89	0.93
35	0.84	0.89
40	0.77	0.85
45	0.71	0.80
50	0.63	0.76
55	0.55	0.71
60	0.45	0.65
65	-	0.60
70	-	0.53
75	-	0.46
80	-	0.38

**Рис. G13:** Поправочные коэффициенты для температуры почвы, отличной от 20 °С, используемые для расчета пропускной способности по току кабелей, проложенных в каналах в земле (таблица A.52-15 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

G11

#### ■ Термическое удельное сопротивление почвы

Расчет пропускной способности по току кабелей, проложенных в земле, основывается на использовании удельного сопротивления почвы, равного 2,5 К·м/Вт. Для других значений используются поправочные коэффициенты, указанные на **рис. G14**.

Ниже даны значения поправочного коэффициента  $k_3$ .

Термическое удельное сопротивление, К·м/Вт	1	1.5	2	2.5	3
Поправочный коэффициент	1.18	1.1	1.05	1	0.96

**Рис. G14:** Поправочные коэффициенты для кабелей, проложенных в каналах в земле, при термическом удельном сопротивлении почвы, отличном от 2,5 К·м/Вт, используемые для расчета пропускной способности по току с помощью эталонного метода D (таблица согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

Опыт показывает, что существует взаимосвязь показателя удельного сопротивления и типа почвы. Поэтому на **рис. G15** указаны эмпирические значения поправочного коэффициента  $k_3$  в зависимости от типа почвы.

Тип почвы	$k_3$
Очень сырая почва (насыщенная)	1.21
Сырая почва	1.13
Влажная почва	1.05
Сухая почва	1.00
Очень сухая почва (выжженная солнцем)	0.86

**Рис. G15:** Поправочные коэффициенты  $k_3$  в зависимости от типа почвы

#### ■ Учет взаимного нагрева проводов или кабелей

Значения пропускной способности по току, указанные в таблицах ниже, относятся к одноконтурным схемам, состоящим из следующего количества проводов нагрузки:

- два изолированных провода или два одножильных кабеля, либо один двухжильный кабель (применяется в однофазных цепях);
- три изолированных провода или три одножильных кабеля, либо один трехжильный кабель (применяется в трехфазных цепях).

Когда при прокладке в группу объединяется большее количество изолированных проводов или кабелей, используется коэффициент снижения (в таблице ниже  $k_4$ ).

На **рис. G16 – G18** даны значения коэффициентов для различных вариантов прокладки кабелей (с указанием способов монтажа, условий прокладки – по воздуху или в земле).

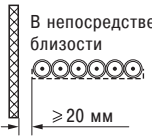
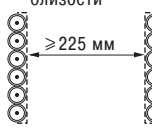
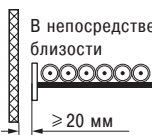
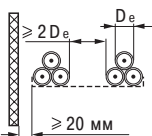
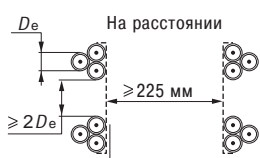
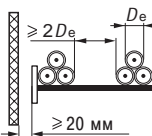
На **рис. G16** представлены значения поправочного коэффициента  $k_4$  для различных вариантов открытой прокладки кабелей или проводов, составляющих более чем одну цепь или больше одного многожильного кабеля.

Расположение кабелей в непосредственной близости	Количество цепей или многожильных кабелей												Методы монтажа
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
Кабельный пучок воздушной прокладки, пролож. по поверхности, утопленная или скрытая прокладка	1.00	0.80	0.70	0.65	0.60	0.57	0.54	0.52	0.50	0.45	0.41	0.38	Методы А – F
Один слой на стене, на полу или в перфорированных кабел. лотках	1.00	0.85	0.79	0.75	0.73	0.72	0.72	0.71	0.70	Нет значений коэффициента уменьшения для групп, состоящих более чем из девяти цепей или многожильных кабелей			Метод С
Один слой, закрепленный непосредственно под деревянным потолком	0.95	0.81	0.72	0.68	0.66	0.64	0.63	0.62	0.61				Методы Е – F
Один слой в перфорированных горизонтальных или вертикальных кабельных лотках	1.00	0.88	0.82	0.77	0.75	0.73	0.73	0.72	0.72				
Один слой на кабельных лестницах, кронштейнах, в зажимах и т.д.	1.00	0.87	0.82	0.80	0.80	0.79	0.79	0.78	0.78				

**Рис. G16:** Коэффициенты снижения для групп, состоящих более чем из одной цепи или одного многожильного кабеля (таблица A.52-17 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

На **рис. G17** представлены значения поправочного коэффициента  $k_4$  для различных вариантов прокладки кабелей или проводов в воздухе, для групп, составляющих более чем одну цепь одножильных кабелей.

Способ монтажа			Количество лотков	Количество трехфазных цепей			Используется как множитель номинального значения для следующих вариантов прокладки
				1	2	3	
В перфорированных лотках	31		1	0.98	0.91	0.87	Три кабеля, расположенные горизонтально
			2	0.96	0.87	0.81	
			3	0.95	0.85	0.78	
В вертикальных перфорированных лотках	31		1	0.96	0.86		Три кабеля, расположенные вертикально
			2	0.95	0.84		
На кабельных держателях, кронштейнах, в зажимах и т.д.	32, 33, 34		1	1.00	0.97	0.96	Три кабеля, расположенные горизонтально
			2	0.98	0.93	0.89	
			3	0.97	0.90	0.86	
В перфорированных лотках	31		1	1.00	0.98	0.96	Три кабеля, расположенные в виде треугольника (клина)
			2	0.97	0.93	0.89	
			3	0.96	0.92	0.86	
В вертикальных перфорированных лотках	31		1	1.00	0.91	0.89	
			2	1.00	0.90	0.86	
На кабельных держателях, кронштейнах, в зажимах и т.д.	32, 33, 34		1	1.00	1.00	1.00	
			2	0.97	0.95	0.93	
			3	0.96	0.94	0.90	

**Рис. G17:** Коэффициенты снижения для групп, состоящих более чем из одной цепи одножильных кабелей, используемые как нормированные значения для одной цепи одножильных кабелей, проложенных по воздуху, способ монтажа F (таблица A.52.21 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

G13

На **рис. G18** представлены значения поправочного коэффициента  $k_4$  для различных вариантов расположения кабелей или проводов, проложенных непосредственно в земле.

Количество цепей	Расстояние между кабелями (a)				
	Располож. кабелей рядом, без зазора между ними	Располож. кабелей на расст. одного $\varnothing$	0.125 м	0.25 м	0.5 м
2	0.75	0.80	0.85	0.90	0.90
3	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85
4	0.60	0.60	0.70	0.75	0.80
5	0.55	0.55	0.65	0.70	0.80
6	0.50	0.55	0.60	0.70	0.80

Многожильные кабели



Одножильные кабели



**Рис. G18:** Коэффициенты снижения для более чем одной цепи, одножильных или многожильных кабелей, проложенных непосредственно в земле. Метод монтажа D (таблица 52-18 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

■ Учет тока третьей гармонической составляющей

Расчет пропускной способности по току трехфазных четырех- или пятижильных кабелей основан на принятии условия, что только 3 провода имеют полную нагрузку.

Тем не менее, при циркуляции токов гармоник в нейтрали может возникать значительный ток, который может быть даже больше значений фазных токов. Это обусловлено тем, что токи третьей гармоники в трех фазах не подавляют друг друга, а суммируются в нейтральном проводнике.

Это, разумеется, влияет на пропускную способность по току кабеля, в связи с чем необходимо использовать поправочный коэффициент  $k_5$ , значения которого указаны ниже.

Кроме того, если ток третьей гармоники больше 33% по отношению к номинальному току, то ток в нейтрали будет превышать значение фазного тока и размер кабеля должен выбираться на основе значения тока в нейтрали. Также следует учитывать тепловое действие гармонических токов в фазных проводах.

На **рис. G19** представлены значения коэффициента  $k_5$  в зависимости от содержания третьей гармоники.

Содержание третьей гармоники фазного тока (%)	Поправочный коэффициент	
	Выбор размера кабеля на основе значения фаз. тока	Выбор размера кабеля на основе значения тока в нейтрали
0 - 15	1.0	
15 - 33	0.86	
33 - 45		0.86
> 45		1.0

**Рис. G19:** Поправочные коэффициенты для токов гармонической составляющей в четырех- и пятижильных кабелях (таблица D.52.1 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

**Допустимый ток в зависимости от номинального значения площади поперечного сечения проводов**

В стандарте МЭК 60364-5-52 содержится обширная информация, составленная в виде таблиц, с указанием значений допустимого тока в зависимости от сечения жил кабелей. При этом учитываются многие параметры, например, способ монтажа, тип материала изоляции, количество проводов под нагрузкой.

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

В качестве примера на **рис. G20** даны значения пропускной способности по току для различных способов монтажа, для ПВХ изоляции, для трех медных или алюминиевых проводов, проложенных по воздуху или в земле.

Номинальная площадь поперечного сечения проводов (мм <sup>2</sup> )	Способ монтажа					
	A1	A2	B1	B2	C	D
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Медь</b>						
1.5	13.5	13	15.5	15	17.5	18
2.5	18	17.5	21	20	24	24
4	24	23	28	27	32	31
6	31	29	36	34	41	39
10	42	39	50	46	57	52
16	56	52	68	62	76	67
25	73	68	89	80	96	86
35	89	83	110	99	119	103
50	108	99	134	118	144	122
70	136	125	171	149	184	151
95	164	150	207	179	223	179
120	188	172	239	206	259	203
150	216	196	-	-	299	230
185	245	223	-	-	341	258
240	286	261	-	-	403	297
300	328	298	-	-	464	336
<b>Алюминий</b>						
2.5	14	13.5	16.5	15.5	18.5	18.5
4	18.5	17.5	22	21	25	24
6	24	23	28	27	32	30
10	32	31	39	36	44	40
16	43	41	53	48	59	52
25	57	53	70	62	73	66
35	70	65	86	77	90	80
50	84	78	104	92	110	94
70	107	98	133	116	140	117
95	129	118	161	139	170	138
120	149	135	186	160	197	157
150	170	155	-	-	227	178
185	194	176	-	-	259	200
240	227	207	-	-	305	230
300	261	237	-	-	351	260

**Рис. G20:** Значения пропускной способности по току в амперах для различных методов монтажа, ПВХ-изоляции, для трех медных или алюминиевых проводов, при температуре проводов 70 °C, температуре окружающей среды – 30 °C – при прокладке по воздуху, 20 °C – при прокладке в земле (таблица A.52.4 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)



### 2.3 Рекомендуемый упрощенный метод определения сечения кабелей

Для облегчения выбора сечения кабелей предлагаются две упрощенные таблицы для кабелей закрытой и открытой прокладки.  
В данных таблицах представлены наиболее распространенные варианты конфигурации, что позволяет облегчить доступ к информации.

■ Кабели открытой прокладки:

Соответствующие методы	Количество нагруженных проводов и тип изоляции											
		2 PVC	3 PVC		3 XLPE	2 XLPE						
A1												
A2	3 PVC	2 PVC		3 XLPE	2 XLPE							
B1				3 PVC	2 PVC		3 XLPE		2 XLPE			
B2			3 PVC	2 PVC		3 XLPE	2 XLPE					
C					3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE		
E						3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE	
F							3 PVC		2 PVC	3 XLPE		2 XLPE
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Сечение (мм²)												
Медь												
1.5	13	13.5	14.5	15.5	17	18.5	13.5	22	23	24	26	-
2.5	17.5	18	19.5	21	23	25	27	30	31	33	36	-
4	23	24	26	28	31	34	36	40	42	45	49	-
6	29	31	34	36	40	43	46	51	54	58	63	-
10	39	42	46	50	54	60	63	70	75	80	86	-
16	52	56	61	68	73	80	85	94	100	107	115	-
25	68	73	80	89	95	101	110	119	127	135	149	161
35	-	-	-	110	117	126	137	147	158	169	185	200
50	-	-	-	134	141	153	167	179	192	207	225	242
70	-	-	-	171	179	196	213	229	246	268	289	310
95	-	-	-	207	216	238	258	278	298	328	352	377
120	-	-	-	239	249	276	299	322	346	382	410	437
150	-	-	-	-	285	318	344	371	395	441	473	504
185	-	-	-	-	324	362	392	424	450	506	542	575
240	-	-	-	-	380	424	461	500	538	599	641	679
Алюминий												
2.5	13.5	14	15	16.5	18.5	19.5	21	23	24	26	28	-
4	17.5	18.5	20	22	25	26	28	31	32	35	38	-
6	23	24	26	28	32	33	36	39	42	45	49	-
10	31	32	36	39	44	46	49	54	58	62	67	-
16	41	43	48	53	58	61	66	73	77	84	91	-
25	53	57	63	70	73	78	83	90	97	101	108	121
35	-	-	-	86	90	96	103	112	120	126	135	150
50	-	-	-	104	110	117	125	136	146	154	164	184
70	-	-	-	133	140	150	160	174	187	198	211	237
95	-	-	-	161	170	183	195	211	227	241	257	289
120	-	-	-	186	197	212	226	245	263	280	300	337
150	-	-	-	-	226	245	261	283	304	324	346	389
185	-	-	-	-	256	280	298	323	347	371	397	447
240	-	-	-	-	300	330	352	382	409	439	470	530

Рис. G21a: Значения пропускной способности по току в амперах (таблица B.52-1 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

На **рис. G21b** даны поправочные коэффициенты для групп из нескольких цепей или многожильных кабелей:

Расположение цепей или кабелей	Количество цепей или многожильных кабелей								
	1	2	3	4	6	9	12	16	20
Утопленные или скрытые	1.00	0.80	0.70	0.70	0.55	0.50	0.45	0.40	0.40
Один слой на стене, на полу или на неперфорированных лотках	1.00	0.85	0.80	0.75	0.70	0.70	-	-	-
Один слой, закрепленный непосредственно под потолком	0.95	0.80	0.70	0.70	0.65	0.60	-	-	-
Один слой в перфорированных горизонтальных или вертикал. лотках	1.00	0.90	0.80	0.75	0.75	0.70	-	-	-
Один слой на кабельных держателях, кронштейнах, на клипах и т.д.	1.00	0.85	0.80	0.80	0.80	0.80	-	-	-

**Рис. G21b:** Коэффициенты снижения для групп из нескольких цепей или многожильных кабелей (таблица В.52-3 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

■ Кабели закрытой прокладки:

Метод монтажа	Размер (мм²)	Количество жил и тип изоляции			
		Два PVC	Три PVC	Два XLPE	Три XLPE
<b>D</b>	<b>Медь</b>				
	1.5	22	18	26	22
	2.5	29	24	34	29
	4	38	31	44	37
	6	47	39	56	46
	10	63	52	73	61
	16	81	67	95	79
	25	104	86	121	101
	35	125	103	146	122
	50	148	122	173	144
	70	183	151	213	178
	95	216	179	252	211
	120	246	203	287	240
	150	278	230	324	271
	185	312	258	363	304
	240	361	297	419	351
	300	408	336	474	396
<b>D</b>	<b>Алюминий</b>				
	2.5	22	18.5	26	22
	4	29	24	34	29
	6	36	30	42	36
	10	48	40	56	47
	16	62	52	73	61
	25	80	66	93	78
	35	96	80	112	94
	50	113	94	132	112
	70	140	117	163	138
	95	166	138	193	164
	120	189	157	220	186
	150	213	178	249	210
	185	240	200	279	236
	240	277	230	322	272
	300	313	260	364	308

**Рис. G22:** Значения пропускной способности по току в амперах (таблица В.52-1 согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

G17

## 2.4 Шинопроводы

Выбор шинопроводов несложен и основан на данных, предоставленных изготовителем.. Методы монтажа, выбор изоляционных материалов и поправочные коэффициенты для групп цепей не являются при этом определяющими параметрами.

Площадь поперечного сечения для любой модели определяется изготовителем на основе следующего:

- Номинальный ток,
- Температура окружающего воздуха 35 °C,
- 3 нагруженные шины.

### Номинальный ток

Номинальный ток рассчитывается с учетом следующего:

- Схема расположения (компоновка),
- Ток, потребляемый различными ЭП, питаемыми от шинопровода.

### Температура окружающего воздуха

При температурах выше 35 °C должен применяться поправочный коэффициент. Этот коэффициент, применяемый с учетом среды и высоких токов (до 4000A), приводится на **Рис. G23a**.

°C	35	40	45	50	55
Поправочный коэффициент	1	0.97	0.93	0.90	0.86

Рис. G23a: Поправочный коэффициент для температуры воздуха выше 35

### Ток в нейтрали

При наличии токов 3-й гармоники по нейтрали может проходить значительный ток. Поэтому, необходимо учитывать дополнительные потери мощности.

Рис. G23b показывает максимальные допустимые токи фазной и нейтральной шин в шинопроводах большой мощности в зависимости от уровня 3-й гармоники.

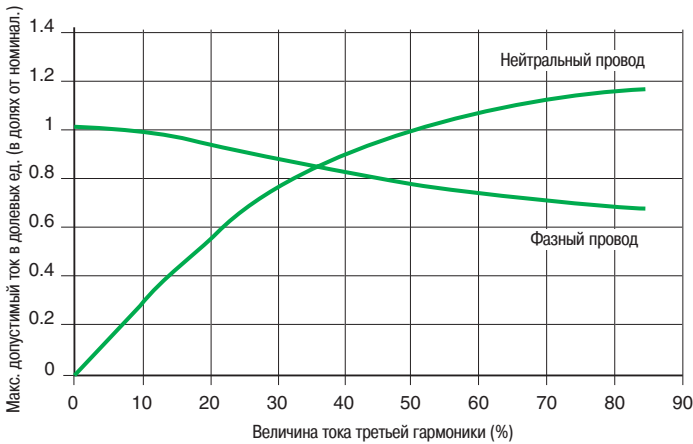


Рис. G23b: Максимальные допустимые токи (о. е.) в шинопроводе в зависимости от уровня 3-й гармоники.

## 2 Практический метод определения наименьшего допустимого сечения проводов в цепи

Компоновка шинпровода зависит от расположения ЭП, местоположения источника питания и возможностей крепления шинпровода.

- Одна секция шинпровода обслуживает участок 4-6 м
- Устройства защиты ЭП размещаются в ответвительных коробках, располагающихся в точках подключения ЭП.
- Один шинпровод обслуживает все присоединенные ЭП разной мощности.

После определения компоновки шинпровода можно рассчитать потребляемый им ток  $I_n$ . Ток  $I_n$  равен сумме токов, потребляемых ЭП  $I_n$ :  $I_n = \sum I_b$ . Потребители тока не работают все одновременно и при полной нагрузке. Поэтому, нужно использовать коэффициент одновременности  $k_S$ :  $I_n = \sum (I_b \cdot k_S)$ .

Назначение	Число ЭП	Коэффициент $K_s$
Освещение, отопление		1
Распределение (производственные цеха)	2...3	0.9
	4...5	0.8
	6...9	0.7
	10...40	0.6
	40 и более	0.5

Примечание: для промышленных установок необходимо учитывать возможность модернизации оборудования. Для распределительного устройства рекомендуется планировать запас  $I_n = I_b \times k_s \times 1.2$ .

Fig G24 : Коэффициент одновременности в зависимости от числа потребителей тока

G19

Сопротивление проводов цепей низкое, но им нельзя пренебрегать. При передаче тока нагрузки происходит потеря напряжения между началом цепи и местом подключения нагрузки. Правильная работа ЭП (двигатель, цепь освещения и т.д.) зависит от того, что напряжение на его зажимах поддерживается на уровне, близком к номинальному значению. Таким образом, необходимо рассчитать провода цепи так, чтобы при токе полной нагрузки напряжение на зажимах ЭП оставалось в пределах, которые необходимо соблюдать для правильной работы оборудования.

- В данном разделе рассматриваются методы определения потерь напряжения, с целью обеспечения:
- соответствия действующим стандартам и правилам;
  - требований со стороны нагрузки;
  - существенных требований к работе оборудования.

3.1 Максимальная потеря напряжения

Максимально допустимые пределы потерь напряжения различны в разных странах. Типовые значения для электроустановок низкого напряжения даны ниже **рис. G25**.

Тип установки	Цепи освещения	Другие пользователи (обогрев и питание силовых потребителей)
Подключение к распределительной сети низкого напряжения	3%	5%
Потребители понижающей подстанции, питающейся от распределительной сети высокого напряжения	6%	8%

Рис. G25: Максимальная потеря напряжения между точкой подключения к сети и точкой потребления мощности

Данные пределы потерь напряжения относятся к нормальному установившемуся рабочему режиму и не применяются к моментам запуска двигателей, одновременному включению (случайному) нескольких нагрузок и т.д., как это было описано в главе В, раздел 4.3 (коэффициент одновременности и т.д.). Если потеря напряжения превышает значения, данные на рис. G26, используйте провода с большим сечением, чтобы исправить эту ситуацию.

Если разрешить снижение напряжения на 8%, это может привести к проблемам в работе двигателей. Обычно, для удовлетворительной работы двигателя необходимо, чтобы напряжение было в пределах  $\pm 5\%$  от номинального значения в установившемся режиме работы.

- Пусковой ток двигателя может в 5 - 7 раз превышать значение тока полной нагрузки (или даже более).
- Если позволить напряжению упасть на 8% при полной нагрузке, то во время запуска двигателя может произойти снижение напряжения до 40%. При таких условиях двигатель либо:
  - не запустится (то есть, останется неподвижным из-за недостаточного вращающего момента, неспособного преодолеть момент нагрузки), что приведет к перегреву двигателя и к его отключению;
  - или будет ускоряться очень медленно, так что высокое потребление тока нагрузкой (с возможными нежелательными воздействиями пониженного напряжения на другое оборудование) будет продолжаться дольше, чем нормальный период разгона двигателя.
- И наконец, снижение напряжения на 8% представляет собой постоянную потерю мощности, что при продолжительной нагрузке приведет к значительным потерям энергии. По этим причинам рекомендуется, чтобы максимальное снижение напряжения на 8% в установившемся рабочем режиме не достигалось в цепях, чувствительных к понижению напряжения (см. **рис. G26**).

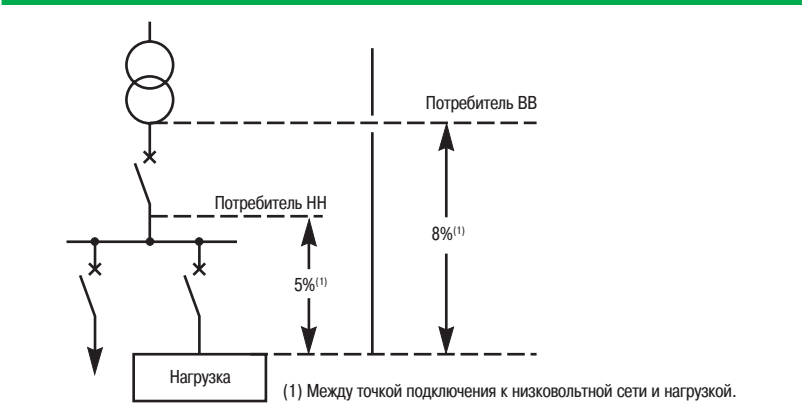


Рис. G26: Максимальная потеря напряжения

## 3.2 Расчет потери напряжения при постоянной нагрузке

### Формулы

На **рис. G27** ниже даны формулы, обычно используемые для расчета потери напряжения в цепи на километр длины.

Если:

- $I_b$ : ток полной нагрузки, в амперах
- $L$ : длина кабеля – в километрах
- $R$ : сопротивление кабеля - в Ом/км, то:

$$R = \frac{22,5}{S} \text{ для меди, } S - \text{площадь поперечного сечения проводника (жилы кабеля) в мм}^2$$

$$R = \frac{36}{S} \text{ для алюминия}$$

**Примечание:**  $R$  можно пренебречь, если сечение проводника свыше 500 мм<sup>2</sup>.

- $X$ : индуктивное реактивное сопротивление кабеля в Ом/км.

**Примечание:**  $X$  можно пренебречь для проводов сечением меньше 50 мм<sup>2</sup>. При отсутствии любой другой информации, примите  $X = 0,08$  Ом/км.

- $\varphi$ : фазовый угол между напряжением и током рассчитываемой цепи, обычно:

□ цепь освещения лампами накаливания:  $\cos \varphi = 1$ ;

□ питание двигателя:

- при запуске:  $\cos \varphi = 0.35$ ;

- в режиме нормальной работы:  $\cos \varphi = 0.8$ ;

- $U_n$ : напряжение между фазами;

- $U_n$ : напряжение фаза - нейтраль.

Для кабелепроводов и шинопроводов заводского изготовления, значения активного и реактивного сопротивлений даются производителем.

G21

Цепь	Падение напряжения ( $\Delta U$ )	
	V	%
Однофазная : фаза/фаза	$\Delta U = 2 I_b (R \cos \varphi + X \sin \varphi) L$	$\frac{100 \Delta U}{U_n}$
Однофазная : фаза/нейтраль	$\Delta U = 2 I_b (R \cos \varphi + X \sin \varphi) L$	$\frac{100 \Delta U}{U_n}$
Сбалансиров. трехфазная : 3 фазы (с нейтралью или без нее)	$\Delta U = \sqrt{3} I_b (R \cos \varphi + X \sin \varphi) L$	$\frac{100 \Delta U}{U_n}$

**Рис. G27:** Формулы расчета падения напряжения

### Упрощенная таблица

Вычислений можно избежать, используя таблицу на **рис. G28** на следующей странице, которая дает, с достаточной точностью, значение потери межфазного напряжения на 1 км кабеля на 1 А, в зависимости от:

- типа цепи: цепь питания двигателя, где значение  $\cos \varphi$  близко к 0.8, или цепь освещения, где  $\cos \varphi$  близок к единице;

- типа кабеля: одножильный и трехжильный.

Потерю напряжения в кабеле можно вычислить, как:

$K \times I_b \times L$ , где:

$K$  – дано в таблице;

$I_b$  – ток полной нагрузки в амперах;

$L$  – длина кабеля в км.

Колонку «Питание двигателя», « $\cos \varphi = 0.35$ » на рис. G28 можно использовать для вычисления потери напряжения во время запуска двигателя (см. пример 1, рис. G28).

Сечение (мм <sup>2</sup> )		Однофазная цепь			Симметричная трехфазная цепь		
		Питание двигателя		Освещение	Питание двигателя		Освещение
		Обычный раб. режим	Запуск		Обычный раб. режим	Запуск	
Cu	Al	cos φ = 0.8	cos φ = 0.35	cos φ = 1	cos φ = 0.8	cos φ = 0.35	cos φ = 1
1.5		24	10.6	30	20	9.4	25
2.5		14.4	6.4	18	12	5.7	15
4		9.1	4.1	11.2	8	3.6	9.5
6	10	6.1	2.9	7.5	5.3	2.5	6.2
10	16	3.7	1.7	4.5	3.2	1.5	3.6
16	25	2.36	1.15	2.8	2.05	1	2.4
25	35	1.5	0.75	1.8	1.3	0.65	1.5
35	50	1.15	0.6	1.29	1	0.52	1.1
50	70	0.86	0.47	0.95	0.75	0.41	0.77
70	120	0.64	0.37	0.64	0.56	0.32	0.55
95	150	0.48	0.30	0.47	0.42	0.26	0.4
120	185	0.39	0.26	0.37	0.34	0.23	0.31
150	240	0.33	0.24	0.30	0.29	0.21	0.27
185	300	0.29	0.22	0.24	0.25	0.19	0.2
240	400	0.24	0.2	0.19	0.21	0.17	0.16
300	500	0.21	0.19	0.15	0.18	0.16	0.13

Рис. G28: Потеря напряжения между фазами ΔU для цепи, в вольтах на 1 ампер, на 1 км.

## Примеры

### Пример 1 (см. рис. G29)

Трехжильный медный кабель сечением 35 мм<sup>2</sup> длиной 50 м подает питание к двигателю U<sub>н</sub> = 400 В, потребляющему:

- 100 А при cos φ = 0.8 при нормальной постоянной нагрузке;
- 500 А (5 I<sub>n</sub>) при cos φ = 0.35 во время запуска.

Отклонение напряжения в начале кабеля, подсоединяющего двигатель (то есть на распределительном щите (рис. G30), который распределяет ток в 1000 А), составляет - 10 В линейного напряжения.

Каково отклонение напряжения на зажимах двигателя:

- в режиме нормальной работы;
- во время запуска.

Решение:

- Отклонение напряжения на двигателе в режиме нормальной работы будет равно:

$$\Delta U\% = 100 \frac{\Delta U}{U_n}$$

В таблице G28 дано соотношение 1 В/А/км, и согласно этому:

$$\Delta U \text{ для кабеля} = 1 \times 100 \times 0.05 = 5 \text{ В}$$

$$\Delta U \text{ общее} = 10 + 5 = 15 \text{ В, то есть:}$$

$$\frac{15}{400} \times 100 = 3.75\%$$

Это значение меньше, чем разрешенное (8%) и является приемлемым.

- Потеря напряжения в кабеле во время запуска двигателя:

$$\Delta U_{\text{кабеля}} = 0.52 \times 500 \times 0.05 = 13 \text{ В}$$

Из-за дополнительного тока, потребляемого во время запуска двигателя, падение напряжения на распределительном щите превысит 10 вольт.

Предположим, что ток, подаваемый на распределительный щит во время запуска двигателя, равен 900+500=1400 А, тогда отклонение напряжения на распределительном щите пропорционально увеличится:

$$\frac{10 \times 1400}{1000} = 14 \text{ В}$$

$$\Delta U \text{ для распределительного щита} = 14 \text{ В}$$

$$\Delta U \text{ для кабеля двигателя} = 13 \text{ В}$$

$$\Delta U \text{ общее} = 13 + 14 = 27 \text{ В, то есть:}$$

$$\frac{27}{400} \times 100 = 6.75\%$$

Отклонение = 6,75% (напряжение на зажимах = 400 - 27 = 373 В) приемлемое во время запуска двигателя.

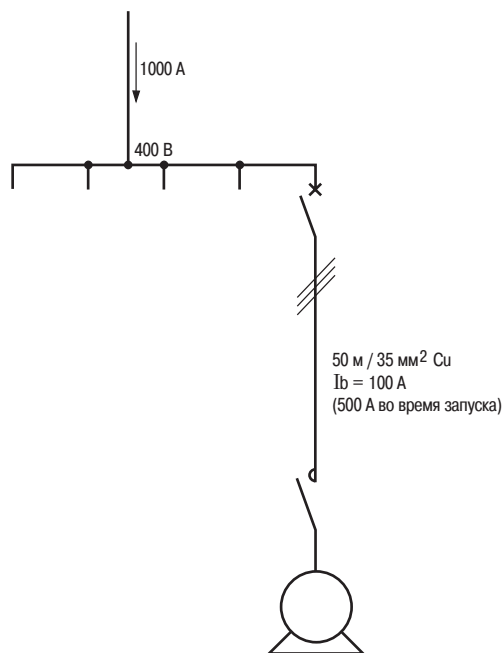


Рис. G29: Пример 1

### 3 Расчет потерь напряжения

#### Пример 2 (см. рис. G30)

Трехфазная четырехпроводная линия с медными проводниками сечением 70 мм<sup>2</sup> и длиной 50 м проводит ток 150 А. Линия питает, кроме прочих нагрузок, 3 однофазных цепи освещения, каждая из которых состоит из медного провода сечением 2.5 мм<sup>2</sup>, длиной 20 м, и проводит ток 20 А.

Предполагается, что токи в кабельной линии сечением 70 мм<sup>2</sup> являются симметричными, и три цепи освещения подсоединены к линии в одной и той же точке.

Какова потеря напряжения от ТП до конечных точек цепей освещения?

Решение:

■ Потеря напряжения в четырехпроводной линии:

$$\Delta U\% = 100 \frac{\Delta U}{U_n}$$

На рис. G28 показано значение 0.55 В/А/км

$\Delta U$  линии = 0.55 x 150 x 0.05 = 4.125 В (линейное),

Фазная потеря напряжения:  $\frac{4.125}{\sqrt{3}} = 2.38$  В между фазой и нейтралью.

■ Потеря напряжения в каждой из однофазных цепей освещения:

$\Delta U$  для однофазной цепи = 18 x 20 x 0.02 = 7.2 В

Таким образом, общая потеря напряжения будет равна:

7.2 + 2.38 = 9.6 В

$$\frac{9.6 \text{ В}}{230 \text{ В}} \times 100 = 4.2\%$$

Это значение является удовлетворительным, так как оно меньше, чем максимальная допустимая потеря напряжения, составляющая 6%.

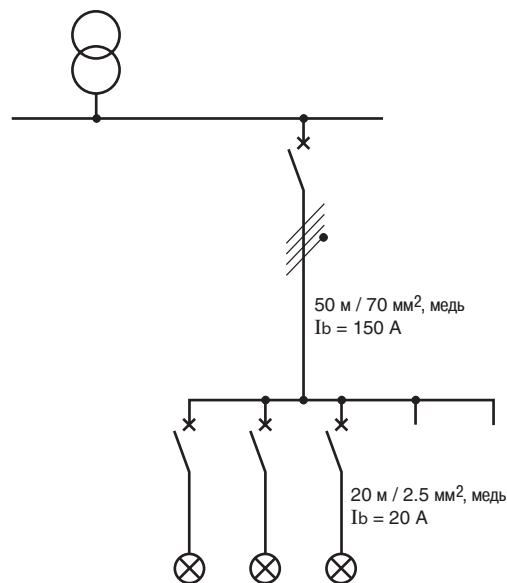


Рис. G30: Пример 2

G23



Знание значений симметричных токов трехфазного короткого замыкания (Isc) в различных точках установки является необходимым для проектирования установки.

Знание величин симметричных токов трехфазного КЗ (Isc) в стратегических точках установки необходимо, чтобы выбрать параметры распределительного устройства (допустимый ток КЗ); кабелей (ток термической стойкости), защитных устройств (уставки селективной защиты) и т.д. В следующих примерах будет рассмотрен трехфазный ток КЗ на землю (так называемое «металлическое» КЗ), протекающий через обычный понижающий распределительный трансформатор.

За исключением очень необычных обстоятельств, этот тип повреждения является наиболее серьезным, и очень простым для вычисления.

Токи КЗ, в цепи, питаемой от генератора переменного тока, а также в цепях постоянного тока, рассматриваются в главе М.

Самые простые вычисления и практические правила, которым нужно следовать, дают результаты достаточной точности, которые в большинстве случаев подходят для целей расчета установки.

#### 4.1 Ток короткого замыкания на выводах вторичной обмотки понижающего трансформатора

##### В случае одного трансформатора

■ В качестве первого приближения сопротивление высоковольтной цепи принимается пренебрежительно малым, поэтому:

$$I_{sc} = \frac{I_n \times 100}{U_{sc}}, \text{ где } I_n = \frac{P \times 10^3}{U_{2n} \sqrt{3}} \text{ и}$$

P - номинальная мощность в кВА трансформатора;

$U_{2n}$  - межфазное напряжение холостого хода вторичной обмотки;

$I_n$  - номинальный ток в амперах;

Isc - ток КЗ в амперах;

$U_{sc}$  - напряжение короткого замыкания трансформатора в %.

Типовые значения  $U_{sc}$  для распределительных трансформаторов даны на рис. G31.

Номинальная мощность трансформатора (кВА)	Usc (%)	
	Масляный трансформатор	Сухой трансформатор с литой изоляцией
50 ÷ 750	4	6
800 ÷ 3,200	6	6

Рис. G31: Типовые значения  $U_{sc}$  для различных номиналов трансформаторов с напряжением высоковольтной обмотки ≤ 20 кВ

##### ■ Пример

Трансформатор 400 кВА, 420 В, при отсутствии нагрузки:

$U_{sc} = 4\%$

$$I_n = \frac{400 \times 10^3}{420 \times \sqrt{3}} = 550 \text{ A} \quad I_{sc} = \frac{550 \times 100}{4} = 13,7 \text{ кА}$$

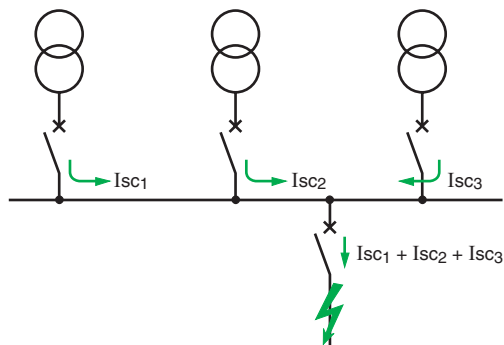


Рис. G32: Случай нескольких трансформаторов, работающих параллельно

##### Случай нескольких трансформаторов, работающих параллельно

Величину тока КЗ в начале линии, отходящей от сборных шин (см. рис. G32), можно оценить как сумму токов Isc, вычисленных отдельно для каждого трансформатора.

Предполагается, что все трансформаторы питаются от одной высоковольтной сети, в этом случае значения, полученные из рис. G31, при сложении дадут немного большее значение тока КЗ, чем то, которое будет на самом деле.

Другие факторы, которые не были приняты во внимание, это сопротивление сборных шин и автоматических выключателей.

Однако, полученное значение тока КЗ является достаточно точным для целей расчета электроустановки. Выбор автоматических выключателей и встроенных устройств, защищающих от тока КЗ, описан в главе Н, подраздел 4.4.

## 4.2 Ток трехфазного короткого замыкания (Isc) в любой точке установки низкого напряжения

В трехфазной установке ток Isc в любой точке находится как:

$$I_{sc} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} Z_T}, \text{ где:}$$

U<sub>20</sub> - межфазное напряжение холостого хода вторичных обмоток питающего трансформатора(ов);  
Z<sub>T</sub> - полное сопротивление на фазу в цепи, расположенной выше от точки повреждения (Ом).

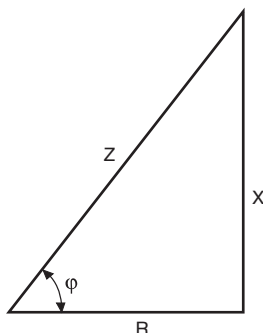


Рис. G33: Схема полного сопротивления

### Метод вычисления Z<sub>T</sub>

Каждый компонент установки (высоковольтная сеть, трансформатор, кабель, автоматический выключатель, сборные шины) характеризуется своим полным сопротивлением Z, которое состоит из активного сопротивления (R) и индуктивного реактивного сопротивления (X). Стоит заметить, что емкостные сопротивления не важны при расчете тока КЗ.

Параметры R, X и Z выражаются в Омах и представлены сторонами прямоугольного треугольника, как показано на схеме полного сопротивления на рис. G33.

Метод состоит в разделении сети на удобные участки и вычислении значений R и X для каждого из них.

Когда участки соединяются в цепь последовательно, все элементы активного сопротивления в участках складываются арифметически, так же как и реактивные сопротивления, и дают значения R<sub>T</sub> и X<sub>T</sub>. Полное сопротивление (Z) для объединенных участков затем рассчитывается по формуле:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

Любые два участка сети, соединенные параллельно, можно, если они оба являются преимущественно резистивными (или индуктивными), объединить и получить одно эквивалентное сопротивление (или реактивное сопротивление), как показано ниже:

Пусть R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> — это два сопротивления, соединенные в параллель, тогда эквивалентное сопротивление R<sub>3</sub> находится по формуле:

$$R_3 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{или для реактивного сопротивления} \quad X_3 = \frac{X_1 \times X_2}{X_1 + X_2}$$

Необходимо отметить, что вычисление X<sub>3</sub> относится только к отдельной цепи, без влияния взаимной индуктивности. Если параллельные цепи расположены близко к друг другу, значение X<sub>3</sub> будет заметно выше.

### Определение полного сопротивления каждого компонента высоковольтной сети

■ Сеть, к которой подключен ввод от понижающего трансформаторов (см. рис. G34)

Значение трехфазного тока КЗ (Isc) в кА или мощности (Psc) MBA<sup>(1)</sup> дается поставщиком энергии, отсюда можно вычислить эквивалентное полное сопротивление.

Psc	U <sub>0</sub> (В)	R <sub>a</sub> (мОм)	X <sub>a</sub> (мОм)
250 MBA	420	0.07	0.7
500 MBA	420	0.035	0.351

Рис. G34: Полное сопротивление высоковольтной сети, приведенное к стороне НН понижающего трансформатора

Формула, которая позволяет вычислить это значение и одновременно приводит полное сопротивление к его эквиваленту на стороне низкого напряжения, следующая:

$$Z_s = \frac{U_0^2}{P_{sc}}$$

где:

Z<sub>s</sub> - полное сопротивление высоковольтной сети, выраженный в миллиомах;

U<sub>0</sub> - межфазное напряжение холостого хода высоковольтной цепи, выраженное в вольтах;

P<sub>sc</sub> - мощность трехфазного КЗ, выраженная в кВА.

Сопротивление питающей высоковольтной сети R<sub>a</sub> обычно мало по сравнению с соответствующим сопротивлением X<sub>a</sub>, поэтому можно принять X<sub>a</sub> равным Z<sub>a</sub>. Если нужны более точные вычисления, можно принять, что X<sub>a</sub> равно 0,995 Z<sub>a</sub>, и R<sub>a</sub> равно 0,1 X<sub>a</sub>.

На рис. G36 даны значения для R<sub>a</sub> и X<sub>a</sub>, соответствующие наиболее распространенным значениям мощностей КЗ для высокого напряжения (1) в распределительных сетях питания, а именно, 250 и 500 MBA.

(1) Мощность КЗ в MBA = E<sub>L</sub> × Isc где:

■ E<sub>L</sub> = межфазное номинальное напряжение сети, выраженное в кВ (ср.квдр.)

■ Isc = ток трехфазного КЗ, выраженный в кА (ср.квдр.).

### ■ Трансформаторы (см. рис. G35)

Полное сопротивление  $Z_{tr}$  трансформатора, со стороны низкого напряжения, находится по формуле:

$$Z_{tr} = \frac{U_{20}^2}{P_n} \times \frac{U_{sc}}{100}$$

где:

$U_{20}$  - межфазное напряжение холостого хода вторичной обмотки, выраженное в вольтах;

$P_n$  - номинальная мощность трансформатора в кВА;

$U_{sc}$  - напряжение короткого замыкания трансформатора, выраженное в %;

Сопротивление обмоток трансформатора  $R_{tr}$  можно затем вычислить из общих потерь следующим образом:

$$P_{cu} = 3 I_n^2 \times R_{tr}, \text{ где } R_{tr} = \frac{P_{cu} \times 10^3}{3 I_n^2} \text{ в миллиомах}$$

где:

$P_{cu}$  - номинальные потери КЗ трансформатора в ваттах;

$I_n$  - номинальный ток полной нагрузки в амперах;

$R_{tr}$  - сопротивление одной фазы трансформатора в миллиомах (в это значение включены низковольтная и соответствующая высоковольтная обмотки одной фазы).

$$X_{tr} = \sqrt{Z_{tr}^2 - R_{tr}^2}$$

При приближительных вычислениях значением  $R_{tr}$  можно пренебречь, так как  $X \approx Z$  в стандартных распределительных трансформаторах.

G26

Номинальная мощность (кВА)	Масляный трансформатор			Сухой трансформатор с литой изоляцией				
	$U_{sc}$ (%)	$R_{tr}$ (мОм)	$X_{tr}$ (мОм)	$Z_{tr}$ (мОм)	$U_{sc}$ (%)	$R_{tr}$ (мОм)	$X_{tr}$ (мОм)	$Z_{tr}$ (мОм)
100	4	37.9	59.5	70.6	6	37.0	99.1	105.8
160	4	16.2	41.0	44.1	6	18.6	63.5	66.2
200	4	11.9	33.2	35.3	6	14.1	51.0	52.9
250	4	9.2	26.7	28.2	6	10.7	41.0	42.3
315	4	6.2	21.5	22.4	6	8.0	32.6	33.6
400	4	5.1	16.9	17.6	6	6.1	25.8	26.5
500	4	3.8	13.6	14.1	6	4.6	20.7	21.2
630	4	2.9	10.8	11.2	6	3.5	16.4	16.8
800	6	2.9	12.9	13.2	6	2.6	13.0	13.2
1,000	6	2.3	10.3	10.6	6	1.9	10.4	10.6
1,250	6	1.8	8.3	8.5	6	1.5	8.3	8.5
1,600	6	1.4	6.5	6.6	6	1.1	6.5	6.6
2,000	6	1.1	5.2	5.3	6	0.9	5.2	5.3

Рис. G35: Значения активного, реактивного и полного сопротивлений для типовых распределительных трансформаторов с напряжением высоковольтных обмоток  $\leq 20$  кВ, приведенные к 400 В

### ■ Автоматические выключатели

В низковольтных цепях необходимо учитывать полное сопротивление выключателей цепи, расположенных выше точки КЗ. Значение реактивного сопротивления условно принимается равным 0,15 мОм на автоматический выключатель, тогда как активным сопротивлением можно пренебречь.

### ■ Сборные шины

Активное сопротивление сборных шин обычно ничтожно, и, практически, все полное сопротивление является реактивным и составляет приблизительно 0,15 мОм/м<sup>(2)</sup> длины низковольтных сборных шин (удвоение расстояния между шинами увеличивает реактивное сопротивление только примерно на 10%).

### ■ Провода цепи

Сопротивление провода находится по формуле:  $R = \rho \frac{L}{S}$

где:

$\rho$  - удельное сопротивление материала провода при нормальной рабочей температуре:

□ 22,5 мОм × мм<sup>2</sup>/м для меди;

□ 36 мОм × мм<sup>2</sup>/м для алюминия;

$L$  - длина провода в м;

$S$  - сечение провода в мм<sup>2</sup>.

(1) До 36 кВ.

(2) Сети 50 Гц, но 0,18 мОм/на метр длины при частоте 60 Гц.

Значения реактивного сопротивления кабелей можно получить у производителей. Для кабеля сечением менее 50 мм<sup>2</sup> значением реактивного сопротивления можно пренебречь. В отсутствие другой информации, можно использовать значение 0,08 мОм/м (для сетей с частотой 50 Гц) или 0,096 мОм/м (для сетей 60 Гц). В случае готовых шинопроводов и подобных кабелепроводов в сборке, обратитесь за данными к производителю.

■ Двигатели

В момент короткого замыкания работающий двигатель будет действовать (в течение короткого времени) как генератор, и подавать ток в место повреждения.

В общем случае, этим некоторым увеличением тока КЗ можно пренебречь. Однако, для более точных вычислений, обычно в случае больших двигателей и/или большого числа небольших, общее увеличение тока можно оценить из формулы:

$I_{scm} = 3.5 I_n$  от каждого двигателя, то есть  $3.5 I_n$  для  $m$  похожих двигателей, работающих одновременно. Двигатели, принимаемые во внимание, должны быть только трехфазными, вклад однофазных двигателей в увеличение тока является очень малым.

■ Сопротивление дуги в месте повреждения

Короткие замыкания обычно образуют дугу, которая имеет сопротивление. Сопротивление не является стабильным, и его среднее значение низкое, но при низком напряжении это сопротивление является достаточным, чтобы в некоторой степени снизить ток повреждения. Практика показывает, что можно ожидать снижения тока порядка 20%. Это явление эффективно облегчает работу автоматического выключателя по отключению цепи, но не оказывает никакого влияния на его ток включения.

■ Сводная таблица (см. рис. G36)

Части системы подачи питания		R (мОм)	X (мОм)
	Сеть питания Рис. G35	$R_a = 0.1$ $X_a = 0$	$X_a = 0.995 Z_a$ ; $Z_a = \frac{U_{20}^2}{P_{sc}}$
	Трансформатор Рис. G37	$R_{tr}$ часто можно пренебречь в сравнении $X_{tr}$ для трансформаторов > 100 кВА	$\sqrt{Z_{tr}^2 - R_{tr}^2}$ где $Z_{tr} = \frac{U_{20}^2}{P_n} \times \frac{U_{sc}}{100}$
	Автоматический выключатель	Можно пренебречь	$X_D = 0.15 \text{ мОм/полюс}$
	Сборные шины	Можно пренебречь для $S > 200 \text{ мм}^2$ в формуле: $R = \rho \frac{L^{(1)}}{S}$	$X_B = 0.15 \text{ мОм/м}$
	Провода цепи <sup>(2)</sup>	$R = \rho \frac{L^{(1)}}{S}$	Кабели: $X_c = 0.08 \text{ мОм/м}$
Двигатели		См. подраздел 4.2 (часто можно пренебречь для низкого напряжения)	
Ток трехфазного КЗ в кА		$I_{sc} = \frac{U_{20}}{\sqrt{3} \sqrt{R_T^2 + X_T^2}}$	

$U_{20}$ : межфазное напряжение холостого хода вторичной обмотки понижающего трансформатора (В).

$P_{sc}$ : мощность трехфазного короткого замыкания на высоковольтных вводах понижающих трансформаторов (кВА).

$P_{cu}$ : общие потери трехфазной мощности в понижающих трансформаторах (Вт).

$P_n$ : номинальная мощность понижающего трансформатора (кВА).

$U_{sc}$ : напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора (%).

$R_t$ : общее активное сопротивление,  $X_t$ : общее реактивное сопротивление.

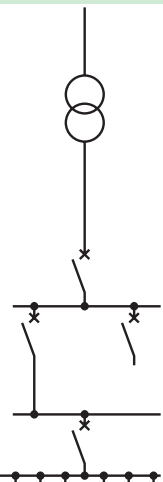
(1)  $\rho$  = удельное сопротивление рабочего провода при нормальной температуре:

- $\rho = 22.5 \text{ мОм} \times \text{мм}^2/\text{м}$  для меди;
- $\rho = 36 \text{ мОм} \times \text{мм}^2/\text{м}$  для алюминия.

(2) Если имеется несколько проводов на фазу, подключенных параллельно, то разделите сопротивление одного провода на количество проводов. Значение реактивного сопротивления остается практически неизменным.

Рис. G36: Сводная таблица полных сопротивлений для различных частей цепи КЗ

■ Пример вычисления тока КЗ (см. **рис. G37**)

Установка низкого напряжения (НН)		R (мОм)	X (мОм)	R <sub>T</sub> (мОм)	X <sub>T</sub> (мОм)	$I_{sc} = \frac{420}{\sqrt{3} \sqrt{R_T^2 + X_T^2}}$
	Сеть ВВ P <sub>sc</sub> = 500 МВА	0.035	0.351			
	Трансформатор 20 кВ/420 В P <sub>n</sub> = 1000 кВА U <sub>k</sub> = 5% P <sub>cu</sub> = 13.3 x 10 <sup>3</sup> Вт	2.24	8.10			
	Одножильные кабели 5 м медь 4 x 240 мм <sup>2</sup> /фаза	$R_c = \frac{22.5}{4} \times \frac{5}{240} = 0.12$	$X_c = 0.08 \times 5 = 0.40$	2.41	8.85	$I_{sc1} = 26 \text{ кА}$
	Главный автоматический выключатель	R <sub>D</sub> = 0	X <sub>D</sub> = 0.15			
	Сборные шины 10 м	R <sub>B</sub> = 0	X <sub>B</sub> = 1.5	2.41	10.5	$I_{sc2} = 22 \text{ кА}$
	Трёхжильный кабель 100 м 95 мм <sup>2</sup> (медь)	$R_c = 22.5 \times \frac{100}{95} = 23.68$	$X_c = 100 \times 0.08 = 8$	26.1	18.5	$I_{sc3} = 7.4 \text{ кА}$
Трёхжильный кабель 20 м Кабель 10 мм <sup>2</sup> (медь) для конечных цепей	$R_c = 22.5 \times \frac{20}{10} = 45$	$X_c = 20 \times 0.08 = 1.6$	71.1	20.1	$I_{sc4} = 3.2 \text{ кА}$	

**Рис. G37:** Пример вычисления тока КЗ для низковольтной установки, питаемой напряжением 400 В (номинальное значение) от понижающего трансформатора мощностью 1 000 кВА

#### 4.3 Ток $I_{sc}$ в конце линии, в зависимости от $I_{sc}$ в ее начале

Сеть, изображенная на **рис. G38**, показывает типичный случай для применения таблицы на **рис. G39** на следующей странице, которая составлена «методом композиции» (описан в главе F, подраздел 6.2). Такие таблицы позволяют быстро получить достаточно точное значение тока КЗ в точке сети, зная:

- значение тока КЗ в точке, расположенной выше по сети от рассматриваемой точки;
- длину и состав цепи между точкой, в которой известно значение тока КЗ, и точкой, в которой его нужно определить.

После этого достаточно выбрать автоматический выключатель, который имеет отключающую способность, ближайшую большую по отношению к значению, указанному в таблице.

Если нужны более точные значения, то можно сделать подробный расчет (см. подраздел 4.2) или использовать программный пакет, например Ecodial. Более того, в таком случае рекомендуется рассмотреть возможность использования каскадной технологии, при которой установка токоограничивающего автоматического выключателя на верхнем уровне цепи позволит всем автоматическим выключателям, установленным ниже по цепи, иметь номинальный ток КЗ намного ниже, чем это было бы необходимо при других условиях (см. главу Н, подраздел 4.5).

## Описание метода

Выберите сечение провода в колонке для медных проводов (в данном примере сечение провода равно  $47,5 \text{ мм}^2$ ).

Выберите в строке, соответствующей сечению 47,5 мм<sup>2</sup>, длину провода, равную длине рассчитываемой цепи (или ближайшую меньшую). Опуститесь вертикально по колонке, где указана эта длина и остановитесь на строке в средней секции (из трех секций, выделенных на таблице), которая соответствует известному току КЗ (или ближайшему к ней значению с большей стороны).

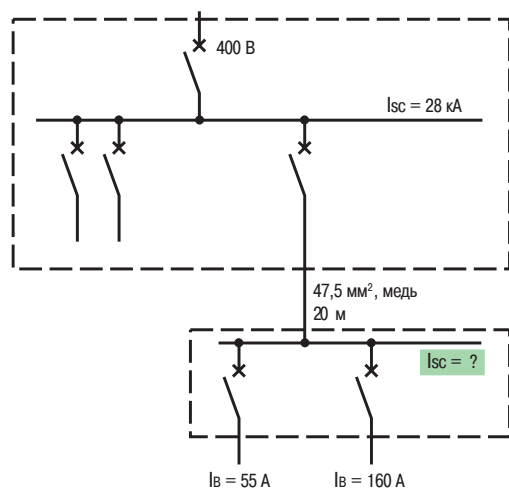
В данном случае значение 30 кА является ближайшим значением к 28 кА с большей стороны. Значение тока КЗ на приемном конце 20-метровой цепи дано на пересечении вертикальной колонки, в которой расположена длина, и горизонтальной строки, соответствующей току  $I_{sc}$  в точке выше по цепи (или ближайшему значению с большей стороны).

В данном примере видно, что это значение равно 14.7 кА.

Процедура поиска для алюминиевых проводов похожа, но здесь нужно будет подняться по вертикальной колонке, чтобы оказаться в средней секции таблицы.

В результате, можно использовать автоматический выключатель, смонтированный на DIN-рейке, с номинальным током 63 А и  $I_{sc} = 25$  кА (например, выключатель NG 125N) для цепи с током 55 А, изображенной на рис. G38.

Выключатель Compact с номинальным током 160 А и током  $I_{sc} = 25$  кА (например, выключатель NS160), можно использовать для защиты цепи на 160 А.



**Рис. G38:** Определение значения тока КЗ ( $I_{sc}$ ) на нижнем уровне, используя таблицу на рис. G41

## 4 Ток короткого замыкания

Медь, 230 / 400 В																												
Поперечное сечение фаз. проводов (мм²)	Длина цепи (м)																											
1.5																				1.3	1.8	2.6	3.6	5.2	7.3	10.3	14.6	21
2.5																		1.1	1.5	2.1	3.0	4.3	6.1	8.6	12.1	17.2	24	34
4																1.2	1.7	2.4	3.4	4.9	6.9	9.7	13.7	19.4	27	39	55	
6														1.8	2.6	3.6	5.2	7.3	10.3	14.6	21	29	41	58	82			
10												2.2	3.0	4.3	6.1	8.6	12.2	17.2	24	34	49	69	97	137				
16										1.7	2.4	3.4	4.9	6.9	9.7	13.8	19.4	27	39	55	78	110	155	220				
25								1.3	1.9	2.7	3.8	5.4	7.6	10.8	15.2	21	30	43	61	86	121	172	243	343				
35								1.9	2.7	3.8	5.3	7.5	10.6	15.1	21	30	43	60	85	120	170	240	340	480				
47.5								1.8	2.6	3.6	5.1	7.2	10.2	14.4	20	29	41	58	82	115	163	231	326	461				
70								2.7	3.8	5.3	7.5	10.7	15.1	21	30	43	60	85	120	170	240	340						
95						2.6	3.6	5.1	7.2	10.2	14.5	20	29	41	58	82	115	163	231	326	461							
120	1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.1	12.9	18.3	26	37	52	73	103	146	206	291	412											
150	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0	7.0	9.9	14.0	19.8	28	40	56	79	112	159	224	317	448										
185	1.5	2.1	2.9	4.2	5.9	8.3	11.7	16.6	23	33	47	66	94	133	187	265	374	529										
240	1.8	2.6	3.7	5.2	7.3	10.3	14.6	21	29	41	58	83	117	165	233	330	466	659										
300	2.2	3.1	4.4	6.2	8.8	12.4	17.6	25	35	50	70	99	140	198	280	396	561											
2x120	2.3	3.2	4.6	6.5	9.1	12.9	18.3	26	37	52	73	103	146	206	292	412	583											
2x150	2.5	3.5	5.0	7.0	9.9	14.0	20	28	40	56	79	112	159	224	317	448	634											
2x185	2.9	4.2	5.9	8.3	11.7	16.6	23	33	47	66	94	133	187	265	375	530	749											
553x120	3.4	4.9	6.9	9.7	13.7	19.4	27	39	55	77	110	155	219	309	438	619												
3x150	3.7	5.3	7.5	10.5	14.9	21	30	42	60	84	119	168	238	336	476	672												
3x185	4.4	6.2	8.8	12.5	17.6	25	35	50	70	100	141	199	281	398	562													
Ток I <sub>sc</sub> выше по цепи (кА)	Ток I <sub>sc</sub> ниже по цепи (кА)																											
100	93	90	87	82	77	70	62	54	45	37	29	22	17.0	12.6	9.3	6.7	4.9	3.5	2.5	1.8	1.3	0.9						
90	84	82	79	75	71	65	58	51	43	35	28	22	16.7	12.5	9.2	6.7	4.8	3.5	2.5	1.8	1.3	0.9						
80	75	74	71	68	64	59	54	47	40	34	27	21	16.3	12.2	9.1	6.6	4.8	3.5	2.5	1.8	1.3	0.9						
70	66	65	63	61	58	54	49	44	38	32	26	20	15.8	12.0	8.9	6.6	4.8	3.4	2.5	1.8	1.3	0.9						
60	57	56	55	53	51	48	44	39	35	29	24	20	15.2	11.6	8.7	6.5	4.7	3.4	2.5	1.8	1.3	0.9						
50	48	47	46	45	43	41	38	35	31	27	22	18.3	14.5	11.2	8.5	6.3	4.6	3.4	2.4	1.7	1.2	0.9						
40	39	38	38	37	36	34	32	30	27	24	20	16.8	13.5	10.6	8.1	6.1	4.5	3.3	2.4	1.7	1.2	0.9						
35	34	34	33	33	32	30	29	27	24	22	18.8	15.8	12.9	10.2	7.9	6.0	4.5	3.3	2.4	1.7	1.2	0.9						
30	29	29	29	28	27	27	25	24	22	20	17.3	14.7	12.2	9.8	7.6	5.8	4.4	3.2	2.4	1.7	1.2	0.9						
25	25	24	24	24	23	23	22	21	19.1	17.4	15.5	13.4	11.2	9.2	7.3	5.6	4.2	3.2	2.3	1.7	1.2	0.9						
20	20	20	19.4	19.2	18.8	18.4	17.8	17.0	16.1	14.9	13.4	11.8	10.1	8.4	6.8	5.3	4.1	3.1	2.3	1.7	1.2	0.9						
15	14.8	14.8	14.7	14.5	14.3	14.1	13.7	13.3	12.7	11.9	11.0	9.9	8.7	7.4	6.1	4.9	3.8	2.9	2.2	1.6	1.2	0.9						
10	9.9	9.9	9.8	9.8	9.7	9.6	9.4	9.2	8.9	8.5	8.0	7.4	6.7	5.9	5.1	4.2	3.4	2.7	2.0	1.5	1.1	0.8						
7	7.0	6.9	6.9	6.9	6.9	6.8	6.7	6.6	6.4	6.2	6.0	5.6	5.2	4.7	4.2	3.6	3.0	2.4	1.9	1.4	1.1	0.8						
5	5.0	5.0	5.0	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.3	4.0	3.7	3.4	3.0	2.5	2.1	1.7	1.3	1.0	0.8						
4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.3	3.1	2.9	2.6	2.2	1.9	1.6	1.2	1.0	0.7						
3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.3	2.1	1.9	1.6	1.4	1.1	0.9	0.7						
2	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.6	1.4	1.3	1.1	1.0	0.8	0.6						
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5						
Алюминий, 230 / 400В																												
Поперечное сечение фаз. проводов (мм²)	Длина цепи (м)																											
2.5																				1.3	1.9	2.7	3.8	5.4	7.6	10.8	15.3	22
4																		1.1	1.5	2.2	3.1	4.3	6.1	8.6	12.2	17.3	24	35
6																1.6	2.3	3.2	4.6	6.5	9.2	13.0	18.3	26	37	52		
10														1.9	2.7	3.8	5.4	7.7	10.8	15.3	22	31	43	61	86			
16												2.2	3.1	4.3	6.1	8.7	12.2	17.3	24	35	49	69	98	138				
25										1.7	2.4	3.4	4.8	6.8	9.6	13.5	19.1	27	38	54	76	108	153	216				
35								1.7	2.4	3.4	4.7	6.7	9.5	13.4	18.9	27	38	54	76	107	151	214	303	428				
47.5						1.6	2.3	3.2	4.6	6.4	9.1	12.9	18.2	26	36	51	73	103	145	205	290	410						
70						2.4	3.4	4.7	6.7	9.5	13.4	19.0	27	38	54	76	107	151	214	303	428							
95					2.3	3.2	4.6	6.4	9.1	12.9	18.2	26	36	51	73	103	145	205	290	411								
120					2.9	4.1	5.8	8.1	11.5	16.3	23	32	46	65	92	130	184	259	367									
150					3.1	4.4	6.3	8.8	12.5	17.7	25	35	50	71	100	141	199	282	399									
185				2.6	3.7	5.2	7.4	10.4	14.8	21	30	42	59	83	118	167	236	333	471									
240	1.2	1.6	2.3	3.3	4.6	6.5	9.2	13.0	18.4	26	37	52	73	104	147	208	294	415										
300	1.4	2.0	2.8	3.9	5.5	7.8	11.1	15.6	22	31	44	62	88	125	177	250	353	499										
2x120	1.4	2.0	2.9	4.1	5.8	8.1	11.5	16.3	23	33	46	65	92	130	184	260	367	519										
2x150	1.6	2.2	3.1	4.4	6.3	8.8	12.5	17.7	25	35	50	71	100	141	200	282	399											
2x185	1.9	2.6	3.7	5.2	7.4	10.5	14.8	21	30	42	59	83	118	167	236	334	472											
2x240	2.3	3.3	4.6	6.5	9.2	13.0	18.4	26	37	52	74	104	147	208	294	415	587											
3x120	2.2	3.1	4.3	6.1	8.6	12.2	17.3	24	34	49	69	97	138	195	275	389	551											
3x150	2.3	3.3	4.7	6.6	9.4	13.3	18.8	27	37	53	75	106	150	212	299	423	598											
3x185	2.8	3.9	5.5	7.8	11.1	15.7	22	31	44	63	89	125	177	250	354	500	707											
3x240	3.5	4.9	6.9	9.8	13.8	19.5	28	39	55	78	110	156	220	312	441	623												

Примечание: для трехфазной системы с межфазным напряжением 230 В, разделите вышеуказанные длины на  $\sqrt{3}$ .

**Рис. G39:** Ток I<sub>sc</sub> в точке ниже по цепи, соответствующий известному значению тока КЗ выше по цепи, длине и поперечному сечению соединяющих проводов, в трехфазной сети номиналом 230/400 В.

### 4.4 Ток короткого замыкания, подаваемый от генератора переменного тока или инвертора: см. главу N.

# 5 Частные случаи тока короткого замыкания

Если защитное устройство должно защищать только от коротких замыканий, нужно удостовериться, что оно будет действовать при минимально возможном уровне тока короткого замыкания, возникающего в цепи.

## 5.1 Расчет минимальных величин тока короткого замыкания

Обычно, в цепях с низким напряжением, одно защитное устройство защищает от всех уровней токов, начиная с порогового уровня перегрузки до максимального уровня тока короткого замыкания. В некоторых случаях, однако, используются отдельно защитное устройство от перегрузки и защитное устройство от короткого замыкания.

### Примеры таких устройств

Рисунки G40 - G42 показывают наиболее распространенные установки, где защита от перегрузки и от коротких замыканий выполняется разными устройствами.

G30

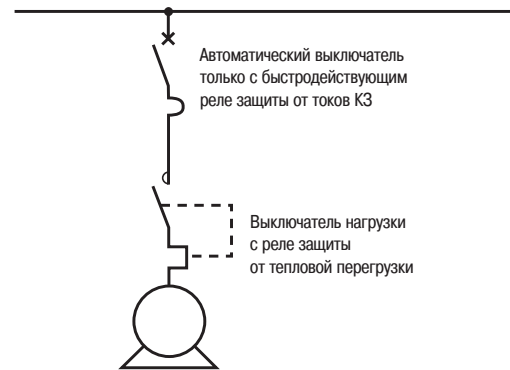


Рис. G41: Защита цепи выключателем без реле тепловой защиты

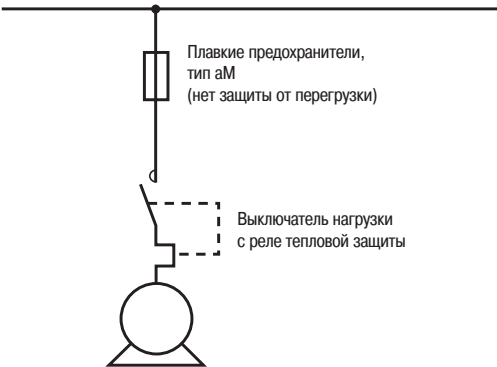


Рис. G40: Цепь защищена плавкими предохранителями aM

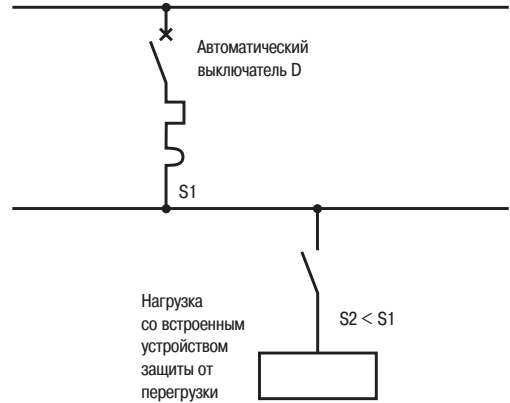


Рис. G42a: Автоматический выключатель D обеспечивает защиту от коротких замыканий, с учетом нагрузки

Как показано на рисунках G40 и G41, наиболее часто цепи, в которых используются отдельные устройства, защищают двигатели. На рисунке G42a представлено еще одно отклонение от основных правил защиты, которое чаще всего используется для магистральных шин и для шин освещения.

### Регулируемый привод

Рисунок G42b показывает функции, обеспечиваемые регулируемым приводом, и при необходимости, некоторые дополнительные функции, выполняемые такими устройствами, как выключатель цепи, термореле, УЗО.

Необходимая защита	Защита, обеспечиваемая регулируемым приводом	Дополнительная защита
Перегрузка кабеля	Есть = (1)	Не обязательно, если (1)
Перегрузка двигателя	Есть = (2)	Не обязательно, если (2)
Короткое замыкание ниже по цепи	Есть	
Перегрузка регулируемого привода	Есть	
Увеличение напряжения	Есть	
Снижение напряжения	Есть	
Потеря фазы	Есть	
Короткое замыкание выше по цепи		Автоматический выключатель (откл. при коротком замыкании)
Внутреннее короткое замыкание		Автоматический выключатель (отключение при коротком замыкании и перегрузке)
Короткое замыкание на землю ниже по цепи (косвенное прикосновение)	(самозащита)	УЗО ≥ 300 мА
Прямое прикосновение		УЗО ≤ 30 мА

Рис. G42b: Защита, которая должна быть обеспечена для устройств регулируемого привода

## 5 Частные случаи тока короткого замыкания

Защитное устройство должно удовлетворять следующим условиям:

- уставки мгновенного отключения  $I_m < I_{sc\_мин}$  при защите цепи автоматическим выключателем;
- ток плавления  $I_a < I_{sc\_мин}$  при защите цепи плавкими предохранителями.

### Условия, которые должны быть учтены

Таким образом, защитное устройство должно удовлетворять следующим двум условиям:

- номинал тока отключения короткого замыкания  $I_{ts} > I_{sc}$ , тока трехфазного короткого замыкания в точке его возникновения в цепи установки;
- отключение минимально возможного тока короткого замыкания в цепи, за время  $t_c$ , совместимое с параметрами термической стойкости проводов в цепи, где:

$$t_c \leq \frac{K^2 S^2}{I_{sc\_мин}^2} \quad (\text{действительно для } t_c < 5 \text{ с})$$

Сравнение кривых отключения или плавки защитных устройств с предельными кривыми термической стойкости для проводов показывает, что это условие соблюдено, если:

- $I_{sc\_мин} > I_m$  (ток уставки автоматического выключателя для мгновенного или с незначительной выдержкой отключения цепи), см. **рис. G45**;
- $I_{sc\_мин} > I_a$  при защите плавкими предохранителями. Значение тока  $I_a$  соответствует точке пересечения кривой плавкого предохранителя и кривой термической стойкости кабеля, см. **рис. G46 и G47**.

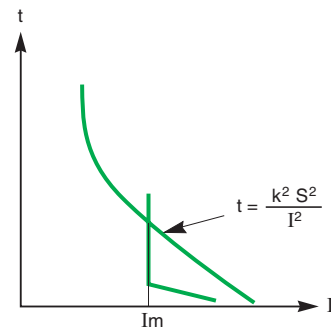


Рис. G45: Защита выключателем

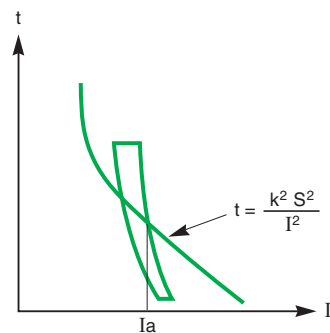


Рис. G46: Защита плавким предохранителем типа aM

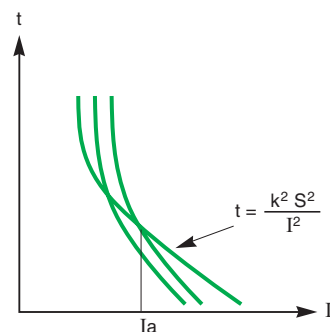


Fig. G47: Защита плавким предохранителем типа gl

G31



На практике это означает, что длина цепи вниз по сети от защитного устройства не должна превышать вычисленную максимальную длину.

$$L_{\max} = \frac{0.8 U S_{ph}}{2p I_m}$$

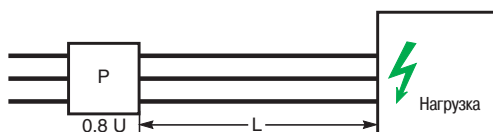
G32

### Практический способ вычисления $L_{\max}$

Должно быть рассчитано предельное влияние полного сопротивления проводов в длинной цепи на значение токов короткого замыкания, и, в соответствии с этим, должна быть ограничена длина цепи. Метод вычисления максимально допустимой длины уже был показан на схемах заземления TN и IT для единичных и двойных замыканий на землю соответственно (см. главу F, подпункты 6.2 и 7.2). Два случая рассмотрены ниже:

#### 1 - вычисление $L_{\max}$ для трехфазной трехпроводной цепи

Минимальный ток короткого замыкания появляется тогда, когда возникает КЗ между двумя фазовыми проводами в удаленном конце цепи (см. **рис. G48**).



**Рис G48:** Вычисление длины для трехфазной трехпроводной цепи

При использовании «традиционного метода» принимается, что напряжение в точке защиты P составляет 80% номинального напряжения во время короткого замыкания, таким образом  $0.8 U = I_{sc} Z_d$ , где:

$Z_d$  - полное сопротивление петли тока КЗ;

$I_{sc}$  - ток КЗ (фаза/фаза);

$U$  - междуфазное номинальное напряжение.

Для кабелей сечением  $\leq 120 \text{ мм}^2$ , реактивное сопротивление можно не учитывать, таким образом

$$Z_d = \rho \frac{2L}{S_{ph}} \quad (1)$$

где:

$\rho$  - удельное сопротивление меди\*1' при средней температуре во время короткого замыкания;

$S_{ph}$  - сечение фазового провода в  $\text{мм}^2$ ;

$L$  - длина в метрах.

Защита кабеля обеспечивается при  $I_m \leq I_{sc}$ , где  $I_m$  - уставка тока быстрого срабатывания автоматического выключателя.

$$\text{В результате } I_m \leq \frac{0.8 U}{Z_d}, \text{ что дает } L \leq \frac{0.8 U S_{ph}}{2p I_m}$$

где  $U = 400 \text{ В}$ ;

$$\rho = 1,25 \times 0,018 = 0,023 \text{ Ом.мм}^2/\text{м}^{(3)}$$

$L_{\max}$  - максимальная длина цепи в метрах.

$$L_{\max} = \frac{k S_{ph}}{I_m}$$

#### 2 - Вычисление $L_{\max}$ для трехфазной четырехпроводной цепи на 230/400 В

Минимальное значение  $I_{sc}$  имеет место, когда замыкание происходит между проводами «фаза» и «нейтраль».

Необходимо вычисление, сходное с приведенным в примере 1, но с использованием следующей формулы (для кабеля  $\leq 120 \text{ мм}^2$  <sup>(3)</sup>).

■ Где  $S_n$  для нейтрального провода =  $S_{ph}$  для фазового провода

$$L_{\max} = \frac{3,333 S_{ph}}{I_m}$$

■ Если  $S_n$  для нейтрального провода <  $S_{ph}$ , тогда

$$L_{\max} = 6,666 \frac{S_{ph}}{I_m} \frac{1}{1+m} \quad \text{где } m = \frac{S_{ph}}{S_n}$$

Для сечений больших, чем те, которые перечислены в таблице, значение реактивного сопротивления должно быть сложено со значением активного сопротивления, чтобы получить полное сопротивление. Реактивное сопротивление кабелей может быть принято равным 0,08 мОм/м (при 50 Гц). При 60 Гц эта величина равна 0,096 мОм/м.

(1) Для большего сечения сопротивление, рассчитанное для проводов, должно быть увеличено, чтобы учесть неоднородную плотность тока в проводе (из-за скин-эффекта и воздействия электромагнитного поля, создаваемого рядом расположенными проводниками).

Используются следующие значения:

150  $\text{мм}^2$ : R + 15%

185  $\text{мм}^2$ : R + 20%

240  $\text{мм}^2$ : R + 25%

300  $\text{мм}^2$ : R + 30%

(2) Или для алюминия в соответствии с материалом провода.

(3) Высокий уровень удельного сопротивления возникает из-за повышенной температуры провода при прохождении тока КЗ.

## 5 Частные случаи тока короткого замыкания

### Приведенные в таблице значения $L_{max}$

На **рис. G49** приведены максимальные длины цепей ( $L_{max}$ ) в метрах для:

- трехфазных четырехпроводных цепей на 400 В (т.е. с нейтральным проводом);
- однофазных двухпроводных цепей на 230 В, защищаемых автоматическими выключателями общего назначения.

В других случаях следует применять поправочные коэффициенты (приведенные на **рис. G53**) к полученной длине. Вычисления основаны на указанных ниже методах, и ток отключения при коротком замыкании должен быть в пределах  $\pm 20\%$  от регулируемого значения  $I_m$ .

Для сечения  $50 \text{ мм}^2$ , вычисления основаны на реальном сечении  $47,5 \text{ мм}^2$ .

Уровень срабатывания по току $I_m$ мгн. электромагнитного расцепителя (А)	Сечение проводов ( $\text{мм}^2$ )														
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	100	167	267	400											
63	79	133	212	317											
80	63	104	167	250	417										
100	50	83	133	200	333										
125	40	67	107	160	267	427									
160	31	52	83	125	208	333									
200	25	42	67	100	167	267	417								
250	20	33	53	80	133	213	333	467							
320	16	26	42	63	104	167	260	365	495						
400	13	21	33	50	83	133	208	292	396						
500	10	17	27	40	67	107	167	233	317						
560	9	15	24	36	60	95	149	208	283	417					
630	8	13	21	32	63	85	132	185	251	370					
700	7	12	19	29	48	76	119	167	226	333	452				
800	6	10	17	25	42	67	104	146	198	292	396				
875	6	10	15	23	38	61	95	133	181	267	362	457			
1000	5	8	13	20	33	53	83	117	158	233	317	400	435		
1120	4	7	12	18	30	48	74	104	141	208	283	357	388	459	
1250	4	7	11	16	27	43	67	93	127	187	253	320	348	411	
1600		5	8	13	21	33	52	73	99	146	198	250	272	321	400
2000		4	7	10	17	27	42	58	79	117	158	200	217	257	320
2500			5	8	13	21	33	47	63	93	127	160	174	206	256
3200			4	6	10	17	26	36	49	73	99	125	136	161	200
4000				5	8	13	21	29	40	58	79	100	109	128	160
5000				4	7	11	17	23	32	47	63	80	87	103	128
6300					5	8	13	19	25	37	50	63	69	82	102
8000					4	7	10	15	20	29	40	50	54	64	80
10000						5	8	12	16	23	32	40	43	51	64
12500						4	7	9	13	19	25	32	35	41	51

**Рис. G49** : Максимальная длина цепи в метрах для медных проводов (для алюминиевых длина должна быть умножена на 0,62)

**Рисунки G50 - G52** на следующей странице показывают максимальную длину цепи ( $L_{max}$ ) в метрах для:

- трехфазных четырехпроводных цепей на 400 В (т.е. с нейтральным проводом);
- однофазных двухпроводных цепей на 230 В.

Они защищаются в обоих случаях бытовыми автоматическими выключателями или выключателями с похожими характеристиками отключения/тока.

В других случаях, применяйте поправочные коэффициенты к полученной длине. Эти коэффициенты приведены на **рис. G53** на следующей странице.

G33

G34

Ном. ток для автомат. выключателей (А)	Сечение проводов (мм²)								
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50
6	200	333	533	800					
10	120	200	320	480	800				
16	75	125	200	300	500	800			
20	60	100	160	240	400	640			
25	48	80	128	192	320	512	800		
32	37	62	100	150	250	400	625	875	
40	30	50	80	120	200	320	500	700	
50	24	40	64	96	160	256	400	560	760
63	19	32	51	76	127	203	317	444	603
80	15	25	40	60	100	160	250	350	475
100	12	20	32	48	80	128	200	280	380
125	10	16	26	38	64	102	160	224	304

Рис. G50: Максимальная длина в метрах цепей с медными проводами, защищенных автоматическими выключателями цепи типа B

Ном. ток для автомат. выключателей (А)	Сечение проводов (мм²)								
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50
6	100	167	267	400	667				
10	60	100	160	240	400	640			
16	37	62	100	150	250	400	625	875	
20	30	50	80	120	200	320	500	700	
25	24	40	64	96	160	256	400	560	760
32	18.0	31	50	75	125	200	313	438	594
40	15.0	25	40	60	100	160	250	350	475
50	12.0	20	32	48	80	128	200	280	380
63	9.5	16.0	26	38	64	102	159	222	302
80	7.5	12.5	20	30	50	80	125	175	238
100	6.0	10.0	16.0	24	40	64	100	140	190
125	5.0	8.0	13.0	19.0	32	51	80	112	152

Рис. G51: Максимальная длина в метрах цепей с медными проводами, защищенных автоматическими выключателями цепи типа C

Ном. ток для автомат. выключателей (А)	Сечение проводов (мм²)								
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50
1	429	714							
2	214	357	571	857					
3	143	238	381	571	952				
4	107	179	286	429	714				
6	71	119	190	286	476	762			
10	43	71	114	171	286	457	714		
16	27	45	71	107	179	286	446	625	848
20	21	36	57	86	143	229	357	500	679
25	17.0	29	46	69	114	183	286	400	543
32	13.0	22	36	54	89	143	223	313	424
40	11.0	18.0	29	43	71	114	179	250	339
50	9.0	14.0	23	34	57	91	143	200	271
63	7.0	11.0	18.0	27	45	73	113	159	215
80	5.0	9.0	14.0	21	36	57	89	125	170
100	4.0	7.0	11.0	17.0	29	46	71	100	136
125	3.0	6.0	9.0	14.0	23	37	57	80	109

Рис. G52: Максимальная длина в метрах цепей с медными проводами, защищенных автоматическими выключателями цепи типа D

Описание цепи		
Трехфазная трехпроводная цепь на 400 В или 1-фазная 2-проводная цепь на 400 В (без «ноля»)		1.73
Однофазная двухпроводная («фаза» и «ноль») цепь на 230 В		1
Трехфазная четырехпроводная цепь на 230/400 В или		
двухфазная трехпроводная цепь на 230/400 В (т.е. без «нейтрали»)	S фаза / S ноль = 1	1
	S фаза / S ноль = 2	0.67

Рис. G53: Поправочные коэффициенты должны быть применены к длине, полученной из рис. G49 - G52

**Примечание:** стандарт МЭК 60898 дает интервал для верхнего предела отключения при токе K3, равный 10-50 In для автоматических выключателей типа D. Европейские стандарты, и рисунок G52, однако, основаны на интервале 10-20 In, который подходит для большинства бытовых и подобных им установок.

## 5 Частные случаи тока короткого замыкания

### Примеры

#### Пример 1

В однофазной двухпроводной установке (230 В, фаза-нейтраль) защита производится автоматическим выключателем на 50 А типа NS80HMA, уставка мгновенного срабатывания равна 500 А (с точностью  $\pm 20\%$ ), т.е. в самом худшем случае понадобится  $500 \times 1,2 = 600$  А, чтобы отключить цепь. Сечение кабеля =  $10 \text{ мм}^2$ , провод изготовлен из меди.

На рисунке G49, строка  $I_m = 500$  А пересекается со столбцом сечения =  $10 \text{ мм}^2$  со значением  $I_{max}$  равным 67 м. Таким образом, автоматический выключатель защищает кабель от коротких замыканий, при условии, что длина кабеля не превышает 67 метров.

#### Пример 2

В трехфазной трехпроводной цепи на 400 В (без нейтрального провода), защита производится автоматическим выключателем на 220 А типа NS250N, уставка мгновенного отключения по току КЗ устройства типа МА установлена на 2000 А ( $\pm 20\%$ ), т.е. в самом худшем случае отключение произойдет при 2400 А. Сечение кабеля =  $120 \text{ мм}^2$ , провод изготовлен из меди.

На рисунке G49 строка  $I_m = 2000$  А пересекается со столбцом сечения =  $120 \text{ мм}^2$  со значением  $I_{max}$  равным 200 м. Так как это трехфазная трехпроводная цепь на 400 В (без нейтрального провода), должен быть применен поправочный коэффициент рисунка G53. Этот коэффициент должен составлять 1.73. Автоматический выключатель, таким образом, будет защищать кабель от тока короткого замыкания, если длина кабеля не будет превышать  $200 \times 1.73 = 346$  метров.

G35

## 5.2 Проверка кабелей на нагрев токами короткого замыкания

### Температурные ограничения

Когда ток короткого замыкания непродолжителен (от десятых долей секунды до 5 секунд), производимое тепло остается в проводе, таким образом, он нагревается.

Если принять, что процесс нагревания является адиабатическим, то это предположение упрощает расчеты и приводит к неутешительным результатам, где температура провода получается выше, чем в действительности, т.к. на практике, некоторое количество тепла из провода перейдет на изоляционный материал.

Для периода в пять секунд или менее, равенство  $I^2t = k^2S^2$  показывает время в секундах, за которое провод сечением  $S$  ( $\text{мм}^2$ ) может выдержать ток в  $I$  ампер, прежде чем температура поднимется настолько, что повредит изоляционный материал.

Коэффициент  $k^2$  показан на рис. G54 ниже.

Изоляция	Медный провод (Cu)	Алюминиевый провод (Al)
ПВХ	13,225	5,776
Сшитый полиэтилен	20,449	8,836

Рис. G54: Значение константы  $k^2$

Метод проверки заключается в подтверждении того, что тепловая энергия  $I^2t$  на 1 Ом в материале провода, которую пропустит защитный автоматический выключатель (из каталога изготовителя), меньше установленной разрешенной энергии для данного провода (как показано на рис. G55 ниже).

S ( $\text{мм}^2$ )	PVC		XLPE	
	Медь	Алюминий	Медь	Алюминий
1.5	0.0297	0.0130	0.0460	0.0199
2.5	0.0826	0.0361	0.1278	0.0552
4	0.2116	0.0924	0.3272	0.1414
6	0.4761	0.2079	0.7362	0.3181
10	1.3225	0.5776	2.0450	0.8836
16	3.3856	1.4786	5.2350	2.2620
25	8.2656	3.6100	12.7806	5.5225
35	16.2006	7.0756	25.0500	10.8241
50	29.839	13.032	46.133	19.936

Рис. G55: Максимально допустимая тепловая нагрузка для кабелей (выражено в амперах<sup>2</sup> x секунду x  $10^6$ )

Обычно проверка термической стойкости кабелей не требуется, кроме тех случаев, когда кабели небольшого сечения установлены близко или непосредственно подсоединены к главному распределительному щиту.

### Пример

Может ли автоматический выключатель C60N надежно защитить медный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена с сечением 4 мм<sup>2</sup>?

Рисунок G55 показывает, что значение  $I^2t$  для кабеля составляет  $0.3272 \times 10^6$ , в то время, как максимальное «пропускаемое значение» для выключателя, указанное в каталоге производителя, намного ниже ( $< 0,1 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ).

Таким образом, кабель надежно защищен автоматическим выключателем при полном использовании его отключающей способности.

### Ограничения по электродинамической стойкости

Для всех типов цепей (отдельных проводов или шин), важно учитывать электродинамический фактор.

Чтобы выдержать электродинамические перегрузки, провода должны быть прочно закреплены и прочно соединены.

Для шинопроводов и кабелепроводов заводского изготовления, шин и т.д., также важно удостовериться, что характеристики электродинамической стойкости, при прохождении тока короткого замыкания, удовлетворительны. Максимальная величина тока, ограничиваемая автоматическим выключателем или плавким предохранителем, должна быть меньше, чем ток электродинамической стойкости шин. Как правило, производители публикуют таблицы с указанием наиболее адекватных условий защиты и эксплуатации своих товаров, что является основным преимуществом таких систем.

## 6 Нулевой защитный проводник (PE)

### 6.1 Схема соединений и выбор провода

Нулевые защитные проводники (РЕ-провода) обеспечивают непрерывное соединение между всеми открытыми и внешними токопроводящими частями установки, с целью создания главной непрерывной эквипотенциальной системы. Такие провода проводят ток повреждения, возникший из-за пробоя в изоляции (между фазовым проводом и открытой токопроводящей частью) к заземленной нейтрали источника. РЕ-провода подсоединяются к главной шине заземления установки.

Главная шина заземления подсоединена к заземляющему электроду (см. главу Е) заземляющим проводником (в США — проводник заземляющего электрода).

Нулевые защитные проводники (РЕ) должны быть:

- покрыты изоляционным материалом и окрашены в желтый и зеленый цвет (полоски);
- защищены от механических и химических повреждений.

Для схем заземления IT и TN настоятельно рекомендуется, чтобы нулевые защитные РЕ-проводники прокладывались в непосредственной близости от токоведущих кабелей цепи (то есть, в одной трубе, кабельном канале, кабельном лотке и т.д.). Это условие обеспечивает минимальное возможное индуктивное сопротивление цепи, проводящей ток замыкания на землю. Необходимо отметить, что это условие в шинопроводах выполнено изначально.

#### Схема соединений

Заземляющие провода должны:

- не включать в себя никаких устройств нарушающих непрерывность цепи (например, выключатель, удаляемые вставки, и т.д.);
- индивидуально подсоединять открытые токопроводящие части к главному заземляющему проводнику, то есть, параллельно, а не последовательно;
- иметь отдельный зажим на общих заземляющих шинах в распределительных щитах.

#### Схема TT

Не требуется обязательное прокладывание заземляющего провода в непосредственной близости от токоведущего провода соответствующей цепи, так как не требуются высокие значения тока замыкания на землю, чтобы работала защита типа УЗО, которая используется в установках типа TT.

#### Схемы IT и TN

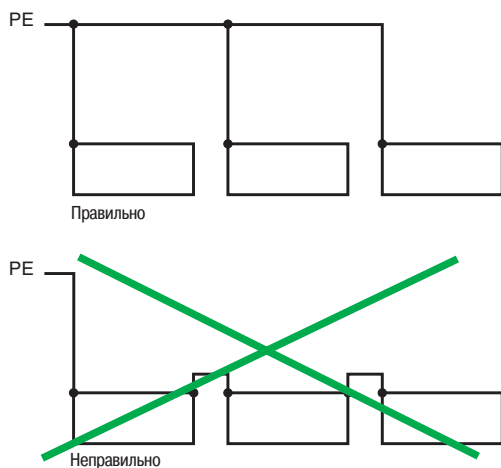
Нулевой защитный проводник (РЕ) или совмещенный защитный и рабочий проводник (PEN), как отмечалось ранее, должен прокладываться как можно ближе к соответствующим токоведущим проводникам цепи и между ними не должно быть ферромагнитного материала. PEN-проводник всегда должен подсоединяться непосредственно к заземляющему зажиму устройства, с перемычкой между клеммами нейтрали и заземления на самом устройстве (см. [рис. G57](#)).

- Схема TN-C (нейтральный и заземляющий провода объединены в один заземляющий нейтральный провод (PEN))

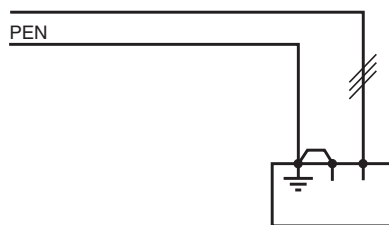
Защитная функция PEN-проводника имеет более высокий приоритет, и поэтому все правила, применяемые к заземляющим проводникам, также строго применяются к защитным заземляющим проводникам.

- Переход от схемы TN-C к схеме TN-S

Заземляющий проводник установки подсоединяется к зажиму или шине PEN (см. [рис. G58](#)), обычно на входе установки. Вниз по сети от точки разделения, нулевой защитный проводник не может быть подсоединен к нулевому рабочему проводнику.



**Рис. G56:** Плохая схема соединений, в которой не защищены все устройства, расположенные ниже по цепи



**Рис. G57:** Прямое подключение PEN-провода к заземляющему зажиму устройства



**Рис. G58:** Схема TN-C-S

Типы материалов

Все материалы, перечисленные ниже на рис. G59, можно использовать для заземляющих проводников, при условии, что выполняются условия, указанные в последней колонке.

Тип защитного заземляющего проводника (PE)	Схема IT	Схема TN	Схема TT	Условия, которые должны выполняться
Дополнительный провод	В том же кабеле, что и фазовые проводники, или в той же кабельной трассе	Настоятельно рекомендуется	Правильно	Заземляющий провод должен иметь изоляцию того же уровня, что и фазные провода
Независимо от фазовых проводников	Возможно <sup>(1)</sup>	Возможно <sup>(1) (2)</sup>	Правильно	■ Заземляющий провод может быть неизолированным и изолированным <sup>(2)</sup>
Металлический кожух шинной магистрали или других готовых кабельных каналов <sup>(5)</sup>	Возможно <sup>(3)</sup>	PE - возможно <sup>(3)</sup> PEN <sup>(8)</sup>	Правильно	■ Электрическая непрерывность провода должна обеспечиваться защитой от повреждений, связанных с механическими, химическими и электромеханическими воздействиями
Внешнее покрытие открытых проводников с минеральной изоляцией (например, кабели типа Yugoalex)	Возможно <sup>(3)</sup>	PE - возможно <sup>(3)</sup> PEN - не рекомендуется <sup>(2)(3)</sup>	Возможно	■ Проводимость провода должна быть адекватной
Определенные внешние токопроводящие элементы <sup>(6)</sup> , например: ■ Стальные строительные конструкции ■ Рамы станков ■ Трубы водопровода <sup>(7)</sup>	Возможно <sup>(4)</sup>	PE - возможно <sup>(4)</sup> PEN - запрещено	Возможно	
Металлические кабелепроводы, такие как трубы <sup>(9)</sup> , коробка, лотки, шинопроводы	Возможно <sup>(4)</sup>	PE Возможно <sup>(4)</sup> PEN Не рекомендуется <sup>(2)(4)</sup>	Возможно	

Запрещается использовать в качестве заземляющих проводников: металлические кабелепроводы (9), газовые трубы, трубы для горячей воды, броню кабеля в виде лент (9) или оплетки (9).

- (1) В схемах TN и IT, отключение по току повреждения обычно осуществляется устройствами максимальной токовой защиты (плавкий предохранитель или выключатель), поэтому сопротивление петли тока повреждения должно быть достаточно низким, чтобы обеспечить правильную работу реле защиты. Самым надежным средством обеспечить низкое сопротивление токовой петли является использование дополнительной жилы в кабеле, который используется для проводов цепи (или проложенной в том же кабельном пути).
- Этот прием минимизирует индуктивное сопротивление и, таким образом, полное сопротивление контура.
- (2) PEN-провод – это нейтральный провод, который также используется как защитный заземляющий провод. Это означает, что ток может течь по нему в любое время (при отсутствии замыкания на землю). По этой причине в качестве PEN-провода рекомендуется применять изолированный провод.
- (3) Производитель предоставляет необходимые значения для элементов сопротивления R и X (фаза/PE, фаза/PEN), которые включаются в вычисление полного сопротивления петли короткого замыкания на землю.
- (4) Возможно, но не рекомендуется, так как полное сопротивление петли короткого замыкания на землю неизвестно на стадии проектирования. Выполнение измерений на уже законченной установке является единственным практическим средством обеспечения адекватной защиты людей от поражения электрическим током.
- (5) Должны позволять подключение других заземляющих проводников. Примечание: такие элементы должны иметь цветовую индикацию в виде желтых и зеленых полос, длиной от 15 до 100 мм (или буквы PE на расстоянии менее 15 см от каждого конца).
- (6) Эти элементы можно демонтировать, только если были установлены другие элементы, обеспечивающие непрерывность защиты.
- (7) С согласия соответствующих органов, отвечающих за воду.
- (8) В готовых шинопроводах и подобных элементах, металлический кожух можно использовать как PEN-провод, подключенный параллельно с соответствующей шиной, или другим заземляющим проводом в данном кожухе.
- (9) Запрещено только в некоторых странах, обычно же разрешено использовать как дополнительный эквипотенциальный провод.

Рис. G59: Выбор заземляющих проводов PE

6.2 Выбор сечения провода

Данные на рис. G60 ниже основаны на французском национальном стандарте NF C 15-100 для низковольтных установок. В этой таблице даны два метода определения подходящего сечения, как для нулевых защитных проводников (PE), так и для совмещенных защитных и рабочих проводников (PEN), а также для проводника заземляющего электрода.

Описание двух методов:

	Сечение фазовых проводников S <sub>ph</sub> (мм <sup>2</sup> )	Мин. сечение РЕ-проводника (мм <sup>2</sup> )	Мин. сечение PEN-проводника (мм <sup>2</sup> )	
			Медь	Алюминий
Упрощенный метод <sup>(1)</sup>	S <sub>ph</sub> ≤ 16	S <sub>ph</sub> <sup>(2)</sup> 16	S <sub>ph</sub> <sup>(3)</sup> 16	S <sub>ph</sub> <sup>(3)</sup>
	16 < S <sub>ph</sub> ≤ 25		25	
	25 < S <sub>ph</sub> ≤ 35			
	35 < S <sub>ph</sub> ≤ 50	S <sub>ph</sub> /2	S <sub>ph</sub> /2	
	S <sub>ph</sub> > 50			
Адиабатический метод	Любой размер	$S_{PE/PEN} = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} \quad (3) \ (4)$		

- (1) Данные действительны, если предлагаемый проводник выполнен из того же материала, что и линейный проводник, если нет, то необходимо применить корректирующий коэффициент.
- (2) Когда PE-провод отделен от фазовых проводов цепи, необходимо соблюдать следующие минимальные значения:  
■ 2,5 мм<sup>2</sup> если PE механически защищен;  
■ 4 мм<sup>2</sup> если PE не является механически защищенным.
- (3) Из условия механической прочности PEN-проводник должен иметь сечение не менее 10 мм<sup>2</sup> для меди или 16 мм<sup>2</sup> для алюминия.
- (4) Применение данной формулы показано в таблице G55.

Рис. G60: Минимальное сечение для PE-проводов и заземляющих проводов (к заземляющему электроду установки)

## ■ Адиабатический (совпадает с описанным в МЭК 60724)

Данный метод, достаточно экономичный и обеспечивающий защиту проводника от перегрева, дает в результате меньшие значения сечения, по сравнению с сечением фазных проводников цепи. Результат иногда бывает несовместим с необходимостью в схемах IT и TN минимизировать полное сопротивление петли короткого замыкания на землю, чтобы обеспечить правильную работу быстродействующих реле максимальной защиты. Таким образом, на практике этот метод используется для установок типа TT, и для определения размеров заземляющего проводника <sup>(1)</sup>.

## ■ Упрощенный

Этот метод основан на связи сечений заземляющих проводников с сечениями фазных проводников соответствующей цепи, предполагая, что в каждом случае используется один и тот же материал провода.

Таким образом, на рис. G60 для:

$$S_{ph} \leq 16 \text{ мм}^2 \quad S_{PE} = S_{ph}$$

$$16 < S_{ph} \leq 35 \text{ мм}^2 \quad S_{PE} = 16 \text{ мм}^2$$

$$S_{ph} > 35 \text{ мм}^2 \quad S_{PE} = \frac{S_{ph}}{2}$$

**Примечание:** когда в схеме TT заземляющий электрод установки находится вне зоны влияния заземляющего электрода источника, сечение заземляющего провода можно ограничить до 25 мм<sup>2</sup> (для меди) или 35 мм<sup>2</sup> (для алюминия).

Нейтральный проводник можно использовать как PEN-провод только тогда, когда его сечение равно или более чем: 10 мм<sup>2</sup> (медь) или 16 мм<sup>2</sup> (алюминий).

Более того, использование PEN-провода в гибком кабеле не разрешается. Так как PEN-провод также действует в качестве нейтрального провода, его сечение в любом случае не может быть меньше, чем сечение, необходимое для нейтрального провода, согласно подразделу 7.1 данной главы.

Это сечение не может быть меньше, чем сечение фазных проводников, кроме случаев:

■ номинальная мощность в кВА однофазных нагрузок меньше, чем 10% от общей величины нагрузки в кВА;

■ ток  $I_{max}$ , который, как ожидается, будет проходить через нейтраль при нормальных обстоятельствах, меньше, чем ток, допустимый для выбранного сечения кабеля.

Более того, должна быть обеспечена защита нейтрального провода защитными устройствами, установленными для защиты фазных проводников (см. подраздел 7.2 данной главы).

## Значения коэффициента K для использования в формуле

Эти значения одинаковы для нескольких национальных стандартов, а диапазоны превышения температуры, взятые вместе со значениями коэффициента K и верхними пределами температуры для различных классов изоляции, соответствуют значениям, опубликованным в МЭК 60724 (1984). Данные, представленные на рис. G61, наиболее часто используются для проектирования низковольтной установки.

Значения K		Тип изоляции	
		Поливинилхлорид (ПВХ)	Сшитый полиэтилен (XLPE) Этиленпропиленовый каучук (EPR)
Конечная температура (°C)		160	250
Начальная температура (°C)		30	30
Изолированный провод, не встроенный к кабелю или неизолированный провод в контакте с оболочкой кабеля	Медь	143	176
	Алюминий	95	116
	Сталь	52	64
Провода многожильного кабеля	Медь	115	143
	Алюминий	76	94

**Рис. G61:** Значения коэффициента K для низковольтных РЕ-проводов, обычно используемые в национальных стандартах и удовлетворяющих стандарту МЭК 60724

(1) Заземляющий электрод.



Защитный провод должен соответствовать принятым национальным стандартам.

### 6.3 Защитный провод между понижающим трансформатором и главным распределительным щитом

Все фазовые и нейтральные проводники, расположенные выше по цепи от главного вводного автоматического выключателя, который контролирует и защищает главный распределительный щит (ГРЩ), защищены устройствами, расположенными на высоковольтной стороне трансформатора. Эти проводники, включая заземляющий проводник, должны иметь соответствующие провода. Определение сечений фазных и нейтральных проводов, идущих от трансформатора, объяснено на примерах в подразделе 1.6 данной главы (для цепи С1 системы, показанной на рис. G8). Рекомендуемые размеры сечений для неизолированных и изолированных заземляющих проводников, идущих от нулевой точки трансформатора (рис. G62), перечислены ниже на рис. G63. Учитываемая номинальная мощность в кВА является суммой всех (если их несколько) мощностей трансформаторов, подключенных к общему распределительному щиту.

G40

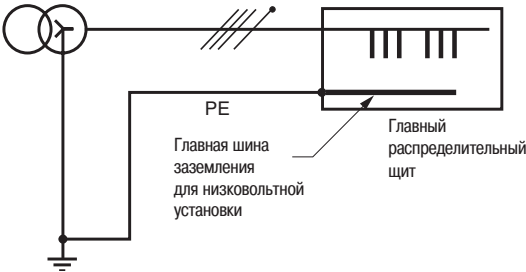


Рис. G62: PE- проводник к главной шине заземления главного распределительного щита

Таблица показывает сечение проводов в мм<sup>2</sup> в зависимости от:

- номинальной мощности понижающего трансформатора(ов) в кВА;
- время устранения повреждения высоковольтным реле защиты, в секундах;
- типы изоляции и материалов провода.

Если высоковольтная защита осуществляется плавким предохранителем, то используйте колонки «0.2 с».

В схемах IT, если устанавливается реле защиты от увеличения напряжения (между нулевой точкой трансформатора и землей), размеры проводников для соединения с устройством должны определяться так же, как описано выше для заземляющих проводников.

Мощность (кВА) (230/400 В)	Материал провода	Неизолированные провода			Провода с изоляцией ПВХ			Проводники из СПЭ		
		0.2	0.5	-	0.2	0.5	-	0.2	0.5	-
		Алюминий, t(c)	0.2	0.5	-	0.2	0.5	-	0.2	0.5
≤ 100	Сечение	25	25	25	25	25	25	25	25	25
160	провода PE	25	25	35	25	25	50	25	25	35
200	SPE (мм²)	25	35	50	25	35	50	25	25	50
250		25	35	70	35	50	70	25	35	50
315		35	50	70	35	50	95	35	50	70
400		50	70	95	50	70	95	35	50	95
500		50	70	120	70	95	120	50	70	95
630		70	95	150	70	95	150	70	95	120
800		70	120	150	95	120	185	70	95	150
1,000		95	120	185	95	120	185	70	120	150
1,250		95	150	185	120	150	240	95	120	185

Рис. G63: Сечение PE-проводника между понижающим трансформатором и главным распределительным щитом, в зависимости от номинальной мощности трансформатора и времени устранения повреждения.

## 6.4 Эквипотенциальный проводник

### Главный эквипотенциальный проводник

Обычно этот проводник должен иметь сечение, равное, как минимум, половине сечения самого большого РЕ-проводника, но в любой случае оно не должно превышать 25 мм<sup>2</sup> (медь) или 35 мм<sup>2</sup> (алюминий), а минимальное сечение проводника равно 6 мм<sup>2</sup> (медь) или 10 мм<sup>2</sup> (алюминий).

### Дополнительный эквипотенциальный проводник

Этот проводник позволяет подсоединить открытые токопроводящие части, которые удалены от главного эквипотенциального проводника (РЕ-проводника), к местному защитному проводнику. Его сечение должно быть равно, как минимум, половине сечения защитного проводника, к которому он подсоединен.

Если он соединяет две открытые токопроводящие части (M1 и M2 на рис. G64), его сечение должно быть, по крайней мере, равно или меньше, чем сечение двух РЕ-проводников (для M1 и M2). Эквипотенциальные проводники, которые не встроены в кабель, должны быть защищены от механических повреждений (прокладка в трубах, коробах и т.п.), там, где это возможно.

Другой важной целью использования дополнительных эквипотенциальных проводов является снижение полного сопротивления петли тока КЗ на землю, особенно для схем защиты от косвенного прикосновения в установках заземления типа TN или IT, и в специальных местах с повышенным риском поражения током (согласно МЭК 60364-4-41).

G41

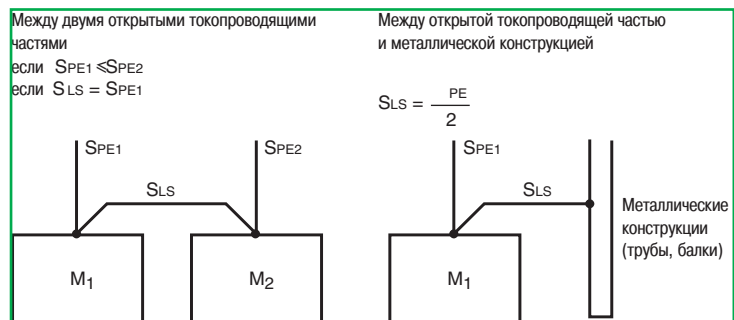


Рис. G64: Дополнительные эквипотенциальные проводники

Площадь сечения и защита нейтрального провода, кроме требований к пропускной способности по току, зависят от нескольких факторов, а именно:

- типа системы заземления – TT, TN и т.д.;
- токов высших гармоник;
- способа защиты от опасностей косвенного прикосновения, в соответствии с методами, описанными выше.

Нейтральный провод, согласно правилам, должен быть синего цвета.

Изолированный PEN-провод должен обозначаться одним из следующих способов:

- желто-зеленые полосы по всей длине, и дополнительно, голубые отметки на концах;
- голубой по всей длине и, дополнительно, желто-зеленые отметки на концах.

## 7.1 Определение сечения нейтрального провода

### Влияние типа системы заземления

#### Схемы TT, TN-S и IT

■ Однофазные цепи с сечением проводов менее 16 мм<sup>2</sup> (медь) и 25 мм<sup>2</sup> (алюминий): сечение нейтрального провода должно быть равно сечению фаз.

■ Трехфазные цепи с сечением > 16 мм<sup>2</sup> (медь) или 25 мм<sup>2</sup> (алюминий): сечение нейтрального провода можно выбрать:

- равным сечению фазных проводов;
- меньше, при условии, что:

- ток, который, как ожидается, будет течь через нейтраль в нормальных условиях, меньше, чем допустимое значение  $I_z$ . Влияние гармоник кратных трем<sup>(1)</sup> должно учитываться;
- нейтральный провод должен быть защищен от короткого замыкания, в соответствии со следующим подразделом G-7.2;
- сечение нейтрального провода, равно, как минимум, 16 мм<sup>2</sup> (медь) или 25 мм<sup>2</sup> (алюминий).

#### Схема TN-C

В теории применяются те же условия, что описаны выше, но на практике, нейтральный провод ни в коем случае не должен быть разомкнут, так как он выполняет роль заземляющего и нейтрального проводов (см. рис. G60, колонка “Сечение PEN-провода”).

#### Схема IT

В целом, не рекомендуется распределять нейтральный провод, то есть трехфазная трехпроводная схема является предпочтительной. Когда нужна трехфазная четырехпроводная установка, то применяются условия, описанные выше для схем TT и TN-S.

### Влияние токов высших гармоник

#### Влияние гармоник третьего порядка и кратных им

Токи высших гармоник генерируются нелинейными нагрузками, подключенными к электроустановке (компьютеры, лампы дневного света, выпрямители, электронные прерыватели нагрузки) и могут вызывать большие токи в нейтральном проводе. В трехфазных установках имеют тенденцию суммироваться в нейтрале особенно гармоники третьего порядка и кратными, так как:

- основные токи не совпадают по фазе на  $2\pi/3$ , поэтому их сумма равна нулю;
- с другой стороны, гармоники третьего порядка трех фаз всегда позиционируются одинаковым образом относительно своих основных токов и совпадают по фазе друг с другом (см. [рис. G65a](#))

(1) Гармоники третьего порядка и кратные им.

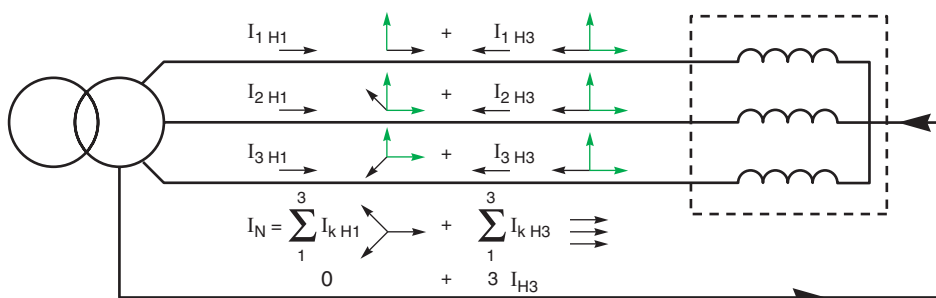
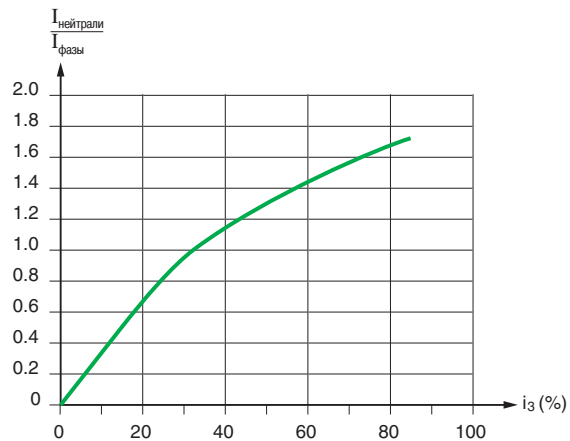


Рис. G65a : Гармоники третьего порядка совпадают по фазе и суммируются в нейтрале

## 7 Нейтральный провод

На **рис. G65b** показана величина коэффициента загрузки нейтрального провода, в зависимости от наличия третьей гармоники.

На практике, максимальная величина коэффициента загрузки не может превышать  $\sqrt{3}$ .



**Рис. G65b** : Нагрузка нейтрального провода в зависимости от наличия третьей гармоники

### Коэффициенты снижения для гармонических токов в четырехжильных и пятижильных кабелях, где 4 жилы передают ток

Базовые расчеты кабелей относятся только к кабелям с тремя токоведущими жилам, то есть, в нейтральном проводе ток отсутствует. Из-за тока третьей гармоники, в нейтральном проводе возникает ток. В результате, такой ток в нейтральном проводе создает дополнительный нагрев для трехфазных жил и, таким образом, необходимо применять понижающий коэффициент при расчете фазных жил (см. **рис. G66**).

Понижающие коэффициенты, применяемые при расчете пропускной способности по току кабеля с тремя токоведущими проводами, дают пропускную способность кабеля с четырьмя токоведущими проводами, где ток в четвертом проводе появляется из-за гармоник. Понижающие коэффициенты также учитывают нагрев проводов из-за токов высших гармоник.

- Там, где ожидается, что ток в нейтрали будет выше, чем ток в фазах, сечение кабеля должно выбираться на основе тока в нейтральном проводе.
- Там, где сечение жил кабеля выбрано по току в нейтрали, который лишь незначительно выше фазового тока, необходимо снизить значение пропускной способности по току для трех фазных жил.
- Если ток в нейтрали составляет более 135% от тока в фазах, и сечение кабеля выбирается на основе тока в нейтрали, то три фазовых провода не будут нести полную нагрузку. Снижение тепла, выделяемого фазовыми проводами, снижает тепло, выделяемое нейтральным проводом до такой степени, что нет необходимости применять понижающий коэффициент к пропускной способности по току для трех нагруженных проводов.

Третья гармоническая составляющая фазного тока (%)	Коэффициент снижения	
	Выбор размера основан на токе в фазных проводах	Выбор размера основан на токе в нейтральном проводе
0 - 15	1.0	-
15 - 33	0.86	-
33 - 45	-	0.86
> 45	-	1.0

**Рис. G66**: Коэффициенты снижения из-за токов высших гармоник в четырехжильных и пятижильных кабелях (согласно стандарту МЭК 60364-5-52)

### Примеры

Рассмотрим трехфазную цепь с расчетной нагрузкой 37 А, в которой используется четырехжильный кабель с изоляцией ПВХ, с креплением к стене, метод монтажа С. Согласно рис. G24, кабель 6 мм<sup>2</sup> с медными проводниками имеет пропускную способность 40 А и, таким образом, допустим, если в цепи не присутствуют гармоники.

■ Если присутствует 20% тока третьей гармоники, то применяется коэффициент снижения 0,86, и расчетная нагрузка становится равной:  $37/0,86 = 43$  А. Для этой нагрузки необходим кабель сечением 10 мм<sup>2</sup>.

■ Если присутствует 40% тока третьей гармоники, то сечение кабеля выбирается на основе тока в нейтральном проводе, который равен:  $37 \times 0,4 \times 3 = 44,4$  А и применяется коэффициент снижения 0,86, поэтому расчетная нагрузка будет:  $44,4/0,86 = 51,6$  А. Для этой нагрузки необходим кабель сечением 10 мм<sup>2</sup>.

■ Если присутствует 50% тока третьей гармоники, то сечение кабеля также выбирается на основе тока в нейтральном проводе:  $37 \times 0,5 \times 3 = 55,5$  А. В этом случае коэффициент равен 1 и потребуется кабель сечением 16 мм<sup>2</sup>.

## 7.2 Защита нейтрального провода (см. рис. G67 на след. стр.)



### Защита от перегрузки

Если сечение нейтрального провода выбрано правильно (включая гармоники), то не требуется специальная защита нейтрального провода, так как он защищен устройствами защиты фазных проводников.

Однако, на практике, если сечение нейтрального провода меньше, чем сечение фазного провода, должна быть установлена защита нейтрального провода от перегрузки.



### Защита от короткого замыкания

Если сечение нейтрального провода меньше, чем сечение фазного проводника, то он должен быть защищен от короткого замыкания.

Если сечение нейтрального провода равно или больше, чем сечение фазного проводника, то не требуется специальная защита нейтрального проводника, так как он защищен защитой фазных проводников.



## 7.3 Отключение нейтрального провода (см. рис. G67 на след. стр.)

Необходимость отключать или не отключать нейтральный провод связана с защитой от косвенного прикосновения.

### В схеме TN-C

Нейтральный провод ни в коем случае не должен быть разомкнут, так как он выполняет роль заземляющего и нейтрального проводов.

### В схемах TT, TN-S и IT

В случае повреждения, автоматический выключатель цепи отключит все полюса, включая полюс нейтрали, то есть, автоматический выключатель является многополюсным.

В случае плавких предохранителей, это действие может быть достигнуто только непрямым способом, когда срабатывание одного или более предохранителей приводит к механическому размыканию всех полюсов в соответствующем выключателе нагрузки, подсоединенным последовательно.



## 7.4 Изоляция нейтрального провода

(см. рис. G67 на след. стр.)

Общепризнано, чтобы каждый провод имел возможность отключения от источника.

## 7 Нейтральный провод

	TT	TN-C	TN-S	IT
Одна фаза (фаза-нейтраль)				
Одна фаза (фаза-фаза)				
Три фазы четыре провода $S_n \geq S_{ph}$				
Три фазы четыре провода $S_n < S_{ph}$				

(A) Разрешено для схем TT или TN-S, если установлена защита типа УЗО в начале цепи или выше ее, и отсутствует дополнительный нейтральный провод ниже по цепи от точки защиты.

(B) Защита нейтрального провода от перегрузки по току не требуется:

- если нейтральный провод защищен от короткого замыкания с помощью устройства, установленного выше по цепи;
- если цепь имеет защиту типа УЗО, чувствительность которой составляет меньше 15% допустимого тока в нейтрали.

Рис. G67: Различные варианты для нейтрального провода

## Пример расчета кабелей (см. Рис. G68)

Установка запитана через трансформатор 1000 кВА. Производственный процесс требует высокой степени бесперебойности питания, что обеспечивается установкой резервного генератора 500 кВА, 400В и применением 3-фазной 3-проводной системы IT в главном распределительном устройстве. Остальная часть установки отделена с помощью разделительного трансформатора 400 кВА, 400/400В. Эта часть – 3-фазная 4-проводная сеть с заземлением по системе TT. Ниже приведена однолинейная схема (см. Рис. G68) и результаты компьютерного анализа цепи C1, выключателя Q1, цепи C6 и выключателя Q6. Этот анализ проведен с помощью программного обеспечения ECDIAL 3.3 (продукт компании Merlin Gerin).

Также приводятся те же расчеты, выполненные по методу, описываемому в данном руководстве.

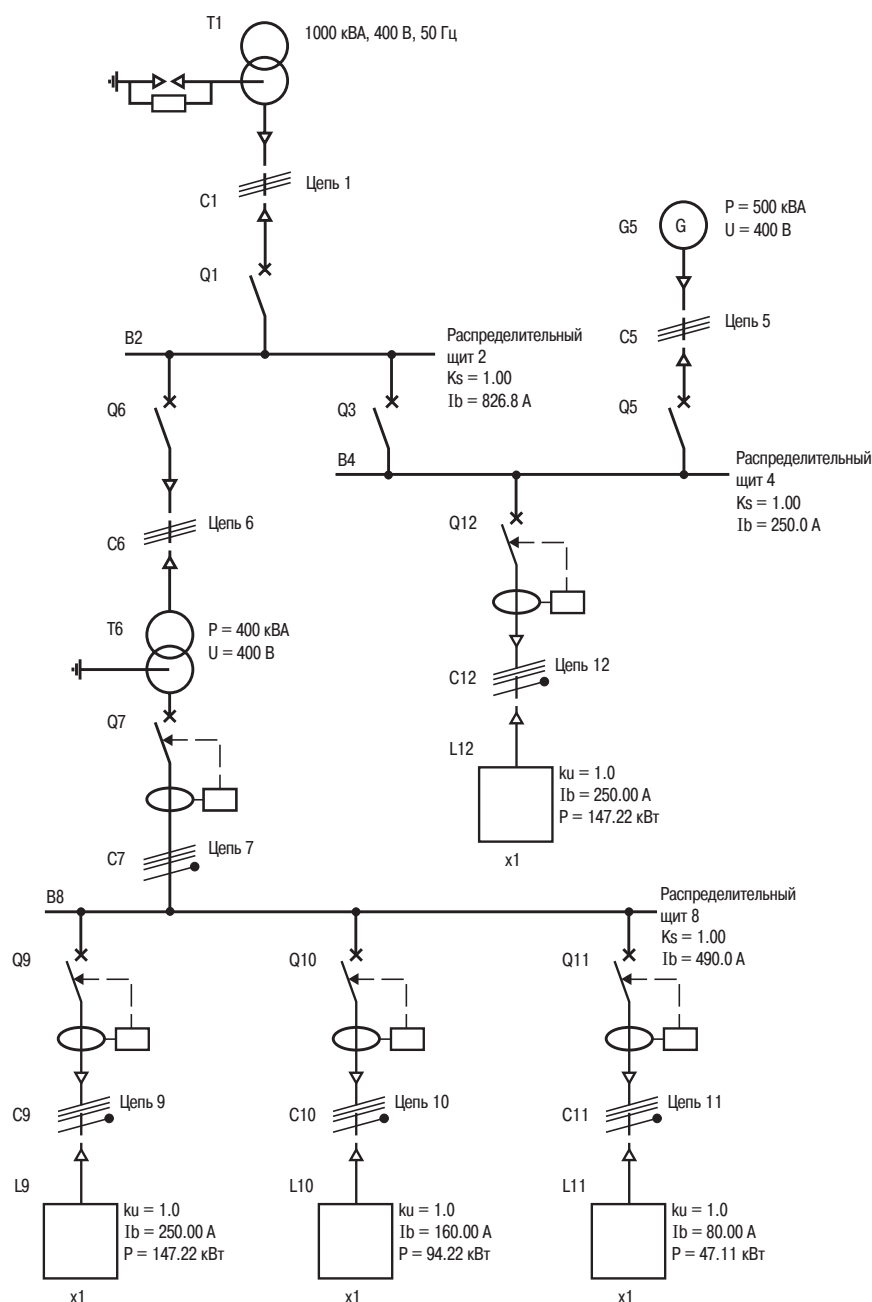


Рис. G68 : Пример однолинейной схемы

## Расчет с помощью ПО Ecodial 3.3

Общие характеристики сети	
Система заземления	IT
Распределенная нейтраль	Нет
Напряжение (В)	400
Частота (Гц)	50
Трансформатор T1	
Число трансформаторов	1
Мощность тока КЗ перед трансформатором (МВА)	500
Ном. мощность (кВА)	1,000
Напряжение КЗ (%)	6
Акт. сопротивление сети средн. напряжения (мОм)	0.0351
Реакт. сопротивление сети средн. напр. (мОм)	0.351
Акт. сопротивление трансформатора (мОм)	2.293
Реакт. сопротив. трансформатора (мОм)	10.333
3-фазный ток КЗ Ik3 (кА)	23.3
Кабель C1	
Макс. ток нагрузки (А)	1374
Тип изоляции	ПВХ
Материал проводников	Медь
Темп. окружающего воздуха (°C)	30
Одно- или многожильный кабель	Одно-
Метод монтажа	F
Число цепей поблизости (Таблица G21b)	1
Прочие коэффициенты	1
Выбранная площадь поперечн. сечения (мм2)	6 x 95
Защитный проводник	1 x 120
Длина (м)	5
Потеря напряжения AU (%)	0.122
Общая потеря напряжения AU (%)	0.122
Ток трехфазного КЗ Ik3 (кА)	23
Ток однофазного КЗ на землю Id (кА)	17
Выключатель Q1	
Ток трехфазного КЗ Ik3 перед выключателем (кА)	23
Макс. ток нагрузки (А)	1374
Число полюсов и защищенных полюсов	3P3D
Выключатель	NT 16
Тип	N 1 - 42 кА
Тип расцепителя	Micrologic 5 A
Ном. ток (А)	1600
Шины B2	
Макс. ток нагрузки (А)	1374
Тип	Стандартная по ширине
Темп. окружающего воздуха (°C)	30
Размеры (м и мм)	1 м 2x5 мм x 63 мм
Материал	Медь
Ток трехфазного КЗ Ik3 (кА)	23
Ударный ток трехфазного КЗ Ik (кА)	48
Акт. сопротивление шин R (мОм)	2.52
Реакт. сопротивление шин X (мОм)	10.8
Выключатель Q6	
Ток трехфазного КЗ перед выключателем Ik3 (кА)	23
Макс. ток нагрузки (А)	560
Число полюсов и защищенные полюса	3P3D
Выключатель	NS800
Тип	N - 50 кА
Тип расцепителя	Micrologic 2.0
Ном. ток (А)	800
Предел селективности (кА)	Полная
Кабель C6	
Макс. ток нагрузки (А)	560
Тип изоляции	ПВХ
Материал проводников	Медь
Темп. окружающего воздуха (°C)	30
Одно- или многожильный кабель	Одно-
Метод монтажа	F
Число цепей поблизости (Таблица G20)	1
Другой коэффициент	1
Выбранная площадь поперечн. сечения (мм2)	1 x 300
Защитный проводник	1 x 150
Длина (м)	15
Потеря напряжения AU (%)	.38
Общее падение напряжения AU (%)	.54
Ток трехфазного КЗ Ik3 (кА)	20
Ток однофазного КЗ на землю Id (кА)	13.7
Особые ограничения по размерам	Перегрузки

Fig. G69 : Выборочные результаты расчета с помощью ПО Ecodial (Merlin Gerin)

## Аналогичный расчет с помощью упрощенного метода, рекомендованного в данном руководстве

### Определение параметров цепи C1

Трансформатор среднего/низкого напряжения 1000 кВА имеет номинальное напряжение холостого хода 420В. Цепь C1 должна быть рассчитана на ток

$$I_B = \frac{1,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 420} = 1,374 \text{ А на фазу}$$

Для каждой фазы используется шесть одножильных медных кабелей с изоляцией ПВХ, соединенных параллельно.

Эти кабели прокладываются в лотках по методу F. Поправочные коэффициенты "k":

k1 = 1 (см. Таблицу G12, температура = 30 °C)

k4 = 0,87 (см. Таблицу G17, параллельно проложенные кабели, 1 лоток, ≥ 3 цепи)

Другие коэффициенты в данном примере не используются.

Ток нагрузки с поправкой:

$$I'_{B} = \frac{I_B}{k_1 \cdot k_4} = \frac{1,374}{0.87} = 1,579 \text{ А}$$

Поэтому, ток в каждом проводнике - 263А. Согласно Рис. G21a, площадь поперечного сечения - 95 мм².



Активное и реактивное сопротивления для шести параллельных кабелей при длине 5 м:

$$R = \frac{22.5 \times 5}{95 \times 6} = 0.20 \text{ мОм} \quad (\text{удельное сопротивление материала кабеля: } 22,5 \text{ мОм.мм}^2/\text{м})$$

$$X = 0.08 \times 5 = 0.40 \text{ мОм} \quad (\text{реактивное сопротивление кабеля: } 0,08 \text{ мОм/м})$$

#### Выбор сечения кабеля цепи С6

Цепь С6 запитывает 3-фазный изолирующий трансформатор 400 кВА 400/400В

$$\text{Первичный ток} = \frac{400 \cdot 10^3}{420 \sqrt{3}} = 550 \text{ А}$$

Предлагается использовать одножильный кабель в лотке (без соседних кабелей) при температуре окружающего воздуха 30 °С. Номинальный ток расцепителя выключателя - 560А

Метод монтажа - F, все поправочные коэффициенты "k" равны 1.

Площадь поперечного сечения 240 мм<sup>2</sup> проходит по нагреву. Активное и реактивное сопротивления, соответственно:

$$R = \frac{22.5 \times 15}{240} = 1.4 \text{ мОм}$$

$$X = 0.08 \times 15 = 1.2 \text{ мОм}$$

#### Расчет токов КЗ для выбора выключателей Q1 и Q6 (см. Рис. G70)

Элементы цепей	R (мОм)	X (мОм)	Z (мОм)	I <sub>kmax</sub> (кА)
500 МВА на стороне высокого напряжения	0.04	0.36		
Трансформатор 1 МВА	2.2	9.8	10.0	23
Кабель С1	0.20	0.4		
<b>Итого для Q1</b>	<b>2.44</b>	<b>10.6</b>	<b>10.9</b>	<b>23</b>
Шина В2	3.6	7.2		
Кабель С6	1.4	1.2		
<b>Итого для Q6</b>	<b>4.0</b>	<b>8.4</b>	<b>9.3</b>	<b>20</b>

Fig. G70 : Пример расчета тока трехфазного КЗ

#### Защитный проводник

Тепловые требования: Рис. G60 и G61 показывают, что при использовании адиабатического метода площадь поперечного сечения проводника РЕ для цепи С1 равна:

$$\frac{34800 \times \sqrt{0.2}}{143} = 108 \text{ мм}^2$$

Одножильный проводник 120 мм<sup>2</sup>, размеры которого определены на основе других соображений, указанных ниже, вполне достаточен при условии, что он удовлетворяет требованиям к защите при косвенном прикосновении (т.е., достаточно низкое полное сопротивление).

Для цепи С6, площадь поперечного сечения проводника РЕ:

$$\frac{29300 \times \sqrt{0.2}}{143} = 92 \text{ мм}^2$$

В этом случае подходит проводник 95 мм<sup>2</sup> при условии соблюдения требований к защите при косвенном прикосновении.

### Защита от опасности косвенного прикосновения

Для 3-фазной 3-проводной цепи С6 (Рис. G68) может использоваться формула на странице F27. Максимальная допустимая длина цепи рассчитывается по формуле:

$$L_{\max} = \frac{0.8 \times 240 \times 230 \sqrt{3} \times 1,000}{2 \times 22.5 \left(1 + \frac{240}{95}\right) \times 630 \times 11} = 70 \text{ m}$$

Значение в знаменателе  $I_m = 630 \times 11 = 6930 \text{ A}$ , - это уставка мгновенного расцепителя выключателя 630А. Поэтому, длина 15 м полностью защищена расцепителем автомата мгновенного действия.

### Потеря напряжения

Рис. G28 показывает, что:

■ Для кабеля С1 (6 x 95 мм<sup>2</sup> на фазу)

$$\Delta U = \frac{0.42 (\text{V A}^{-1} \text{ km}^{-1}) \times 1,374 (\text{A}) \times 0.008}{3} = 1.54 \text{ V}$$

$$\Delta U\% = \frac{100}{400} \times 1.54 = 0.38\%$$

■ Для цепи С6

$$\Delta U = \frac{0.21 (\text{V A}^{-1} \text{ km}^{-1}) \times 433 (\text{A}) \times 0.015}{3} = 1.36 \text{ V}$$

$$\Delta U\% = \frac{100}{400} \times 1.36 = 0.34\%$$

Общая потеря напряжения в цепях С1 и С6:  $\Delta U\% = 0.72\%$

G50

# Глава Н

## Низковольтная распределительная аппаратура

Содержание		
1	<b>Основные функции низковольтной распределительной аппаратуры</b>	<b>H2</b>
	1.1 Электрическая защита	H2
	1.2 Изолирование (отключение)	H3
	1.3 Управление	H4
2	<b>Коммутационные аппараты</b>	<b>H5</b>
	2.1 Простые коммутационные устройства	H5
	2.2 Комбинированные коммутационные аппараты	H9
3	<b>Выбор коммутационной аппаратуры</b>	<b>H10</b>
	3.1 Сводная таблица функциональных возможностей	H10
	3.2 Выбор коммутационной аппаратуры	H10
4	<b>Автоматический выключатель</b>	<b>H11</b>
	4.1 Стандарты и описание	H11
	4.2 Основные характеристики автоматического выключателя	H13
	4.3 Другие характеристики автоматического выключателя	H15
	4.4 Выбор автоматического выключателя	H18
	4.5 Согласование характеристик автоматических выключателей	H22
	4.6 Селективное отключение трансформатора на подстанции потребителя	H28

# 1 Основные функции низковольтной распределительной аппаратуры

Назначение распределительной аппаратуры:

- электрическая защита;
- безопасное изолирование от токоведущих частей;
- местная или дистанционная коммутация.

Национальные и международные стандарты определяют способ реализации электрических цепей низковольтных электроустановок, а также характеристики и возможности различных коммутационных аппаратов, которые в совокупности называются распределительной аппаратурой.

Основные функции распределительного устройства:

- электрическая защита;
- электрическое разделение отдельных секций электроустановки;
- местная или дистанционная коммутация.

Эти функции сведены в таблицу, показанную на **рис. Н1**.

За исключением плавких предохранителей, электрическая защита низкого напряжения обычно реализуется в автоматических выключателях с помощью термомангнитных расцепителей и/или отключающих элементов, реагирующих на дифференциальный ток (реже с помощью устройств, реагирующих на дифференциальное напряжение, применение которых допускается стандартами МЭК, но не рекомендуется).

Помимо функций, указанных на рис. Н1, специальными устройствами (разрядниками для защиты от грозовых и иных перенапряжений; реле, соединенными с контакторами, дистанционно управляемыми автоматическими выключателями, комбинированными автоматическими выключателями-разъединителями и т.д.) обеспечиваются другие функции, а именно:

- защита от повышенного напряжения;
- защита от пониженного напряжения.

Электрическая защита:	Изолирование (отключение)	Управление и контроль
<ul style="list-style-type: none"><li>■ от токов перегрузки;</li><li>■ от токов КЗ;</li><li>■ от пробоя изоляции</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ разъединение контактов, ясно указываемое разрешенным к применению надежным механическим индикатором;</li><li>■ видимый разрыв или установленный изолирующий экран между разомкнутыми контактами</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ функциональная коммутация;</li><li>■ аварийное отключение;</li><li>■ аварийный останов;</li><li>■ отключение для технического обслуживания механических узлов</li></ul>

Рис. Н1. Основные функции низковольтной коммутационной аппаратуры

Электрическая защита обеспечивает:

- защиту элементов цепей от термических и механических напряжений, возникающих под действием токов короткого замыкания;
- защиту людей в случае повреждения изоляции;
- защиту питаемых электроприборов и оборудования (например, электродвигателей и др.).

## 1.1 Электрическая защита

Цель состоит в том, чтобы предотвратить или ограничить разрушительные или опасные последствия протекания чрезмерно больших токов короткого замыкания или токов, обусловленных перегрузкой или повреждением изоляции, а также отделить поврежденную цепь от остальной части электроустановки.

Различаются защиты:

- защита элементов электроустановки (кабелей, проводов, распределительной аппаратуры и др.);
- защита людей и животных;
- защита оборудования и бытовых электроприборов, питаемых от рассматриваемой электроустановки;
- защита цепей:
  - от перегрузки, т.е. от чрезмерного тока, поступающего от неповрежденной (исправной) электроустановки;
  - от токов короткого замыкания, вызванных полным пробоем изоляции между проводниками разных фаз или (в системах заземления TN) между фазным и нулевым (или PE-) проводником. В этих случаях защита обеспечивается или плавкими предохранителями, или автоматическими выключателями, установленными на распределительном щитке, от которого отходит оконечная цепь, т.е. цепь, к которой подсоединена соответствующая нагрузка.
- защита людей:
  - от пробоев изоляции. В зависимости от используемой системы заземления электроустановки (TN, TT или IT) защита будет обеспечиваться плавкими предохранителями или автоматическими выключателями, УЗО и/или посредством постоянного контроля сопротивления изоляции электроустановки относительно земли.
- защита электродвигателей:
  - от перегрева, вызванного, например, длительной перегрузкой, торможением ротора, работой двигателя с обрывом одной фазы и др. Для согласования специальных характеристик электродвигателей используются специальные термореле.

При необходимости такие реле защищают также от перегрузки кабель питания цепи двигателя. Защита от короткого замыкания обеспечивается плавкими предохранителями типа aM или автоматическим выключателем без тепловой защиты.

# 1 Основные функции низковольтной распределительной аппаратуры

Считается, что состояние изолирования (разъединения), ясно указываемое разрешенным к применению надежным механическим индикатором, или видимый разрыв контактов, соответствуют требованиям национальных стандартов многих стран.

## 1.2 Изолирование (отключение)

Цель изолирования (разъединения) состоит в том, чтобы изолировать цепь, аппаратуру или единицу оборудования (например, электродвигатель и др.) от остальной части системы, находящейся под напряжением, для обеспечения безопасного проведения техническим персоналом необходимых работ на этой изолированной части.

В принципе, все цепи низковольтной электроустановки должны иметь средства для изолирования. Для обеспечения бесперебойности энергоснабжения целесообразно устанавливать средство изолирования на вводе каждой цепи.

Разъединительное (отключающее) устройство должно отвечать следующим требованиям:

- Контакты всех полюсов цепи, включая нейтральный (за исключением случая, когда нулевой проводник является PEN-проводником) должны быть разомкнутыми<sup>(1)</sup>.
- Устройство должно быть снабжено блокировкой, запираемой ключом в отключенном положении (например, висячим замком) с тем, чтобы не допустить непреднамеренного повторного включения.
- Оно должно соответствовать признанным национальным или международным стандартам, например МЭК 60947-3, в отношении величины промежутка между контактами, длины пути тока утечки через изолятор, способности выдерживать перенапряжения, а также:
  - Возможности проверки разомкнутого состояния контактов этого разъединительного устройства. Такая проверка может проводиться:
    - или визуально, если устройство спроектировано таким образом, что его контакты можно визуально наблюдать (в некоторых национальных стандартах такое требование предъявляется к разъединительному устройству, расположенному на вводе низковольтной электроустановки, питаемой непосредственно от понижающего трансформатора)
    - или с помощью механического индикатора, жестко приваренного к рабочему валу этого устройства. В этом случае конструкция устройства должна быть такова, чтобы в случае «приваривания» контактов индикатор не мог указывать на то, что устройство находится в разомкнутом положении.
  - Токов утечки. При разомкнутом положении разъединительного устройства токи утечки между разомкнутыми контактами каждой фазы не должны превышать:
    - 0,5 мА для нового устройства;
    - 6,0 мА в конце срока его нормальной эксплуатации.
  - Способности выдерживать перенапряжения на разомкнутых контактах. При разомкнутых контактах разъединительное устройство должно выдерживать импульс напряжения длительностью 1,2/50 мкс и пиковым значением 6, 8 или 12 кВ, в зависимости от его рабочего напряжения (рис. Н2). Данное устройство должно удовлетворять этим условиям при высотах до 2000 м. В стандарте МЭК 60664-1 приведены поправочные коэффициенты для высот выше 2000 м.

Поэтому, если испытания проводятся на уровне моря, то для учета влияния высоты результаты испытаний должны быть увеличены на 23% (см. стандарт МЭК 60947).

Рабочее (номинальное) напряжение (В)	Категория выдерживаемого пикового значения импульса напряжения для высоты 2000 м (кВ)	
	III	IV
230/400	4	6
400/690	6	8
690/1000	8	12

**Рис. Н2:** Пиковое значение импульсного напряжения в зависимости от номинального рабочего напряжения испытываемого образца. Категории III и IV отражают степени «загрязненности» сети питания, определение которых дано в стандарте МЭК 60664-1.

(1) Для большей безопасности и удобства эксплуатации настоятельно рекомендуется одновременное размыкание всех токоведущих проводников, хотя это не всегда является обязательным. Контакт нейтрали размыкается после фазных контактов, а замыкается перед ними (стандарт МЭК 60947-1).

Функции управления распределительной аппаратуры позволяют обслуживающему персоналу видоизменять нагруженную систему в любой момент времени в зависимости от требований и включают в себя:

- функциональное управление (оперативную коммутацию и др.);
- аварийное отключение;
- работы по техническому обслуживанию системы электроснабжения.

## 1.3 Управление

В широком смысле «управление» означает любое устройство для безопасного видоизменения нагруженной системы электроснабжения на всех уровнях электроустановки. Работа распределительной аппаратуры является важной частью управления системой электроснабжения.

### Функциональное управление

Этот вид управления относится ко всем операциям коммутации цепей в нормальных условиях эксплуатации, осуществляемым для подачи питания или обесточивания части системы или электроустановки или отдельной единицы оборудования, агрегата и др.

Распределительная аппаратура для выполнения такой функции должна быть установлена, по крайней мере:

- на вводе любой электроустановки;
- на оконечной цепи или оконечных цепях нагрузки (один выключатель может управлять несколькими нагрузками).

Маркировка (управляемых цепей) должна быть четкой и понятной.

Для обеспечения максимальной эксплуатационной гибкости и бесперебойности электроснабжения, особенно там, где коммутационный аппарат осуществляет также защиту (например, автоматический выключатель или рубильник-предохранитель), предпочтительно устанавливать выключатель на каждом уровне распределения, т.е. на каждой отходящей линии всех главных и вторичных распределительных щитов.

Эта операция может осуществляться:

- или вручную (посредством рукоятки управления на выключателе);
- или электрически (с помощью кнопки, установленной на выключателе или дистанционно).

Такие выключатели срабатывают мгновенно (т.е. без преднамеренной выдержки времени), а те, которые обеспечивают защиту, являются всегда многополюсными<sup>(1)</sup>.

Главный автоматический выключатель всей электроустановки, а также любые автоматические выключатели, используемые для переключения с одного источника питания на другой, должны быть многополюсными аппаратами.

### Аварийное отключение - аварийный останов

Аварийное отключение предназначено для обесточивания цепи, находящейся под напряжением, которая является или может стать опасной (поражение электрическим током или пожар).

Аварийный останов предназначен для того, чтобы прекратить движение, которое стало опасным.

В этих двух случаях:

- устройство аварийного управления или средства его приведения в действие (местные или дистанционные), например, большая красная кнопка аварийного останова с грибовидной головкой, должны быть узнаваемы, легко доступны и должны находиться вблизи любого места, где может возникнуть опасность, или откуда ее можно заметить;
- однократное действие должно привести к полному обесточиванию всех токоведущих проводников<sup>(2)(3)</sup>;
- разрешается применение устройства инициирования аварийного отключения с разбиваемым стеклом, однако, в случае электроустановок, работающих без обслуживающего персонала, возобновление подачи питания может быть осуществлено только с помощью ключа, хранящегося у уполномоченного лица.

Следует отметить, что в некоторых случаях может потребоваться подвод вспомогательного питания к цепям аварийной системы торможения вплоть до момента полного останова механического оборудования.

### Отключение питания для технического обслуживания механического оборудования

Эта операция обеспечивает останов машины и невозможность ее непреднамеренного включения во время проведения технического обслуживания приводных механизмов. Отключение обычно выполняется с помощью функционального коммутационного аппарата с использованием соответствующей блокировки и предупредительной надписи, размещенной на этом аппарате.

(1) По одному отключению в каждой фазе и нейтрали (если используется соответствующая система)

(2) Учитывая остановленные электродвигатели.

(3) При использовании схемы TN PEN-проводник не должен отключаться, поскольку он выполняет одновременно функции защитного провода и нулевого проводника системы.

## 2 Коммутационные аппараты

### 2.1 Простые коммутационные устройства

#### Разъединитель (рис. Н5)

Представляет собой ручной, на два положения («включено» - «отключено»), коммутационный аппарат с возможностью блокировки, обеспечивающий при фиксации в разомкнутом положении безопасное изолирование цепи. Его характеристики определены в стандарте МЭК 60947-3. Разъединитель не предназначен для того, чтобы включать или отключать токи<sup>(1)</sup>, и в стандартах не регламентируются номинальные значения для этих функций. Но он должен выдерживать прохождение токов короткого замыкания, и для него устанавливается номинальный кратковременный выдерживаемый ток (обычно длительностью 1 с, если иное время не согласовано между пользователем и изготовителем). Эта величина обычно значительно превышает максимальные рабочие токи меньшей величины, действующие в течение более длительных периодов, например пусковые токи электродвигателей. Также должны выполняться стандартные требования по механической износостойкости, перенапряжениям и токам утечки.

#### Выключатель нагрузки (рис. Н6)

Этот выключатель обычно управляется вручную (но иногда для удобства оператора снабжается электрическим приводом отключения) и является неавтоматическим двухпозиционным коммутационным аппаратом (вкл./откл.).

Он используется для включения и отключения нагруженных цепей в нормальных условиях.

Поэтому он не обеспечивает никакой защиты для управляемой им цепи.

Стандарт МЭК 60947-3 устанавливает:

- частоту коммутаций (не более 600 циклов включения/отключения в час);
- механическую и коммутационную износостойкость (обычно меньшую, чем у контактора);
- номинальные токи включения и отключения для нормальных и нечастых коммутаций.

При включении выключателя с целью подачи напряжения всегда существует вероятность того, что в цепи произошло непредвиденное короткое замыкание. По этой причине для выключателей нагрузки задается максимальный ток включения на короткое замыкание, т.е. обеспечивается успешное замыкание цепи при наличии электродинамических сил, связанных током короткого замыкания. Отключение короткого замыкания обеспечивается вышерасположенными защитными устройствами.

Периодическая коммутация отдельных электродвигателей относится к категории АС 23. Включение/отключение конденсаторов или ламп накаливания должно быть предметом соглашения между изготовителем и пользователем.

Категории использования, указанные на рис. Н7, не относятся к оборудованию, которое обычно используется для пуска, разгона и/или останова отдельных двигателей.

#### Пример

Выключатель нагрузки на 100 А, соответствующий к категории АС 23 (индуктивная нагрузка), должен быть способен:

- включать ток 10 In (= 1000 А) при коэффициенте мощности 0,35;
- отключать ток 8 In (= 800 А) при коэффициенте мощности 0,45;
- выдерживать при включении кратковременные токи короткого замыкания.



Рис. Н5: Обозначение разъединителя

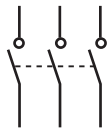


Рис. Н6: Обозначение выключателя нагрузки

Категории использования		Типичные применения	Cos φ	Ток включения x In	Ток отключения x In
Частые коммутации	Нечастые коммутации				
АС 20А	АС 20В	Коммутация цепей без нагрузки	-	-	-
АС 21А	АС 21В	Коммутация активных нагрузок, включая умеренные перегрузки	0.95	1.5	1.5
АС 22А	АС 22В	Коммутация смешанных активных и индуктивных нагрузок, включая умеренные перегрузки	0.65	3	3
АС 23А	АС 23В	Коммутация электродвигателей или других высокоиндуктивных нагрузок	0.45 для I ≤ 100 А 0.35 для I > 100 А	10	8

Рис. Н7: Категории использования низковольтных коммутационных аппаратов переменного тока согласно стандарту МЭК 60947-3

(1) Низковольтный разъединитель фактически является коммутационным аппаратом обесточенной системы, который должен применяться при отсутствии напряжения как на входе, так и на выходе, в частности, при включении, поскольку существует возможность неожиданного короткого замыкания в нижерасположенной части цепи. Часто используется блокировка с помощью вышерасположенного выключателя или автоматического выключателя.



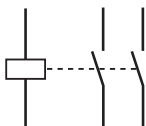


Рис. Н8: Обозначение выключателя с дистанционным управлением

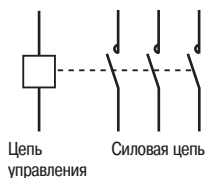


Рис. Н9: Обозначение контактора

Широко применяются два типа низковольтных плавких предохранителей:

- тип gG: для бытовых и аналоговых электроустановок;
- тип gG, gM или aM: для промышленных электроустановок.

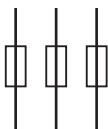


Рис. Н10: Графическое обозначение плавких предохранителей

## Выключатель с дистанционным управлением (рис. Н8)

Этот аппарат широко используется для управления осветительными цепями, когда при нажатии кнопки дистанционного управления отключается уже включенный или включается отключенный выключатель.

Типичные применения:

- коммутация на лестничных клетках больших зданий;
- схемы сценического освещения;
- освещение фабрик и др.

Существуют вспомогательные устройства для реализации функций:

- дистанционной индикации его положения в любой момент времени;
- выдержки времени.

## Контактор (рис. Н9)

Контактор представляет собой коммутационный аппарат с электромагнитным управлением, который обычно удерживается в замкнутом положении током (уменьшенной величины), проходящим через включающий соленоид (хотя для специальных применений существуют различные типы с механической блокировкой). Контакторы предназначены для выполнения многократных циклов включения/отключения и обычно управляются дистанционно с помощью двухпозиционных нажимных кнопок. Большое количество повторных циклов срабатывания стандартизировано в таблице VIII стандарта МЭК 60947-4-1 по:

- продолжительности работы: 8 часов; непрерывно; периодически; кратковременно в течение 3, 10, 30, 60 и 90 минут;
- категории использования: например, контактор категории AC3 можно использовать для пуска и останова асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;
- циклам пуска-останова ( $1 \div 1200$  циклов в час);
- механической износостойкости (количеству коммутаций без нагрузки);
- коммутационной износостойкости (количеству коммутаций под нагрузкой);
- номинальному току включения и отключения в зависимости от категории использования.

**Пример:**

Контактор на ток 150 А категории AC3 должен иметь минимальный ток отключения  $8 I_n$  (1200 А) и минимальный ток включения  $10 I_n$  (1500 А) при коэффициенте мощности 0,35 при индуктивной нагрузке.

## Контактор с тепловым реле <sup>(1)</sup>

Контакторы, оснащенные тепловым реле для защиты от перегрузки, широко используются для дистанционного кнопочного управления осветительными цепями и, как отмечено в п. 2.2 «Комбинированные коммутационные аппараты», могут также рассматриваться как важный элемент в управлении двигателем. Такой коммутационный аппарат не эквивалентен автоматическому выключателю, поскольку его отключающая способность при коротком замыкании ограничена величиной 8 или  $10 I_n$ . Поэтому для защиты от короткого замыкания необходимо последовательно с данным контактором (выше по цепи) устанавливать или плавкие предохранители, или автоматический выключатель.

## Плавкие предохранители (рис. Н10)

Первая буква указывает на диапазон отключающих токов:

- плавкие вставки "g" (отключающая способность во всем диапазоне);
- плавкие вставки "a" (отключающая способность в части диапазона).

Вторая буква указывает на категорию использования; она с точностью определяет времятоковые характеристики.

Например:

- "gG" обозначает плавкие вставки общего применения с отключающей способностью во всем диапазоне;
- "gM" обозначает плавкие вставки с отключающей способностью во всем диапазоне, предназначенные для защиты цепей электродвигателей;
- "aM" обозначает плавкие вставки с отключающей способностью в части диапазона, предназначенные для защиты цепей электродвигателей.

Существуют предохранители с механическими индикаторами «перегорания» и без них. Плавкие предохранители отключают цепь в результате управляемого расплавления плавкого элемента, когда в течение соответствующего периода времени ток превышает установленную величину; соотношение тока и времени представляется в форме рабочей характеристики каждого типа предохранителя. В стандартах определены два класса предохранителей:

- предохранители для применения в бытовых электроустановках, изготавливаемые в форме патрона, рассчитанные на токи до 100 А и обозначаемые в стандартах МЭК 60269-1 и 3 типом gG;
- предохранители для промышленного применения, обозначаемые в стандартах МЭК 60269-1 и 2 как gG (общего применения) и gM и aM (для цепей электродвигателей).

(1) В стандартах МЭК не дано определение данного термина, но он широко используется в нескольких странах.

Бытовые и промышленные предохранители различаются в основном уровнями номинальных напряжений и токов (предохранители на большие напряжения и токи имеют гораздо большие размеры) и отключающей способностью при коротком замыкании. Плавкие вставки типа gG часто применяются для защиты цепей электродвигателей, что возможно, если их характеристики позволяют без повреждений выдерживать пусковой ток.

В последнее время МЭК стандартизовал новый тип предохранителей gM для защиты цепей двигателей, способных функционировать при пусковых токах и токах короткого замыкания. В одних странах этот тип предохранителей распространен больше, чем в других, но в настоящее время расширяется применение предохранителя типа aM в сочетании с тепловым реле. Для плавкой вставки типа gM предусмотрены две номинальные величины тока. Первая величина  $I_n$  соответствует номинальному току плавкой вставки и номинальный ток патрона предохранителя; вторая величина  $I_{ch}$  обозначает времятоковую характеристику данной плавкой вставки, определяемую по таблицам II, III и VI, приведенным в стандарте МЭК 60269-1.

Эти две номинальные величины разделяются буквой, указывающей категорию использования.

Например,  $I_n$  M  $I_{ch}$  обозначает предохранитель, предназначенный для защиты цепей электродвигателей и имеющий характеристику G. Первая величина  $I_n$  соответствует максимальному непрерывному току для всего предохранителя, а вторая,  $I_{ch}$  – характеристике G его плавкой вставки. Дополнительная информация содержится в примечании, помещенном в конце п. 2.1.

Плавкая вставка aM характеризуется одной величиной тока  $I_n$  и времятоковой характеристикой, показанной далее на **рис. Н14**.

**Важное замечание:** В некоторых национальных стандартах используется тип предохранителя gI (промышленный), аналогичный по всем основным параметрам предохранителям типа gG. Вместе с тем предохранители типа gI не должны использоваться в бытовых и аналогичных электроустановках.

### Зоны плавления - условные токи

Условия плавления предохранителей определены стандартами в зависимости от их класса.

#### Предохранители класса gG

Эти предохранители обеспечивают защиту от перегрузок и коротких замыканий.

Стандартизованы условные токи неплавления и плавления (**рис. Н12** и **рис. Н13**).

■ Условный ток неплавления  $I_{nf}$  – это величина тока, который данный плавкий элемент может выдержать установленное время без плавления.

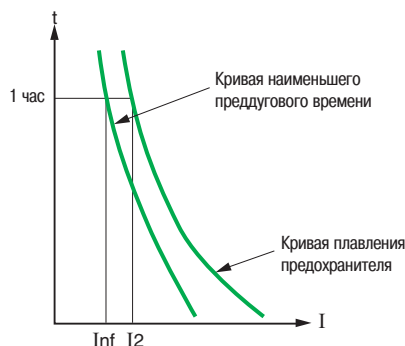
**Пример:** предохранитель на 32 А, проводящий ток 1,25  $I_n$  (т.е. 40 А), не должен расплавиться менее чем за час (таблица G13).

■ Условный ток плавления  $I_f$  (=  $I_2$  in на рис. Н12) – это величина тока, который вызовет плавление плавкого элемента до истечения установленного времени.

**Пример:** предохранитель на 32 А, проводящий ток 1,6  $I_n$  (т.е. 52,1 А), должен расплавиться за 1 час или менее.

В стандарте МЭК 60269-1 описаны испытания, требующие того, чтобы рабочая кривая конкретного испытываемого предохранителя лежала между двумя предельными кривыми, показанными на рис. Н12. Это означает, что при низких уровнях перегрузки по току два предохранителя, удовлетворяющие данному испытанию, могут иметь существенно отличающиеся значения времени срабатывания.

При использовании предохранителей типа gM требуется применение отдельного теплового реле, описанного в примечании, к п. 2.1.



**Рис. Н12:** Зоны плавления и неплавления предохранителей типов gG и gM (в соответствии со стандартом МЭК 60269-2-1)

Номинальный ток <sup>(1)</sup> $I_n$ (А)	Условный ток неплавления, $I_{nf}$	Условный ток плавления, $I_2$	Условное время (ч)
$I_n \leq 4$ А	1.5 $I_n$	2.1 $I_n$	1
$4 < I_n \leq 16$ А	1.5 $I_n$	1.9 $I_n$	1
$16 < I_n \leq 63$ А	1.25 $I_n$	1.6 $I_n$	1
$63 < I_n \leq 160$ А	1.25 $I_n$	1.6 $I_n$	2
$160 < I_n \leq 400$ А	1.25 $I_n$	1.6 $I_n$	3
$400 < I_n$	1.25 $I_n$	1.6 $I_n$	4

**Рис. Н13:** Зоны плавления и неплавления для низковольтных плавких предохранителей типов gG и gM (в соответствии со стандартами МЭК 60269-1 и 60269-2-1)

■ Приведенные выше два примера для предохранителя на ток 32 А в сочетании с предшествующими примечаниями в отношении требований испытаний объясняют, почему эти предохранители неэффективны при низких уровнях перегрузки.

■ Поэтому, чтобы избежать последствий возможной длительной перегрузки (худший случай: перегрузка 60% в пределах часа), необходимо использовать кабель, рассчитанный на более высокую допустимую токовую нагрузку в амперах, чем тот, который обычно требуется.

(1)  $I_{ch}$  для предохранителей класса gM

Предохранители типа aM обеспечивают защиту только от коротких замыканий и должны применяться в комбинации с устройством защиты от перегрузок.

Для сравнения, автоматический выключатель с аналогичным номинальным током:

- не должен отключать цепи в течение промежутка времени менее часа при прохождении тока  $1,05 I_n$ ;
- при прохождении тока  $1,25 I_n$  должен отключать цепь в течение часа или менее (худший случай: перегрузка 25% в пределах часа).

#### Предохранители типа aM (для электродвигателей)

Эти предохранители обеспечивают защиту только от токов короткого замыкания и должны обязательно применяться в сочетании с другими коммутационными аппаратами (например, контакторами, оснащенными тепловым реле, или автоматическими выключателями) с тем, чтобы обеспечить защиту от перегрузки при токах  $< 4 I_n$ . Поэтому они не могут применяться автономно. Поскольку предохранители типа aM не предназначены для защиты от малых токов перегрузки, для них не устанавливаются уровни условных токов плавления и неплавления. Рабочие кривые для испытаний этих предохранителей приводятся для токов короткого замыкания, превышающих приблизительно  $4 I_n$  (рис. Н14), и рабочие кривые предохранителей, тестируемых по стандарту МЭК 60269, должны располагаться в заштрихованной области.

**Примечание:** маленькие стрелки на диаграмме указывают граничные времятоковые величины для различных тестируемых предохранителей (стандарт МЭК 60269).

#### Номинальная отключающая способность при коротком замыкании

Особенностью современных патронных плавких предохранителей является то, что благодаря скорости плавления вставки при больших уровнях токов короткого замыкания<sup>(1)</sup> отключение тока начинается до появления первого большого пика тока, поэтому ток замыкания никогда не достигает своего ожидаемого максимального значения (рис. Н15).

Такое ограничение тока значительно снижает термические и динамические напряжения, которые иначе бы возникли, и, тем самым, сводит к минимуму опасность и степень ущерба в том месте, где произошло короткое замыкание. Поэтому номинальная отключающая способность предохранителя определяется действующим значением переменной составляющей ожидаемого тока короткого замыкания.

Для плавких предохранителей не устанавливается номинальный ток включения на короткое замыкание.

#### Напоминание

В начальный момент токи короткого замыкания содержат постоянные составляющие, амплитуда и длительность которых зависят от соотношения  $X_L/R$  поврежденного участка цепи.

Вблизи источника питания (понижающего трансформатора) соотношение  $I_{peak}/I_{rms}$  (где  $I_{rms}$  - действующее значение периодической составляющей тока непосредственно сразу после момента короткого замыкания) может достигать 2,5 (это регламентировано стандартами МЭК и показано на рис. Н16).

Как отмечалось выше, на нижних уровнях распределения питания в электроустановке величина  $X_L$  мала по сравнению с  $R$  и поэтому для оконечных цепей  $I_{peak} / I_{rms} \sim 1,41$  (это условие отражено на рис. Н15).

Эффект ограничения пикового тока происходит только тогда, когда ожидаемое действующее значение переменной составляющей тока короткого замыкания достигает определенного уровня. Например, на приведенном выше графике предохранитель 100 А начнет отключать пиковый ток при ожидаемом действующем значении тока замыкания 2 кА (а). Тот же предохранитель при ожидаемом действующем значении тока замыкания 20 кА ограничит пиковый ток до 10 кА (b). В последнем случае при отсутствии токоограничивающего предохранителя пиковый ток мог бы достичь 50 кА (c). Как уже упоминалось, на нижних уровнях распределения,  $R$  значительно превосходит  $X_L$ , и уровни токов замыкания обычно небольшие. Это означает, что уровень тока короткого замыкания может не достичь достаточно высоких значений для того, чтобы вызвать ограничение пикового тока. С другой стороны, как уже отмечалось, в данном случае аperiodические составляющие тока в переходном процессе имеют незначительное влияние на величину пика тока.

**Примечание:** о номинальных токах срабатывания предохранителей типа gM

Предохранитель типа gM представляет собой фактически предохранитель типа gG, плавкий элемент которого рассчитан на ток  $I_{ch}$ , который может, например, составлять 63 А.

Это — испытательное значение, принятое в стандартах МЭК, поэтому его времятоковая характеристика аналогична такой же характеристике предохранителя типа gG на 63 А.

Это значение (63 А) выбрано для того, чтобы выдержать большие пусковые токи электродвигателя, рабочий ток которого в нормальном режиме ( $I_n$ ) может находиться в диапазоне 10-20 А.

Это означает, что можно использовать меньшие по размерам патрон и металлические части предохранителя, поскольку отвод тепла, который требуется при нормальных условиях эксплуатации, относится к сниженным значениям тока (10-20 А). Стандартный предохранитель типа gM, пригодный для такого случая, обозначался бы как 32M63 (т.е.  $I_n$   $I_{ch}$ ).

Первый номинальный ток ( $I_n$ ) характеризует тепловые характеристики плавкой вставки при установившейся нагрузке, а второй номинальный ток ( $I_{ch}$ ) относится к ее функционированию при кратковременном пусковом токе. Вполне очевидно, что хотя предохранитель пригоден для защиты электродвигателя от коротких замыканий, он не обеспечивает его защиты от перегрузок и поэтому при применении предохранителей типа gM всегда необходимо устанавливать отдельное тепловое реле. Таким образом, единственное преимущество предохранителей gM перед предохранителями типа aM заключается в том, что они меньше по размерам и немного дешевле.

Н8

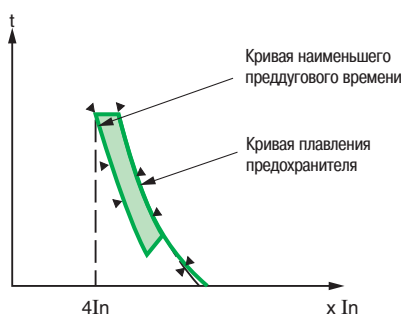


Рис. Н14: Стандартные зоны плавления предохранителей класса aM (все номинальные токи)

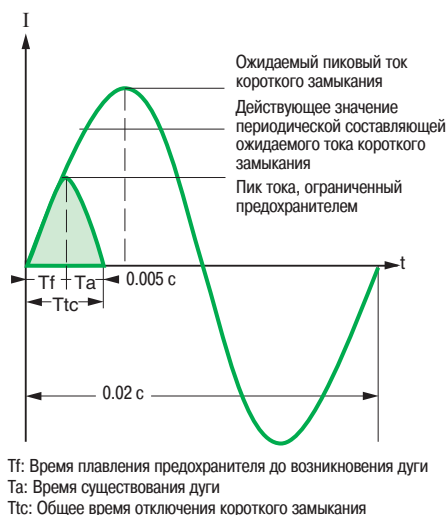


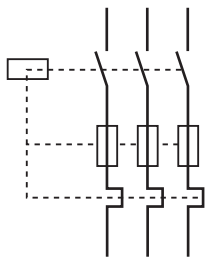
Рис. Н15: Ограничение тока плавким предохранителем

(1) Для токов, превышающих определенный уровень, в зависимости от номинального тока предохранителя, как показано ниже на рис. Н16.

## 2.2 Комбинированные коммутационные аппараты



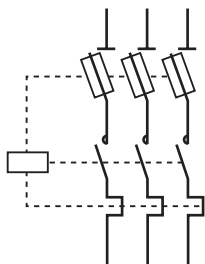
**Рис. Н16:** Зависимость ограниченного пикового тока от ожидаемых действующих значений переменной составляющей тока короткого замыкания для низковольтных плавких предохранителей



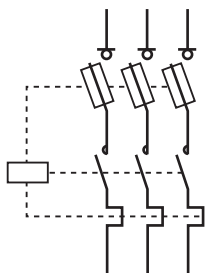
**Рис. Н17:** Обозначение автоматического выключателя-предохранителя.



**Рис. Н18:** Обозначение неавтоматического выключателя-предохранителя



**Рис. Н20:** Обозначение комбинации предохранитель-разъединитель + контактор с тепловым реле



**Рис. Н21:** Обозначение комбинации предохранитель-выключатель-разъединитель + контактор с тепловым реле

Отдельные элементы коммутационной аппаратуры могут не удовлетворять всем требованиям трех основных функций, а именно защиты, управления и разъединения (изолирования).

В тех случаях, когда установка автоматического выключателя нецелесообразна (например, там, где высокая частота коммутаций в течение продолжительных периодов), используются комбинации элементов, специально предназначенных для таких функций. Ниже описаны наиболее распространенные комбинации коммутационных аппаратов.

### Комбинации выключателей и плавких предохранителей

Рассматриваются два случая:

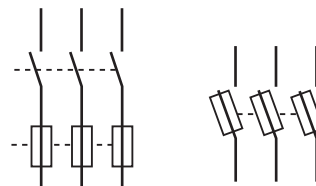
- Тип, в котором срабатывание одного или нескольких предохранителей вызывает отключение выключателя. Это достигается путем использования предохранителей, снабженных бойками, и системы отключающих пружин и шарнирных механизмов (**рис. Н17**).
- Тип, в котором неавтоматический выключатель соединен с комплектом предохранителей в едином корпусе.

В некоторых странах и в стандарте 60947-3 термины «выключатель-предохранитель» и «предохранитель-выключатель» имеют специальный смысл, а именно:

- выключатель-предохранитель состоит из выключателя (обычно с двумя разрывами на полюс), установленного перед тремя стационарными патронами предохранителей, в которые вставлены плавкие вставки (**рис. Н18**);
- предохранитель-выключатель состоит из трех ножевых контактов, каждый из которых имеет двойной разрыв на каждой фазе.

Эти ножевые контакты не являются непрерывными по длине, и каждый имеет промежуток в центре, который перекрывается патроном плавкого предохранителя. В некоторых конструкциях имеется только один разрыв на фазу (**рис. Н18 и Н19**).

Диапазон токов для этих устройств ограничен 100 А в трехфазной сети напряжением 400 В, хотя их основное применение – в бытовых и аналогичных электроустановках. Чтобы избежать путаницы между первой группой (т.е. автоматическим отключением) и второй группой, термин «выключатель-предохранитель» должен использоваться с прилагательными «автоматический» или «неавтоматический».



**Рис. Н19:** Обозначение неавтоматического предохранителя-выключателя

### Предохранитель-разъединитель + контактор с тепловым реле и предохранитель-выключатель-разъединитель + контактор с тепловым реле

Как указывалось выше, контактор с тепловым реле не обеспечивает защиты от токов короткого замыкания. Поэтому вместе с ним необходимо применять предохранители (обычно типа aM). Такая комбинация используется главным образом в цепях управления электродвигателями, разъединитель или выключатель-разъединитель обеспечивают возможность безопасного проведения операций технического обслуживания, включая:

- замену плавких вставок (при отключенной цепи);
- работы на участке цепи ниже контактора с тепловым реле (существует риск дистанционного включения этого контактора с тепловым реле).

Предохранитель-разъединитель и контактор с тепловым реле должны соединяться так, чтобы было невозможно отключение или включение предохранителя-разъединителя, если контактор с тепловым реле не отключен (**рис. Н20**), поскольку такой предохранитель-разъединитель не обеспечивает функцию коммутации нагрузки.

Очевидно, что для комбинации предохранитель-выключатель-разъединитель блокировка не требуется (**рис. Н21**). Если данная цепь питает электродвигатель, этот выключатель должен быть класса AC22 или AC23.

### Автоматический выключатель + контактор и автоматический выключатель + контактор с тепловым реле

Эти комбинации используются в системах распределения с дистанционным управлением, для которых характерна высокая частота коммутаций, или для управления и защиты цепи питания электродвигателей

3.1 Сводная таблица функциональных возможностей

На основе изучения основных функций низковольтной коммутационной аппаратуры (пункт 1, [рис. Н1](#)) и ее различных элементов (пункт 2) составлена сводная таблица функциональных возможностей различных коммутационных аппаратов, см. [рис. Н22](#).

Устройство	Изолирование	Управление				Электрическая защита		
		Функциональное	Аварийное отключение	Аварийный (механических узлов)	Откл. для тех. обслуживания механ. узлов	От перегрузки	От короткого замыкания	От тока утечки
Разъединитель <sup>(4)</sup>	■							
Выключатель <sup>(5)</sup>	■	■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■			
УЗО <sup>(5)</sup>	■	■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■			■
Выключатель – разъединитель	■	■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■			
Контактор		■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■	■ <sup>(3)</sup>		
Двухпозиционный выкл. с дистанц. управлением		■	■ <sup>(1)</sup>		■			
Предохранитель	■					■	■	
Автоматический выключатель <sup>(5)</sup>		■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■	■	■	
Автомат. выключ.-разъединитель <sup>(5)</sup>	■	■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■	■	■	
УЗО + автомат. выключатель с защитой от сверхтоков <sup>(5)</sup>	■	■	■ <sup>(1)</sup>	■ <sup>(1) (2)</sup>	■	■	■	■
Место установки (общий принцип)	Ввод каждой цепи	Все места, где по эксплуатационным причинам может потребоваться остановить процесс	Как правило, на входящей цепи каждого распределительного щита	В месте подвода питания к каждой машине и/или на соответствующей машине	В месте подвода питания к каждой машине	Ввод каждой цепи	Ввод каждой цепи	Ввод цепей в случае использования систем заземления TN-S, IT, TT

- Н10
- (1) Где обеспечивается обесточивание всех активных проводников.

(2) Может потребоваться подвод питания к системе торможения.

(3) Если он электрически соединен с тепловым реле.

(4) В некоторых странах применение разъединителя с видимым разрывом на вводе низковольтной электроустановки, питаемой непосредственно от понижающего трансформатора, является обязательным.

(5) Определенные элементы коммутационной аппаратуры пригодны для выполнения функций изолирования или разъединения (например, УЗО в соответствии со стандартом МЭК 1008), хотя на них отсутствует соответствующая маркировка.

Рис. Н22: Функции, выполняемые разными элементами коммутационной аппаратуры

3.2 Выбор коммутационной аппаратуры

Для оптимального выбора коммутационной аппаратуры все больше и больше применяется программное обеспечение. Рассматривается по очереди каждая цепь, и составляется перечень требуемых функций защиты и эксплуатационных требований электроустановки, из тех, которые приведены на рис. Н22 и рис. Н1.

Анализируются несколько комбинаций коммутационных аппаратов, которые сравниваются друг с другом по соответствующим критериям с целью достижения:

- удовлетворительной работы;
- совместимости отдельных элементов между собой (от номинального тока In до предельной отключающей способности Icu);
- совместимости с вышерасположенным коммутационным аппаратом или учета его «влияния»;
- соответствия всем нормам и требованиям, касающимся безопасной и надежной работы цепей.

Необходимо определиться с количеством полюсов коммутационного аппарата (см. главу G, рис. G64).

Применение многофункционального коммутационного устройства, несмотря на его изначально более высокую стоимость, снижает затраты на монтажные работы и облегчает монтаж и эксплуатацию. Часто оказывается, что применение такого устройства является наилучшим решением.



## 4 Автоматический выключатель

Автоматический выключатель/разъединитель выполняет все основные функции распределительного устройства, а при использовании вспомогательных элементов может обеспечивать многочисленные дополнительные функции.

Как показано на **рис. Н23**, автоматический выключатель/разъединитель является единственным коммутационным аппаратом, способным одновременно выполнять все основные функции, необходимые в электроустановке.

Кроме того, за счет применения вспомогательных элементов, он может обеспечить широкий диапазон дополнительных функций таких как: индикация (включение-отключение-отключение при коротком замыкании); отключение по минимальному напряжению; дистанционное управление и др. Это делает автоматический выключатель/разъединитель основным элементом распределительного устройства для любой электроустановки.

Функции		Возможные условия
Изолирование (разъединение)		■
Управление	Оперативное	■
	Аварийное отключение	■ (С возможностью использования катушки отключения для телеуправления)
	Отключение для тех. обслуживания механического оборудования	■
Защита	Перегрузка	■
	Короткое замыкание	■
	Замыкание на землю	■ (С применением УЗО)
	Минимальное напряжение	■ (С использованием катушки минимального напряжения)
Дистанционное управление		■ Добавленное или встроенное
Индикация и измерение		■ (Обычно является дополнительной опцией с электронным расцепителем)

**Рис. Н23:** Функции, выполняемые автоматическим выключателем/разъединителем

Промышленные автоматические выключатели должны соответствовать стандартам МЭК 60947-1 и 60947-2 или другим эквивалентным стандартам. Бытовые автоматические выключатели должны соответствовать стандарту МЭК 60898 или другому эквивалентному стандарту.

### 4.1 Стандарты и описание

#### Стандарты

В промышленных низковольтных электроустановках должны применяться следующие существующие или разрабатываемые международные стандарты:

- 60947-1, общие правила;
- 60947-2, часть 2: автоматические выключатели;
- 60947-3, часть 3: выключатели, разъединители, выключатели-разъединители и их комбинации с плавкими предохранителями;
- 60947-4, часть 4: контакторы и пускатели электродвигателей;
- 60947-5, часть 5: устройства и коммутационные аппараты для цепей управления;
- 60947-6, часть 6: многофункциональные коммутационные устройства;
- 60947-7, часть 7: вспомогательное оборудование.

Для бытовых и аналогичных низковольтных электроустановок соответствующим стандартом является МЭК 60898 или эквивалентный национальный стандарт.

#### Описание

На **рис. Н24** схематически показаны основные части низковольтного автоматического выключателя и его четыре основные функции:

- узлы, осуществляющие отключение цепей, включая неподвижные и подвижные контакты и дугогасительную камеру;
- механизм блокировки, который разблокируется расцепителем при обнаружении аномальных условий по току.

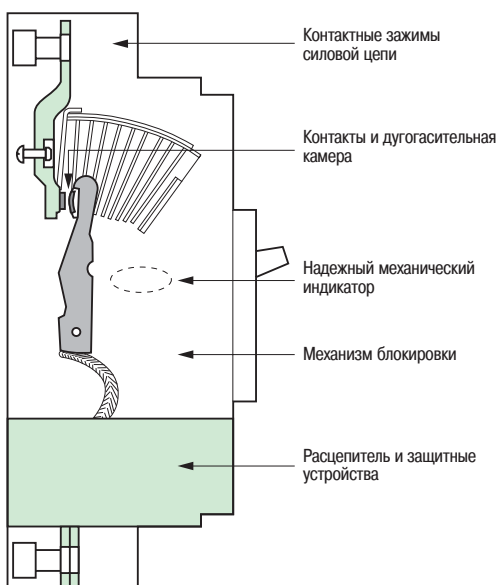
Этот механизм также соединен с ручкой управления выключателя.

- Исполнительное устройство расцепляющего механизма:

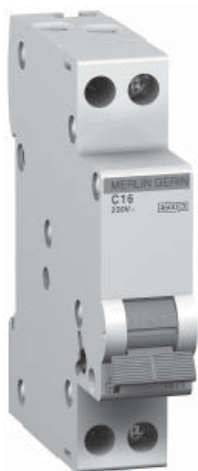
- термомангнитный (комбинированный) расцепитель, в котором биметаллическая пластина, чувствительная к изменению температуры, обнаруживает перегрузку, а электромагнитный расцепитель срабатывает при уровнях тока, характерных для условий короткого замыкания;
- электронное реле, срабатывающее от измерительных трансформаторов тока, установленных по одному на каждой фазе.
- Место, предусмотренное для размещения нескольких типов контактных зажимов, которые используются для подсоединения основных проводников силовой цепи.

Бытовые автоматические выключатели (**рис. Н25** на следующей странице), отвечающие стандарту МЭК 60898 и аналогичным национальным стандартам, выполняют функции:

- изолирования цепей;
- защиты от сверхтоков.

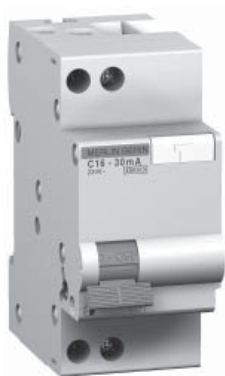


**Рис. Н24:** Основные элементы автоматического выключателя

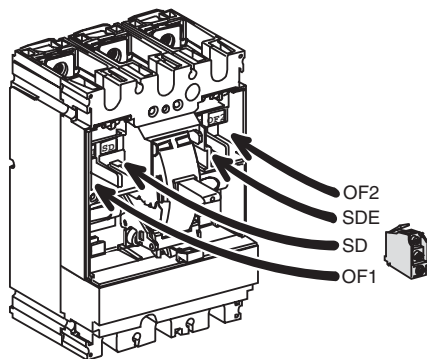


**Рис. Н25:** Бытовой автоматический выключатель, обеспечивающий функции защиты от сверхтоков и изолирование цепей

H12



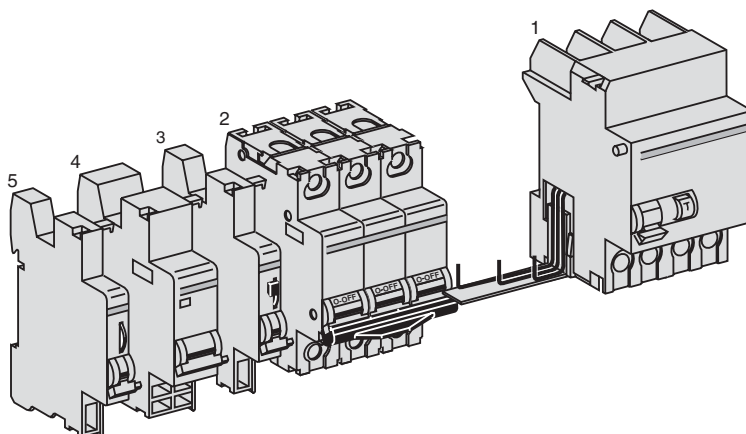
**Рис. Н26:** Бытовой автоматический выключатель, аналогичный показанному на рис. Н25, но дополнительно обеспечивающий защиту человека от поражения током



**Рис. Н28:** Пример модульной конструкции промышленного автоматического выключателя Compact NS, обладающего различными дополнительными функциями

Некоторые из моделей могут быть адаптированы для обнаружения с высокой чувствительностью (30 мА) токов утечки на землю и отключения цепи с помощью дополнительного модуля, как показано на **рис. Н26**, а в других моделях (RCBO<sub>s</sub>), отвечающих стандарту МЭК 61009 и более новому 60947-2, приложение В (модель CBR<sub>s</sub>), функция обнаружения дифференциального тока встроена в конструкцию автоматического выключателя.

Помимо вышеуказанных функций, установка дополнительных модулей (как показано на **рис. Н27**) позволяет базовому автоматическому выключателю выполнять вспомогательные функции, а именно дистанционное управление и индикацию (включение-отключение-отключение при коротком замыкании).

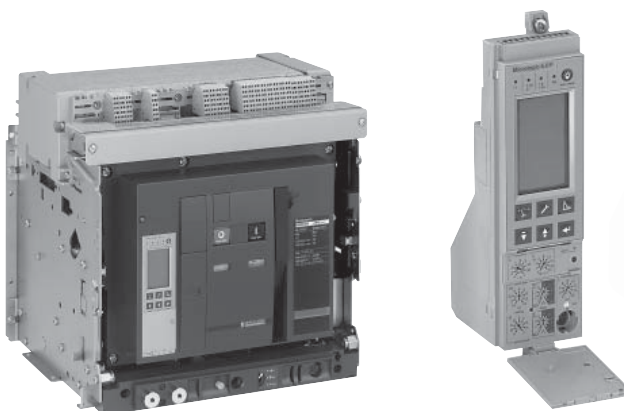


**Рис. Н27:** Система Multi 9, состоящая из низковольтных модульных коммутационных элементов

В настоящее время на рынке имеются промышленные автоматические выключатели в литом корпусе, отвечающие стандарту МЭК 60947-2, которые с помощью дополнительных встраиваемых модулей обеспечивают набор вспомогательных функций аналогичных тем, которые были описаны выше (**рис. Н28**).

Промышленные автоматические выключатели для тяжелых условий эксплуатации, рассчитанные на большие токи и удовлетворяющие стандарту МЭК 947-2, имеют много встроенных электронных функций и функций связи (**рис. Н29**).

Кроме функций защиты, модуль Micrologic обеспечивает дополнительные функции, такие как измерение (включая функции контроля качества электроэнергии), диагностика, связь, управление и мониторинг



**Рис. Н29:** Примеры промышленных автоматических выключателей для тяжелых условий эксплуатации. Выключатель Masterpact обладает множеством функций автоматизации благодаря использованию модуля расцепителя Micrologic

## 4.2 Основные характеристики автоматического выключателя

Основными характеристиками автоматического выключателя являются:

- его номинальное напряжение  $U_e$ ;
- его номинальный ток  $I_n$ ;
- его диапазоны регулировки уровней тока отключения для защиты от перегрузки  $I_r^{(1)}$  или  $I_{rth}^{(1)}$  и защиты от короткого замыкания  $I_m^{(1)}$ ;
- его отключающая способность при коротком замыкании ( $I_{cu}$  – для промышленных автоматических выключателей и  $I_{cp}$  – для бытовых автоматических выключателей).

### Номинальное рабочее напряжение ( $U_e$ )

Это то напряжение, при котором данный выключатель предназначен работать в нормальных условиях.

Для автоматического выключателя устанавливаются и другие значения напряжения, соответствующие импульсным перенапряжениям (см. подпункт 4.3).

### Номинальный ток ( $I_n$ )

Это – максимальная величина тока, который автоматический выключатель, снабженный специальным отключающим реле максимального тока, может проводить бесконечно долго при температуре окружающей среды, оговоренной изготовителем, без превышения установленных максимальных температур токоведущих частей.

#### Пример

Автоматический выключатель с номинальным током  $I_n = 125$  А при температуре окружающей среды  $40^\circ\text{C}$ , оснащенный отключающим реле максимального тока, откалиброванного соответствующим образом (настроенным на ток 125 А). Этот же автоматический выключатель может использоваться при более высоких температурах окружающей среды, но за счет занижения номинальных параметров. Например, при окружающей температуре  $50^\circ\text{C}$  этот выключатель сможет проводить бесконечно долго 117 А, а при  $60^\circ\text{C}$  – лишь 109 А при соблюдении установленных требований по допустимой температуре.

Уменьшение номинального тока автоматического выключателя производится путем уменьшения уставки его теплового реле. Использование электронного расцепителя, который может работать при высоких температурах, обеспечивают возможность эксплуатации автоматических выключателей (с пониженными уставками по току) при окружающей температуре  $60^\circ\text{C}$  или даже  $70^\circ\text{C}$ .

**Примечание:** в автоматических выключателях, соответствующих стандарту МЭК 60947-2, ток  $I_n$  равен обычно  $I_u$  для всего распределительного устройства, где  $I_u$  обозначает номинальный длительный ток.

### Номинальный ток выключателя при использовании расцепителей с разными диапазонами уставок

Автоматическому выключателю, который может быть оборудован расцепителями, имеющими различные диапазоны уставок по току, присваивается номинальное значение, соответствующее номинальному значению расцепителя с наивысшим уровнем уставки по току отключения.

#### Пример

Автоматический выключатель NS630N может быть оснащен четырьмя электронными расцепителями с номинальными токами от 150 до 630 А. В таком случае номинальный ток данного автоматического выключателя составит 630 А.

### Уставка реле перегрузки по току отключения ( $I_{rth}$ или $I_r$ )

За исключением небольших автоматических выключателей, которые легко заменяются, промышленные автоматические выключатели оснащаются сменными, т.е. заменяемыми реле отключения максимального тока. Для того чтобы приспособить автоматический выключатель к требованиям цепи, которой он управляет, и избежать необходимости устанавливать кабели большего размера, отключающие реле обычно являются регулируемыми. Уставка по току отключения  $I_r$  или  $I_{rth}$  (оба обозначения широко используются) представляет собой ток, при превышении которого данный автоматический выключатель отключит цепь. Кроме того, это максимальный ток, который может проходить через автоматический выключатель без отключения цепи. Это значение должно быть обязательно больше максимального тока нагрузки  $I_b$ , но меньше максимально допустимого тока в данной цепи  $I_z$  (см. главу G, подпункт 1.3).

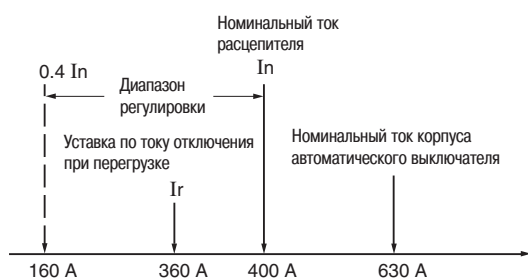
Термореле обычно регулируются в диапазоне  $(0,7-1,0)I_n$ , но в случае использования электронных устройств этот диапазон больше и обычно составляет  $(0,4-1,0)I_n$ .

#### Пример (рис. H30)

Автоматический выключатель NS630N, оснащенный расцепителем STR23SE на 400 А, который отрегулирован на  $0,9I_n$ , будет иметь уставку тока отключения:

$I_r = 400 \times 0,9 = 360$  А.

**Примечание:** для цепей, оборудованных нерегулируемыми расцепителями,  $I_r = I_n$ . Пример: для автоматического выключателя C60N на 20 А  $I_r = I_n = 20$  А.



**Рис. H30:** Пример автоматического выключателя NS630N с расцепителем STR23SE, отрегулированным на  $0,9I_n$  ( $I_r = 360$  А)

(1) Величины уставок, которые относятся к термомангнитным (комбинированным) расцепителям для защиты от перегрузки и короткого замыкания.



Уставка по току отключения при коротком замыкании (Im)

Расцепители мгновенного действия или срабатывающие с небольшой выдержкой времени предназначены для быстрого выключения автоматического выключателя в случае возникновения больших токов короткого замыкания. Порог их срабатывания Im:
■ для бытовых автоматических выключателей регламентируется стандартами, например МЭК 60898;
■ для промышленных автоматических выключателей указывается изготовителем согласно действующим стандартам, в частности МЭК 60947-2.

Для промышленных выключателей имеется большой выбор расцепителей, что позволяет пользователю адаптировать защитные функции автоматического выключателя к конкретным требованиям нагрузки (см. рис. Н31, рис. Н32 и рис. Н33 на следующей странице).

Table with 6 columns: Device type, Breaker type, Overload protection, Short-circuit protection, and settings for types B, C, D, and K.

(1) 50 In в стандарте МЭК 60898, что, по мнению большинства европейских изготовителей, является нереально большим значением (M-G = 10-14 In).
(2) Для промышленного использования значения не регламентируются стандартами МЭК. Указанные выше значения соответствуют тем, которые обычно используются.

Рис. Н31: Диапазоны токов отключения устройств защиты от перегрузки и короткого замыкания для низковольтных автоматических выключателей

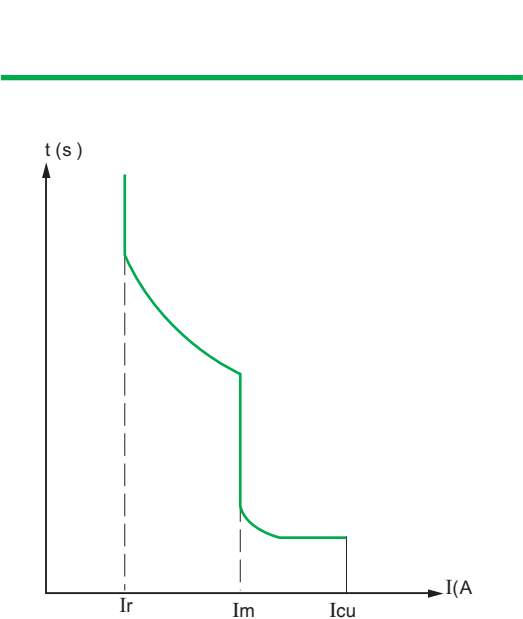


Рис. Н32: Кривая срабатывания термомангнитного комбинированного расцепителя автоматического выключателя

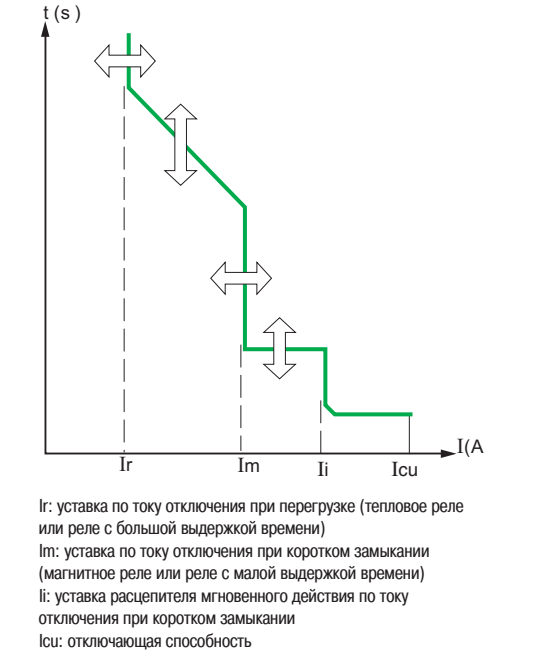



Рис. Н33: Кривая срабатывания электронного расцепителя автоматического выключателя

## Функция изолирования (разъединения)

Автоматический выключатель пригоден для электрического изолирования цепи, если он удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к разъединителю (при его номинальном напряжении) в соответствующем стандарте (см. подпункт 1.2). В таком случае его называют автоматическим выключателем-разъединителем и на его фронтальной поверхности наносят маркировку в виде символа .

К этой категории относятся все низковольтные коммутационные аппараты торговой марки Merlin Gerin (Multi 9, Compact NS и Masterpact).

## Номинальная отключающая способность при коротком замыкании (Icu или Icsn)

Отключающая способность автоматического выключателя – максимальный (ожидаемый) ток, который данный автоматический выключатель способен отключить и остаться в работоспособном состоянии. Упоминаемая в стандартах величина тока представляет собой действующее значение периодической составляющей тока замыкания, т.е. при расчете этой стандартной величины предполагается, что апериодическая составляющая тока в переходном процессе (которая всегда присутствует в наихудшем возможном случае короткого замыкания) равна нулю. Эта номинальная величина (Icu) для промышленных автоматических выключателей и (Icsn) для бытовых автоматических выключателей обычно указывается в кА.

Icu (номинальная предельная отключающая способность) и Ics (номинальная эксплуатационная отключающая способность) определены в стандарте МЭК 60947-2 вместе с таблицей соотношений Ics и Icu для различных категорий использования А (мгновенное отключение) и В (отключение с выдержкой времени), рассмотренных в подпункте 4.3.

Проверки для подтверждения номинальных отключающих способностей автоматических выключателей регламентируются стандартами и включают в себя:

- коммутационные циклы, состоящие из последовательности операций, т.е. включения и отключения при коротком замыкании;
- фазовый сдвиг между током и напряжением. Когда ток в цепи находится в фазе с напряжением питания ( $\cos \varphi = 1$ ), отключение тока осуществить легче, чем при любом другом коэффициенте мощности. Гораздо труднее осуществлять отключение тока при низких отстающих величинах  $\cos \varphi$ , при этом отключение тока в цепи с нулевым коэффициентом мощности является (теоретически) самым трудным случаем.

На практике все токи короткого замыкания в системах электроснабжения возникают обычно при отстающих коэффициентах мощности, и стандарты основаны на значениях, которые обычно считаются типичными для большинства силовых систем. В целом, чем больше ток короткого замыкания (при данном напряжении), тем ниже коэффициент мощности цепи короткого замыкания, например, рядом с генераторами или большими трансформаторами.

В таблице, приведенной на [рис. Н34](#) и взятой из стандарта МЭК 60947-2, указаны соотношения между стандартными величинами  $\cos \varphi$  для промышленных автоматических выключателей и их предельно отключающей способностью Icu.

- после проведения цикла «отключение – выдержка времени - включение/ отключение» для проверки предельной отключающей способности (Icu) автоматического выключателя выполняются дополнительные испытания, имеющие целью убедиться в том, что:

- электрическая прочность изоляции;
  - разъединяющая (изолирующая) способность;
  - правильное срабатывание защиты от перегрузки
- не ухудшились в результате проведения этого испытания.

Icu	$\cos \varphi$
$6 \text{ kA} < I_{cu} \leq 10 \text{ kA}$	0.5
$10 \text{ kA} < I_{cu} \leq 20 \text{ kA}$	0.3
$20 \text{ kA} < I_{cu} \leq 50 \text{ kA}$	0.25
$50 \text{ kA} < I_{cu}$	0.2

**Рис. Н34:** Соотношение между Icu и коэффициентом мощности ( $\cos \varphi$ ) цепи короткого замыкания (МЭК 60947-2)

## 4.3 Другие характеристики автоматического выключателя

### Номинальное напряжение изоляции (Ui)

Это величина напряжения, относительно которого выбирается напряжение при испытании электрической прочности изоляции (оно обычно превышает 2 Ui), и определяется длина пути тока утечки через изолятор.

Максимальная величина номинального рабочего напряжения не должна превышать величины номинального напряжения изоляции, т.е.  $U_e = U_i$ .

Отключающая способность низковольтного автоматического выключателя связана с коэффициентом мощности ( $\cos \varphi$ ) поврежденного участка цепи. В ряде стандартов приводятся стандартные значения такого соотношения.

Знакомство с приведенными ниже менее важными характеристиками низковольтных автоматических выключателей часто оказывается необходимым при окончательном выборе модели.

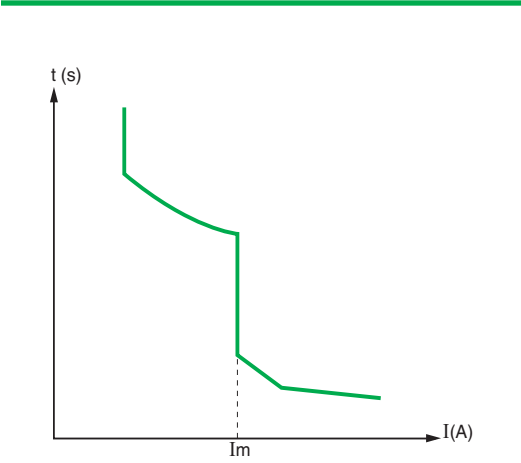


Рис. Н35: Автоматический выключатель категории А

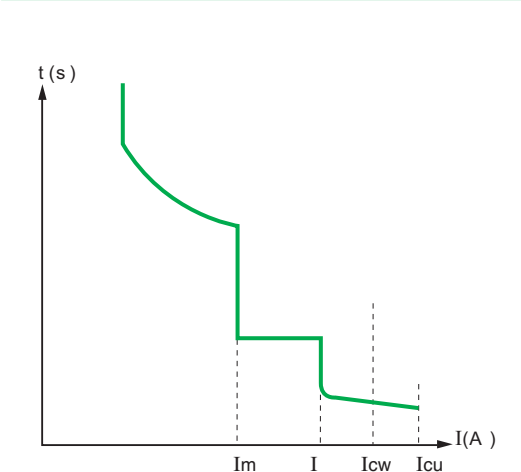


Рис. Н36: Автоматический выключатель категории В

В правильно спроектированной электроустановке автоматический выключатель не будет использоваться для отключения тока короткого замыкания, равного предельной отключающей способности Icu. По этой причине была введена новая характеристика Ics. Согласно стандарту МЭК 60947-2, она выражается в процентах от Icu (25, 50, 75, 100%).

Номинальное выдерживаемое импульсное напряжение (Uimp)

Этот параметр представляет собой величину импульса напряжения (определенной формы и полярности) в кВ, который рассматриваемое оборудование может выдержать в условиях испытаний без повреждения. Обычно для промышленных автоматических выключателей Uimp = 8 кВ, для бытовых автоматических выключателей Uimp = 6 кВ.

Категория (А или В) и номинальный выдерживаемый кратковременный ток (Icw)

Как уже упоминалось выше (подпункт 4.2), стандарт МЭК 60947-2 устанавливает две категории низковольтной промышленной коммутационной аппаратуры, А и В:
■ к категории А относятся аппараты, для которых не предусмотрена преднамеренная задержка срабатывания магнитного расцепителя мгновенного действия при коротком замыкании (рис. Н35). Это, как правило, автоматические выключатели в литом корпусе;
■ к категории В относятся аппараты, в которых с целью согласования их с другими последовательно соединенными автоматическими выключателями по времени срабатывания, предусмотрена возможность задержки отключения автоматического выключателя, в котором значение тока короткого замыкания ниже максимального выдерживаемого им кратковременного тока (Icw) (рис. Н36). Это обычно имеет место в больших воздушных автоматических выключателях и в некоторых типах автоматических выключателей в литом корпусе, предназначенных для тяжелых условий эксплуатации. Ток Icw — максимальный ток, который автоматический выключатель категории В может выдержать термически и электродинамически без получения повреждений в течение периода времени, указанного изготовителем.

Номинальная включающая способность (Icm)

Icm — величина максимального мгновенного значения тока, который данный автоматический выключатель может включить при номинальном напряжении в оговоренных условиях эксплуатации. В системах переменного тока эта мгновенное пиковое значение связано с Icu (т.е. с предельной отключающей способностью) коэффициентом k, зависящим от коэффициента мощности (cos φ) цепи короткого замыкания (рис. Н37).

Table with 3 columns: Icu, cos φ, and Icm = kIcu. It lists values for different Icu ranges and cos φ values.

Рис. Н37: Соотношение между предельной отключающей способностью Icu и номинальной включающей способностью Icm при разных величинах коэффициента мощности цепи короткого замыкания (стандарт МЭК 60947-2)

Пример: автоматический выключатель Masterpact NW08H2 имеет предельную отключающую способность Icu=100 кА. Пиковое значение его номинальной включающей способности Icm составит 100 x 2,2 = 220 кА.

Рабочая отключающая способность (Ics)

Номинальная отключающая способность (Icu) или (Icn) представляет собой максимальный ток короткого замыкания, который автоматический выключатель может успешно отключить без повреждения. Вероятность возникновения такого тока крайне мала, и в нормальных обстоятельствах токи короткого замыкания гораздо ниже предельной отключающей способности (Icu) автоматического выключателя. С другой стороны, важно, чтобы большие токи (имеющие низкую вероятность) отключались бы так, чтобы этот автоматический выключатель был бы сразу готов для повторного включения тока после восстановления поврежденной цепи. Именно по этим причинам была введена новая характеристика (Ics), выраженная в процентах от Icu: 25, 50, 75 и 100% для промышленных автоматических выключателей. Стандартная последовательность проверок является следующей:
■ О - СО - СО¹ (при токе Ics);
■ проверки, проводимые после этой последовательности, предназначены для того, чтобы убедиться, что испытуемый автоматический выключатель находится в работоспособном состоянии и готов к нормальной эксплуатации.
Для бытовых автоматических выключателей Ics = k Icn. Значения коэффициента k приведены в стандарте МЭК 60898 (таблица XIV).
В Европе обычной практикой в промышленности является использование k=100%, и поэтому Ics = Icu.

(1) «О» означает операцию отключения, «СО» означает операцию включения, за которой следует операция отключения.

Многие типы низковольтных автоматических выключателей обладают способностью ограничивать ток короткого замыкания, благодаря которой ток короткого замыкания снижается и не достигает своего максимального пикового значения (рис. Н35). Токоограничивающая способность таких автоматических выключателей представляется в форме кривых, показанных на рис. Н39.

## Ограничение тока короткого замыкания

Способность автоматического выключателя ограничивать ток короткого замыкания заключается в том, что с большей или меньшей эффективностью он может предотвращать протекание максимального ожидаемого тока короткого замыкания и допускать лишь ограниченный ток (рис. Н38.).

Токоограничивающая способность указывается изготовителем автоматических выключателей в форме кривых (рис. Н39).

■ Диаграмма а показывает ограниченное пиковое значение тока в зависимости от действующего значения периодической составляющей ожидаемого тока короткого замыкания («ожидаемый» ток короткого замыкания представляет собой ток короткого замыкания, который протекал бы, если бы данный автоматический выключатель не обладал токоограничивающей способностью).

■ Ограничение тока значительно снижает температурные напряжения (пропорциональные  $I^2t$ ), что отражено на рис. Н39 на кривой б, построенной тоже в зависимости от действующего значения периодической составляющей ожидаемого тока короткого замыкания.

В некоторых стандартах, например в европейском стандарте EN 60 898, классифицируются низковольтные автоматические выключатели для бытовых и аналоговых применений. Токоограничивающие автоматические выключатели имеют стандартные величины  $I^2t$ , предусмотренные для этого класса.

В этих случаях изготовители, как правило, не указывают кривые токоограничения.

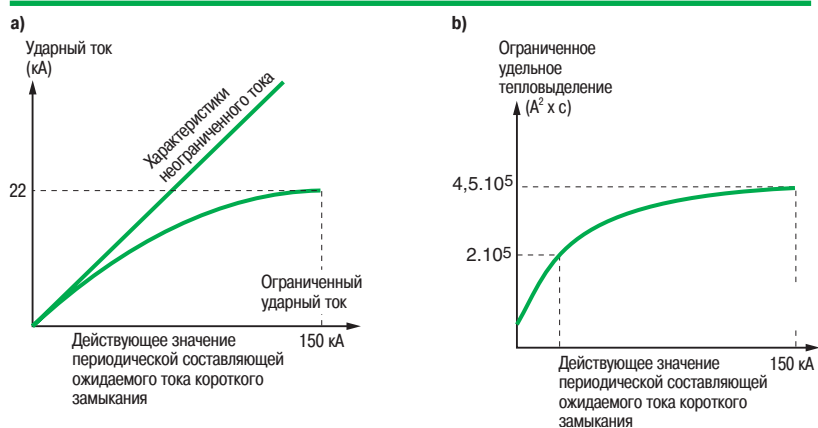


Рис. Н39: Кривая токоограничения (а) и ограничения тепловыделения (б)

Ограничение тока снижает температурные и электродинамические напряжения во всех элементах цепи, через которые этот ток проходит, благодаря чему продлевается срок их эксплуатации. Кроме того, токоограничивающая функция дает возможность использовать методы «каскадного» включения (см. раздел 4.5), что позволяет значительно снизить затраты на проектные и монтажные работы.

## Преимущества ограничения тока

Использование токоограничивающих автоматических выключателей дает много преимуществ:

- улучшенная сохранность цепей электроустановки: такие автоматические выключатели резко ослабляют все нежелательные последствия, связанные с протеканием токов короткого замыкания;
- снижение термических эффектов: значительно снижается нагрев проводников и, соответственно, изоляции, благодаря чему удлиняется срок службы кабелей;
- снижение механических эффектов: силы, обусловленные электромагнитным отталкиванием, оказываются меньше, в результате чего снижается риск деформации, возможного разрушения, чрезмерного выгорания контактов и др.;
- снижение влияния электромагнитных помех:
- меньшее негативное влияние на измерительные приборы и соответствующие цепи, телекоммуникационные системы и др.

Таким образом, такие автоматические выключатели способствуют более эффективной эксплуатации:

- кабелей и проводки;
- кабелепроводов заводского изготовления;
- коммутационных аппаратов.

И тем самым замедляют старение данной электроустановки.

## Пример

В системе, имеющей ожидаемый ток короткого замыкания 150 кА, автоматический выключатель Compact ограничивает ток до величины, менее чем 10% от расчетного ожидаемого пика тока, а термические эффекты снижаются до уровня, менее 1% от расчетного.

Каскадное включение нескольких уровней коммутации в электроустановке, расположенных ниже токоограничивающего автоматического выключателя, также приведет к значительной экономии средств.

Фактически, метод каскадирования, описанный в подпункте 4.5, обеспечивает значительную экономию (до 20%) на коммутационной аппаратуре (ниже токоограничивающего автоматического выключателя или выключателей могут применяться аппараты с пониженными эксплуатационными характеристиками).

Использование автоматических выключателей серии Compact NS позволяет реализовать схемы селективной защиты и каскадирования и обеспечить необходимую отключающую способность коммутационной аппаратуры.

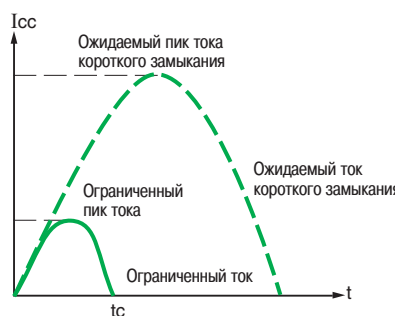


Рис. Н38: Ожидаемый и фактический токи

Выбор автоматических выключателей определяется:
электрическими характеристиками электроустановки,
условиями эксплуатации, нагрузками и необходимостью
дистанционного управления (в зависимости от типа
планируемой телекоммуникационной сети).

H18

Порог срабатывания втоматических выключателей с
некомпенсируемыми комбинированными расцепителями
имеют зависит от окружающей температуры.

4.4 Выбор автоматического выключателя

Критерии выбора автоматического выключателя

- Выбор автоматического выключателя производится с учетом:
■ электрических характеристик электроустановки, для которой предназначен этот автоматический
выключатель;
■ условий его эксплуатации: температуры окружающей среды, размещения в здании подстанции
или корпусе распределительного щита, климатических условий и др.;
■ требований к включающей и отключающей способности при коротких замыканиях,
эксплуатационных требований: селективного отключения, требований к дистанционному управлению
и индикации и соответствующим вспомогательным контактам, дополнительным расцепителям,
соединениям;
■ правил устройства электроустановок, в частности требований в отношении обеспечения защиты
людей;
■ характеристик нагрузки, например электродвигателей, люминесцентного освещения,
разделительных трансформаторов низкого напряжения.

Следующие замечания относятся к выбору низковольтного автоматического выключателя для
использования в распределительных системах.

Выбор номинального тока с учетом окружающей температуры

- Номинальный ток автоматического выключателя определяется для работы при определенной
температуре окружающей среды, которая обычно составляет:
- 30°C для бытовых автоматических выключателей;
  - 40°C для промышленных автоматических выключателей.

Функционирование этих автоматических выключателей при другой окружающей температуре зависит
главным образом от технологии применяемых расцепителей (рис. H40).

Некомпенсируемые термоманитные комбинированные расцепители

Автоматические выключатели с некомпенсируемыми термоманитными расцепителями имеют порог
срабатывания, который зависит от окружающей температуры. Если автоматический выключатель
установлен в оболочке или в помещении с высокой температурой (например, в котельной), то ток,
необходимый для отключения (срабатывания) этого автоматического выключателя при перегрузке,
будет заметно ниже. Когда температура среды, в которой расположен автоматический выключатель,
превышает оговоренную изготовителем температуру, его характеристики окажутся «заниженными».
По этой причине изготовители автоматических выключателей приводят таблицы с поправочными
коэффициентами, которые необходимо применять при температурах, отличных от оговоренной
температуры функционирования автоматического выключателя. Из типовых примеров таких таблиц
(рис. H41) следует, что при температуре, оговоренной изготовителем, происходит повышение порога
срабатывания соответствующего автоматического выключателя. Кроме того, небольшие модульные
автоматические выключатели, установленные вплотную друг к другу (рис. H27), обычно монтируются
в небольшом закрытом металлическом корпусе. В таком случае, вследствие взаимного нагрева при
прохождении обычных токов нагрузки, к их токовым уставкам необходимо применять поправочный
коэффициент 0,8.

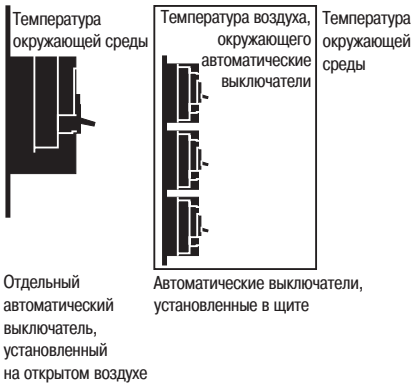


Рис. H40: Температура окружающей среды

Автоматические выключатели C60a, C60H: кривая C. C60N: кривые B и C (стандарт. температура: 30°C)

Ном. ток (A)	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
1	1.05	1.02	1.00	0.98	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85
2	2.08	2.04	2.00	1.96	1.92	1.88	1.84	1.80	1.74
3	3.18	3.09	3.00	2.91	2.82	2.70	2.61	2.49	2.37
4	4.24	4.12	4.00	3.88	3.76	3.64	3.52	3.36	3.24
6	6.24	6.12	6.00	5.88	5.76	5.64	5.52	5.40	5.30
10	10.6	10.3	10.0	9.70	9.30	9.00	8.60	8.20	7.80
16	16.8	16.5	16.0	15.5	15.2	14.7	14.2	13.8	13.5
20	21.0	20.6	20.0	19.4	19.0	18.4	17.8	17.4	16.8
25	26.2	25.7	25.0	24.2	23.7	23.0	22.2	21.5	20.7
32	33.5	32.9	32.0	31.4	30.4	29.8	28.4	28.2	27.5
40	42.0	41.2	40.0	38.8	38.0	36.8	35.6	34.4	33.2
50	52.5	51.5	50.0	48.5	47.4	45.5	44.0	42.5	40.5
63	66.2	64.9	63.0	61.1	58.0	56.7	54.2	51.7	49.2

NS250N/H/L (стандартная температура: 40°C)

Ном. ток (A)	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
TM160D	160	156	152	147	144
TM200D	200	195	190	185	180
TM250D	250	244	238	231	225

Рис. H41: Примеры таблиц для определения коэффициентов понижения/повышения токовых уставок, которые
должны применяться к автоматическим выключателям с некомпенсируемыми тепловыми расцепителями в
зависимости от температуры

## Пример

Какой номинальный ток ( $I_n$ ) следует выбрать для автоматического выключателя C60 N? Этот аппарат:

- обеспечивает защиту цепи, в которой максимальный расчетный ток нагрузки составляет 34 А;
- установлен вплотную к другим автоматическим выключателям в закрытой распределительной коробке
- эксплуатируется при окружающей температуре 50°C.

При окружающей температуре 50°C уставка автоматического выключателя C60N с номинальным током 40 А снизится до 35,6 А (см. таблицу на рис. H41). Взаимный нагрев в замкнутом пространстве учитывается поправочным коэффициентом 0,8. Таким образом, получим  $35,6 \times 0,8 = 28,5$  А, что не приемлемо для тока нагрузки 34 А.

Поэтому будет выбран автоматический выключатель на 50 А, и соответствующая скорректированная уставка по току составит  $44 \times 0,8 = 35,2$  А.

## Компенсированные комбинированные расцепители

Эти расцепители содержат биметаллическую компенсирующую пластину, которая обеспечивает возможность регулировки уставки по току отключения при перегрузке ( $I_r$  или  $I_{rth}$ ) в установленных пределах независимо от температуры окружающей среды.

Пример:

- В некоторых странах система заземления TT является стандартной в низковольтных распределительных системах, а бытовые (и аналогичные) электроустановки защищаются в месте ввода автоматическим выключателем, который устанавливается соответствующей энерго-снабжающей организацией. Такой автоматический выключатель, помимо защиты от косвенного прикосновения, обеспечит отключение цепей при перегрузках, если потребитель превысит уровень потребляемого тока, оговоренный в его контракте с энергоснабжающей организацией. Регулировка уставок автоматического выключателя с номинальным током менее 60 А возможна в диапазоне температур от -5 до +40°C.
- Низковольтные автоматические выключатели с номинальным током менее 630 А обычно оснащаются компенсируемыми расцепителями для этого температурного диапазона (от -5 до +40 °C).

## Электронные расцепители

Важным преимуществом электронных расцепителей является их устойчивая работа при изменении температурных условий. Однако само распределительное устройство часто налагает эксплуатационные ограничения при повышенных температурах, поэтому изготовители обычно приводят рабочую диаграмму, на которой указываются максимально допустимые значения уставок тока в зависимости от окружающей температуры (рис. H42).

Электронные расцепители устойчиво функционируют при изменении окружающей температуры.

Вариант исполнения выключателя Masterpact NW20			40°C	45°C	50°C	55°C	60°C
H1/H2/H3	Выкатного типа с горизонтальными контакт. пластинами	$I_n$ (А)	2,000	2,000	2,000	1,980	1,890
		Максимальное значение токовой уставки ( $I_r$ )	1	1	1	0.99	0.95
L1	Выкатного типа с вертикальными контакт. пластинами	$I_n$ (А)	2,000	200	1,900	1,850	1,800
		Максимальное значение токовой уставки ( $I_r$ )	1	1	0.95	0.93	0.90

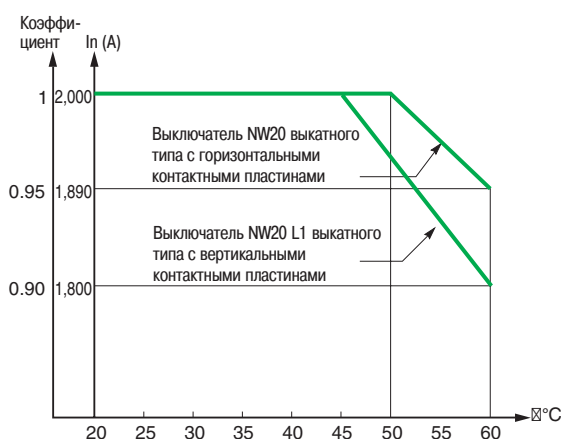


Рис. H42: Снижение максимального значения токовой уставки автоматического выключателя Masterpact NW20 в зависимости от температуры



Выбор уставок срабатывания без выдержки времени

Ниже на рис. Н43 представлены сводные основные характеристики расцепителей, срабатывающих мгновенно.

Table with 3 columns: Тип, Расцепитель, Применения. It lists four types of circuit breakers (Type B, Type C, Type D/K, Type MA) and their applications, including protection of power sources, cables, and motors.

Рис. Н43: Различные расцепители мгновенного действия

Для установки низковольтного автоматического выключателя требуется, чтобы его предельная отключающая способность (или отключающая способность вышестоящего выключателя, удовлетворяющего условиям координации с нижестоящим) была бы равна или превышала расчетный ожидаемый ток короткого замыкания в месте его установки.

Выбор автоматического выключателя с учетом требований по отключающей способности при КЗ

Автоматический выключатель, предназначенный для использования в низковольтной электроустановке, должен удовлетворять одному из двух следующих условий:
- иметь предельную отключающую способность Icu (Icn), которая равна или превышает ожидаемый ток короткого замыкания, рассчитанный для этого места установки;
- использоваться совместно с другим устройством, расположенным выше по цепи и имеющим требуемую отключающую способность.

Во втором случае характеристики этих двух устройств должны быть согласованы так, чтобы ток, который может проходить через вышерасположенное устройство, не превышал максимальный ток, который способны выдержать нижерасположенный выключатель и все соответствующие кабели, провода и другие элементы цепи без какого-либо повреждения. Данный метод целесообразен при использовании:

- комбинаций плавких предохранителей и автоматических выключателей;
- комбинаций токоограничивающих автоматических выключателей и стандартных автоматических выключателей. Этот метод называют «каскадированием» (см. подпункт 4.5 данной главы).

Выбор автоматических выключателей вводных и отходящих линий

Случай применения одного трансформатора

Если трансформатор расположен на потребительской подстанции, то в некоторых национальных стандартах требуется применение низковольтного автоматического выключателя, в котором были бы явно видны разомкнутые контакты, такого как, например, выкатной выключатель Compact NS.

Пример (рис. Н44 на следующей странице)

Какой тип автоматического выключателя пригоден для главного автомата защиты электроустановки, питаемой от трехфазного понижающего трансформатора мощностью 250 кВА и напряжением во вторичной обмотке 400 В, установленного на потребительской подстанции?

Ток трансформатора In = 360 А

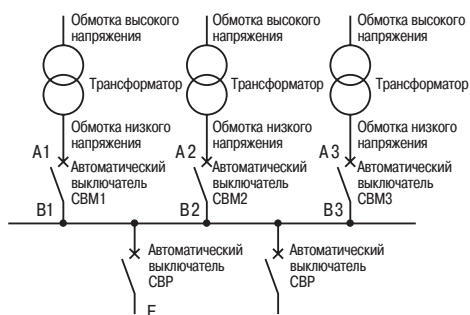
Ток (трехфазный) Isc = 8,9 кА

Для таких условий подходящим вариантом будет автоматический выключатель Compact NS400N с диапазоном регулировки расцепителя 160 - 400 А и предельной отключающей способностью (Icu) 45 кА.

При наличии нескольких трансформаторов, включенных параллельно, автоматический выключатель, установленный на выходе самого маленького трансформатора, должен иметь отключающую способность не менее суммарной отключающей способности других низковольтных автоматических выключателей трансформаторов.



**Рис. Н44:** Пример установки автоматического выключателя на выходе трансформатора, расположенного на потребительской подстанции



**Рис. Н45:** Параллельное включение трансформаторов

## Несколько трансформаторов, включенных параллельно (рис. Н45)

■ Каждый из автоматических выключателей CBP, установленных на линиях, отходящих от низковольтного распределительного щита, должен быть способен отключать суммарный ток короткого замыкания от всех трансформаторов, подсоединенных к шинам, т.е.  $I_{sc1} + I_{sc2} + I_{sc3}$ .

■ Автоматические выключатели CBM, каждый из которых контролирует выход соответствующего трансформатора, должны быть способны отключать максимальный ток короткого замыкания, например, ток  $I_{sc2} + I_{sc3}$ , если короткое замыкание возникло в месте, расположенном выше выключателя CBM1.

Из этих соображений понятно, что в таких обстоятельствах автоматический выключатель самого маленького трансформатора будет подвергаться самому большому току короткого замыкания, а автоматический выключатель самого большого трансформатора будет пропускать наименьший ток короткого замыкания.

■ Номинальные токи отключения автоматических выключателей CBM должны выбираться в зависимости от номинальной мощности к КВА соответствующих трансформаторов.

**Примечание:** Необходимыми условиями для успешной параллельной работы трехфазных трансформаторов являются следующие:

1. Фазовый сдвиг напряжений во вторичной и первичной обмотках должен быть одинаков во всех параллельно включенных трансформаторах.
  2. Коэффициенты трансформации должны быть одинаковы для всех трансформаторов.
  3. Напряжения короткого замыкания ( $U_k\%$ ) должны быть одинаковыми для всех трансформаторов.
- Например, трансформатор мощностью 750 кВА с  $U_k = 6\%$  будет правильно делить нагрузку с трансформатором мощностью 1000 кВА, имеющим  $U_k = 6\%$ , т.е. эти трансформаторы будут автоматически нагружаться пропорционально их мощностям. Для трансформаторов, у которых отношение номинальных мощностей превышает 2, параллельная работа не рекомендуется.

В таблице, приведенной на рис. Н46, указаны максимальные токи короткого замыкания, которым подвергаются автоматические выключатели вводных и отходящих линий (соответственно CBM и CBP на рис. Н45), для самой распространенной схемы параллельной работы (2 или 3 трансформатора одинаковой мощности). Приведенные данные базируются на следующих допущениях:

- мощность трехфазного короткого замыкания на стороне высокого напряжения трансформатора составляет 500 МВА;
- трансформаторы являются стандартными распределительными трансформаторами напряжением 20/0,4 кВ, характеристики которых приведены в таблице;
- кабели от каждого трансформатора к его низковольтному автоматическому выключателю состоят из одножильных проводников длиной 5 метров;
- между каждым автоматическим выключателем вводной цепи (CBM) и каждым автоматическим выключателем отходящей цепи (CBP) имеется шина питания длиной 1 м;
- распределительное устройство расположено в напольном закрытом распределительном щите, температура окружающего воздуха - 30°C.

Кроме того, в этой таблице указаны модели автоматических выключателей Merlin Gerin, рекомендуемые для применения в каждом случае в качестве автоматических выключателей вводных и отходящих линий.

**Пример (рис. Н47 на следующей странице)**

■ Выбор автоматического выключателя вводной линии (CBM):

Для трансформатора мощностью 800 кВА  $I_n = 1126$  А,  $I_{cu}$  (минимальный ток) = 38 кА (из рис. Н46). При таких характеристиках таблица рекомендует использовать Compact NS1250N ( $I_{cu} = 50$  кА).

■ Выбор автоматического выключателя отходящей линии (CBP):

Из рис. Н46 требуемая отключающая способность ( $I_{cu}$ ) для таких автоматических выключателей составляет 56 кА.

Для трех отходящих линий 1, 2 и 3 рекомендуется использовать токоограничивающие автоматические выключатели типа NS400 L, NS250 L и NS 100 L. В каждом случае номинальная отключающая способность  $I_{cu} = 150$  кА.

H21

Количество и мощности (кВА) трансформаторов 20/0,4 кВ	Мин. отключающая способность автомат. выкл. вводных линий $I_{cu}$ (кА)	Автомат. выкл. вводных линий (CBM), полностью согласованные с автомат. выкл. отходящих цепей (CBP)	Мин. отключ. способность автомат. выкл. отходящих линий $I_{cu}$ (кА)	Ном. ток $I_n$ автомат. выкл. отходящих линий (CBP) 250 А
2 x 400	14	NW08N1/NS800N	27	NS250H
3 x 400	28	NW08N1/NS800N	42	NS250H
2 x 630	22	NW10N1/NS1000N	42	NS250H
3 x 630	44	NW10N1/NS1000N	67	NS250H
2 x 800	19	NW12N1/NS1250N	38	NS250H
3 x 800	38	NW12N1/NS1250N	56	NS250H
2 x 1,000	23	NW16N1/NS1600N	47	NS250H
3 x 1,000	47	NW16N1/NS1600N	70	NS250H
2 x 1,250	29	NW20N1/NS2000N	59	NS250H
3 x 1,250	59	NW20N1/NS2000N	88	NS250L
2 x 1,600	38	NW25N1/NS2500N	75	NS250L
3 x 1,600	75	NW25N1/NS2500N	113	NS250L
2 x 2,000	47	NW32N1/NS3200N	94	NS250L
3 x 2,000	94	NW32N1/NS3200N	141	NS250L

**Рис. Н46:** Максимальные токи короткого замыкания, которые должны отключаться автоматическими выключателями вводных и отходящих линий (соответственно CBM и CBP) при параллельной работе нескольких трансформаторов



Значения токов короткого замыкания в любом месте электроустановки можно определить с помощью таблиц.

Эти автоматические выключатели обеспечивают следующие преимущества:

- полное согласование с характеристиками вышеразположенных автоматических выключателей (СВМ), т.е. селективность срабатывания защит;
- использование метода «каскадирования» с соответствующей экономией затрат в отношении всех элементов, расположенных ниже по цепи.

## Выбор автоматических выключателей отходящих и оконечных линий

### Использование таблицы G39

С помощью этой таблицы можно быстро определить величину трехфазного тока короткого замыкания в любом месте электроустановки, зная:

- величину тока короткого замыкания в точке, расположенной выше места, предназначенного для установки соответствующего автоматического выключателя;
- длину, сечение и материал проводников между этими двумя точками.

После этого можно выбрать автоматический выключатель, у которого отключающая способность превышает полученное табличное значение.

### Детальный расчет тока короткого замыкания

Для того, чтобы более точно рассчитать величину тока короткого замыкания, особенно в случае, когда отключающая способность автоматического выключателя чуть меньше величины, полученной из таблицы, необходимо использовать метод, описанный в пункте 4 главы G.

### Двухполюсные автоматические выключатели (для фазы и нейтрали) с одним защищенным полюсом

Такие автоматические выключатели обычно имеют устройство максимальной защиты только на полюсе фазы и могут применяться в системах TT, TN-S и IT. В системе IT должны выполняться следующие условия:

- условие (B) из таблицы G67 для максимальной защиты нулевого проводника в случае двойного короткого замыкания;
- отключающая способность при КЗ: двухполюсный автоматический выключатель (фаза-нейтраль) должен быть способен отключать на одном полюсе (при линейном напряжении) ток двойного короткого замыкания, равный 15% трехфазного тока короткого замыкания в месте его установки, если этот ток не превышает 10 кА, или 25% трехфазного тока короткого замыкания, если он превышает 10 кА;
- защита от косвенного прикосновения: такая защита обеспечивается в соответствии с правилами, предусмотренными для систем заземления IT.

### Недостаточная отключающая способность при КЗ

В низковольтных распределительных системах, особенно в сетях, эксплуатируемых в тяжелых условиях, иногда случается, что рассчитанный ток трехфазного КЗ  $I_{sc}$  превышает предельную отключающую способность  $I_{cu}$  автоматических выключателей, имеющихся в наличии для установки, или же изменения, произошедшие в системе выше, привели к изменениям требований к отключающим способностям автоматических выключателей.

■ Решение 1: убедитесь в том, что соответствующие автоматические выключатели, расположенные выше тех, которых это коснулось, являются токоограничивающими, поскольку в таком случае можно использовать принцип каскадного включения (см. подпункт 4.5).

■ Решение 2: установите несколько автоматических выключателей с более высокой отключающей способностью. Такое решение представляется экономически целесообразным в том случае, если затронуты один или два автоматических выключателя.

■ Решение 3: установите последовательно с затронутыми автоматическими выключателями и выше по цепи токоограничивающие плавкие предохранители (типа gG или aM). При этом такая схема должна отвечать следующим условиям:

- предохранитель должен иметь соответствующий номинал;
- предохранитель не должен устанавливаться в цепи нулевого проводника, за исключением определенных электроустановок системы IT, в которых при двойном коротком замыкании в нулевом проводнике возникает ток, превышающий отключающую способность автоматического выключателя. В этом случае расплавление предохранителя в нулевом проводнике приведет к тому, что этот автоматический выключатель отключит все фазы.

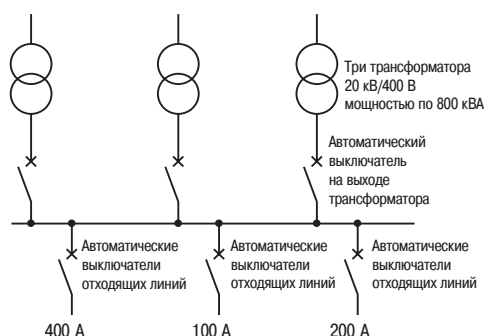


Рис. Н47: Параллельная работа трансформаторов

Метод «каскадирования» основан на использовании токоограничивающих автоматических выключателей и позволяет устанавливать ниже их по цепи коммутационные аппараты, кабели и другие элементы со значительно сниженными номинальными характеристиками. Благодаря этому упрощается и удешевляется электроустановка.

## 4.5 Согласование характеристик автоматических выключателей

### Каскадирование

#### Определение метода каскадирования

Ограничивая пиковую величину тока короткого замыкания, токоограничивающий автоматический выключатель позволяет использовать во всех цепях, расположенных ниже места его установки, коммутационные аппараты и элементы цепей с гораздо меньшими отключающими способностями, а также меньшей термической и электродинамической устойчивостью. Меньшие физические размеры и сниженные требования к характеристикам приводят к значительной экономии и существенному упрощению монтажных работ. Стоит отметить, что хотя токоограничивающий автоматический выключатель влияет на нижеразположенные цепи, увеличивая полное сопротивление источника питания при коротком замыкании, он не оказывает такого влияния в любое другое время, например, при включении крупного электродвигателя (когда низкое полное сопротивление источника питания весьма желательно). Особый интерес представляет серия токоограничивающих автоматических выключателей Compact с высокими ограничивающими характеристиками (NS 100, NS 160, NS 250 и NS 400).

В целом, для проверки того, что условия применения соответствуют требованиям национальных стандартов, требуются лабораторные испытания, а изготовителями должны поставляться совместимые комбинации коммутационных аппаратов.

Условия применения

Большинство национальных стандартов допускают применение метода каскадного отключения коммутационных аппаратов при условии, что количество энергии, проходящей через токоограничивающий автоматический выключатель, меньше того, которое все нижерасположенные автоматические выключатели и элементы цепи способны выдержать без повреждений. На практике это можно проверить только проведением лабораторных испытаний с автоматическими выключателями. Такие испытания проводятся изготовителями, которые приводят их результаты в виде таблиц. Благодаря этому пользователи могут уверенно проектировать схему каскадного соединения выключателей, основанную на комбинации рекомендованных типов автоматических выключателей. Например, на **рис. H48** показаны возможности каскадирования автоматических выключателей типа C60, DT40N, C120 и NG125, расположенных ниже токоограничивающих автоматических выключателей типа NS 250 N, H или L в трехфазной электроустановке напряжением 230/400 В или 240/415 В.

Действующая величина тока в кА			
Откл. способность вышеразположенных токоограничивающих автомат. выключателей	150		NS250L
	50		NS250H
	35	NS250N	
Откл. способность нижерасположенных автомат. выключателей (благодаря схеме каскадного соединения)	150		NG125L
	70		NG125L
	40		C60L ≤ 40 C60L ≤ 40
	36	NG125N	NG125N
	30	C60H C60L 50-63	C60N/H C60L 50-63
	25	C60N C120N/H	C60N C120N/H
	20	DT40N	DT40N
	15	C60N	

Рис. H48: Пример возможностей каскадирования в трехфазной электроустановке напряжением 230/400 В или 240/415 В

Преимущества каскадирования

Ограничение тока дает преимущества всем нижерасположенным цепям, которые управляются соответствующим токоограничивающим автоматическим выключателем. Данный принцип не накладывает никаких дополнительных ограничений, т.е. токоограничивающие автоматические выключатели могут устанавливаться в любом месте электроустановки, в котором нижерасположенные цепи недостаточно защищены. Преимущества:

- упрощение расчетов токов короткого замыкания;
- более широкий выбор нижерасположенных коммутационных аппаратов и бытовых приборов;
- использование коммутационных аппаратов и бытовых приборов, рассчитанных на более легкие условия эксплуатации и, следовательно, менее дорогих;
- экономия пространства, поскольку оборудование, рассчитанное на меньшие токи, обычно является более компактным.

Селективность отключения может быть полной или частичной и зависеть от соотношения величин токов, времени отключения или комбинации этих факторов. В системе, запатентованной Merlin Gerin, используются преимущества как токоограничения, так и селективности.

Селективное отключение

Селективность отключения обеспечивается автоматическими защитными устройствами и состоит в том, что короткое замыкание, возникшее в любом месте электроустановки, отключается защитным устройством, расположенным непосредственно выше этого места, а все остальные защитные устройства не отключаются (рис. H49).

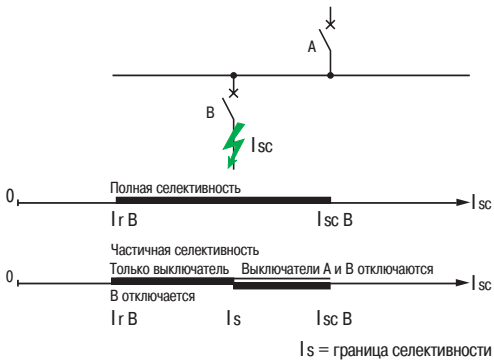


Рис. H49: Полная и частичная селективность

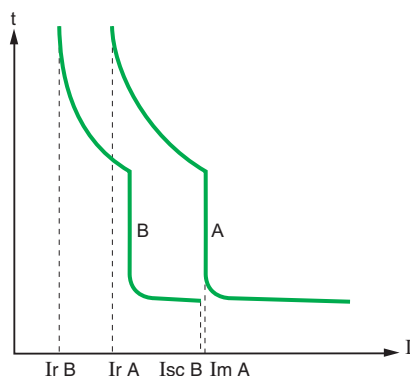


Рис. H50: Полная селективность автоматических выключателей A и B

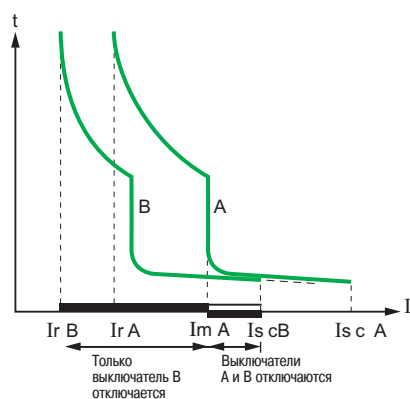


Рис. H51: Частичная селективность характеристик автоматических выключателей A и B

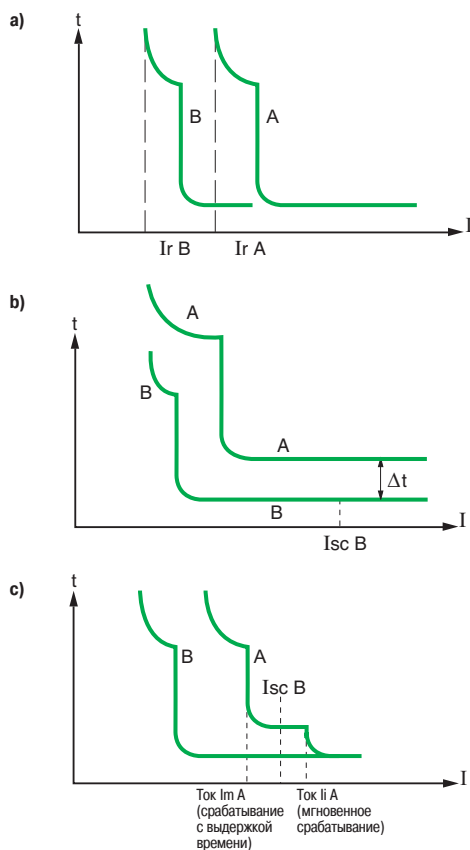


Рис. H52: Обеспечение селективности

Селективность между автоматическими выключателями A и B является полной, если максимальная величина тока короткого замыкания в цепи B ( $I_{sc}B$ ) не превышает мгновенную уставку автоматического выключателя A ( $I_{m}A$ ). При этом условии только выключатель B будет отключать ток (рис. H50).

Селективность автоматических выключателей A и B является частичной, если максимально возможный ток короткого замыкания в цепи B превышает мгновенную уставку автоматического выключателя A. В таких условиях оба выключателя A и B будут срабатывать одновременно (рис. H51).

#### Защита от перегрузки: токовая селективность (рис. H52a)

Данный метод реализуется посредством задания различных токовых уставок  $I_rA$  и  $I_rB$ , от более низких уставок по току для нижерасположенных коммутационных элементов к более высоким уставкам по мере приближения к источнику питания. Как указывалось в предыдущих примерах, в зависимости от конкретных условий селективность может быть полной или частичной.

Практически селективность отключения обеспечивается, когда  $I_rA/I_rB > 2$ .

#### Защита от малых токов короткого замыкания: временная селективность (рис. H52b)

Данный метод реализуется посредством регулировки расцепителей, срабатывающих с выдержкой времени, при этом нижерасположенные реле имеют самые короткие значения времени срабатывания, а по мере приближения реле к источнику питания время выдержки последовательно возрастает.

В показанной двухуровневой схеме вышерасположенный автоматический выключатель A имеет достаточное время выдержки, чтобы обеспечить полное согласование с характеристиками выключателя B (например, выключатель типа Masterpact с электронным расцепителем).

#### Селективность отключения, основанная на комбинации методов 1 и 2 (рис. H52c)

Временная селективность в комбинации с токовой селективностью может повысить общую эффективность селективного отключения.

Селективность является полной, если  $I_{sc}B < I_{m}A$  (мгновенное срабатывание).

Вышерасположенный автоматический выключатель имеет две уставки быстродействующего расцепителя:

- $I_m A$  (селективная токовая отсечка);
- $I_i$  (мгновенное срабатывание).

#### Защита от больших токов короткого замыкания: селективность отключения, основанная на энергии дуги

Эта технология, реализованная в токоограничивающих автоматических выключателях серии Compact NS, очень эффективна для обеспечения полной селективности.

Принцип действия: когда очень большой ток короткого замыкания обнаруживается двумя автоматическими выключателями A и B, контакты одновременно размыкаются, в результате чего величина этого тока ограничивается.

- Очень высокий уровень энергии дуги (B) вызывает отключение автоматического выключателя A.
- В тоже время эта величина энергии дуги недостаточна для того, чтобы вызвать отключение автоматического выключателя A.

Поскольку нижерасположенный автоматический выключатель имеет меньшие параметры, он будет ограничивать ток на более низком уровне, чем вышерасположенный автоматический выключатель.

Практически селективность отключения автоматических выключателей Compact NS обычно является полной, если соотношение номинальных токов выключателей A и B превышает 2,5.

#### Токовая селективность в диапазоне срабатывания быстродействующих расцепителей

Токовая селективность достигается благодаря ступенчатому регулированию токовых уставок быстродействующих расцепителей

Токовая селективность обеспечивается в основном токоограничивающими выключателями с электромагнитными расцепителями, допускающими ступенчатое регулирование токовых уставок.

- Нижерасположенный автоматический выключатель не является токоограничивающим. Полная селективность в данной ситуации практически невозможна, поскольку токи  $I_{sc}A$  и  $I_{sc}B$  примерно равны, поэтому оба автоматических выключателя будут срабатывать одновременно. В этом случае селективность является частичной, селективность ограничена током  $I_m$  вышестоящего автоматического выключателя (рис. H51).

- Нижерасположенный автоматический выключатель является токоограничивающим.

Улучшение селективности достигается за счет токоограничения, осуществляемого выключателем B. В случае возникновения короткого замыкания ниже выключателя B, ограниченный ток КЗ вызовет срабатывание электромагнитного расцепителя выключателя B (если его уставки были правильно настроены) B то же время ограниченный выключателем B ток КЗ будет недостаточен для того, чтобы вызвать отключение автоматического выключателя A.

**Примечание:** всем рассмотренным здесь низковольтным выключателям присуща некоторая степень токоограничения, даже тем, которые не относятся к токоограничивающим. Это является причиной нелинейной характеристики, показанной для стандартного автоматического выключателя A на рис. H53. Однако для нормальной работы такой схемы необходимы тщательные расчеты и испытания.

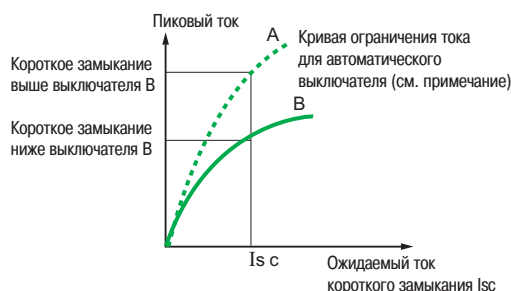


Рис. H53: Нижерасположенный токоограничивающий автоматический выключатель B

■ В зависимости от величины токов КЗ вышерасположенный автоматический выключатель может срабатывать мгновенно или с короткой выдержкой времени. Такие выключатели оснащаются расцепителями и небольшой задержкой срабатывания (селективная токовая отсечка). Эта задержка является достаточной, чтобы обеспечить полную селективность с любым нижерасположенным быстродействующим автоматическим выключателем при любом токе короткого замыкания вплоть до  $I_A$  (рис. H54).

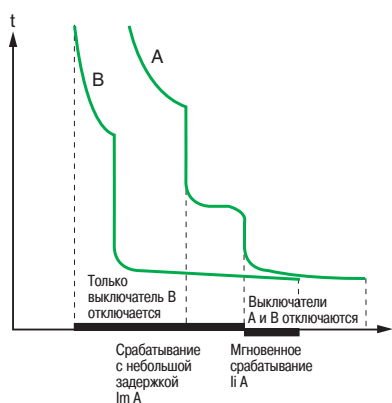


Рис. H54: Использование вышерасположенного автоматического выключателя с селективной токовой отсечкой

### Пример

Автоматический выключатель A: серия Compact NS250 N с расцепителем, имеющим селективную токовую отсечку

$I_r = 250$  A, селективная токовая отсечка настроена на 2000 A.

Автоматический выключатель B: Compact NS100N

$I_r = 100$  A

В документации Merlin Gerin указан предельный ток селективности 3000 A (что превышает величину 2500 A при использовании стандартного расцепителя).

### Временная селективность в диапазоне срабатывания быстродействующих расцепителей

Для реализации этого метода необходимо:

- предусмотреть временные задержки срабатывания расцепителей автоматических выключателей;
- использовать автоматические выключатели, способные выдерживать тепловые и механические нагрузки при повышенных уровнях токов и заданных выдержках времени.

Два последовательно соединенных автоматических выключателя A и B (т.е. пропускающих один и тот же ток) являются селективными, если продолжительность отключения тока нижерасположенным выключателем B меньше, чем время задержки срабатывания выключателя A.

Для реализации временной селективности используются автоматические выключатели, которые в некоторых странах называют «селективными».

Применение таких выключателей является относительно простым и заключается в задержке срабатывания быстродействующих расцепителей нескольких последовательно соединенных автоматических выключателей.

### Мгновенная селективность

Пример схемы с использованием автоматических выключателей Masterpact (MG) (с электронным расцепителем). Эти выключатели имеют регулируемые временные уставки (4 ступени регулирования), при этом:

- задержка, соответствующая данной ступени, превышает время отключения КЗ с задержкой, соответствующей предыдущей ступени;
- минимальная задержка 1 ступени превышает время отключения КЗ автоматического выключателя Compact NS или плавких предохранителей (рис. Н55).

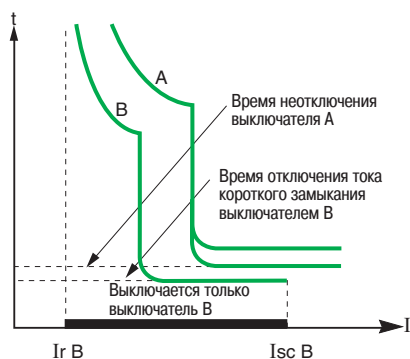


Рис. Н55: Временная селективность

### Селективное отключение с использованием энергии дуги

Если автоматический выключатель не является токоограничивающим, то каскадное отключение двух коммутационных аппаратов достигается отключением вышеразмещенного автоматического выключателя А с тем, чтобы «помочь» нижеразмещенному автоматическому выключателю В отключить ток. Максимальная величина предельного тока селективности Is ниже предельной отключающей способности Icu выключателя В. Технология, основанная на использовании энергии дуги и реализованная в автоматических выключателях Compact NS, позволяет повысить предельный ток селективности.

■ Нижеразмещенный выключатель Compact NS В обнаруживает очень большой ток короткого замыкания. Происходит очень быстрое отключение тока (менее чем за 1 мс) и следовательно величина тока ограничивается.

■ Вышеразмещенный автоматический выключатель Compact NS А обнаруживает ограниченный ток короткого замыкания. Этот ток вызывает расхождение контактов с образованием между ними дуги. В результате возрастает напряжение дуги, и ток еще более ограничивается. Однако электродинамических усилий, вызывающих расхождение контактов, недостаточно, чтобы вызвать отключение этого автоматического выключателя. Таким образом, выключатель Compact NS А помогает выключателю Compact NS В, не отключаясь при этом. Предельный ток селективности может превышать величину тока Icu В, в таком случае обеспечивается полная селективность при оптимальной стоимости этих устройств.

### Полная селективность при использовании выключателей серии Compact NS (рис. Н57 и рис. Н58)

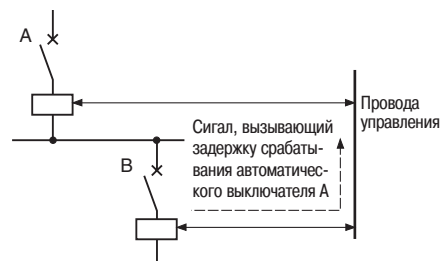
Основное преимущество состоит в возможности обеспечить полную селективность при условии, что:

- соотношение токовых уставок расцепителей  $> 1,6$ ;
- соотношение номинальных токов автоматических выключателей  $> 2,5$ .

Возможны схемы селективного отключения, основанные на логической селективности с использованием автоматических выключателей с электронными расцепителями, предназначенными для этой цели (Compact, Masterpact) и соединенными цепями управления.

## Логическая селективность

Для этой системы селективного отключения требуются автоматические выключатели, оснащенные специальными электронными расцепителями, вместе с цепями управления для обмена данными между автоматическими выключателями. При наличии двух уровней А и В (**рис. Н56**), автоматический выключатель А производит мгновенное отключение, если реле автоматического выключателя В не отправит сигнал подтверждения того, что ниже выключателя В произошло короткое замыкание. При наличии короткого замыкания ниже выключателя В этот сигнал вызовет задержку срабатывания расцепителя выключателя А и тем самым обеспечит срабатывание расцепителя выключателя В. При этом расцепитель выключателя А не сработает. Кроме того, эта система, запатентованная Merlin Gerin, позволяет быстро обнаружить место короткого замыкания.



**Рис. Н56:** Логическая селективность

H27

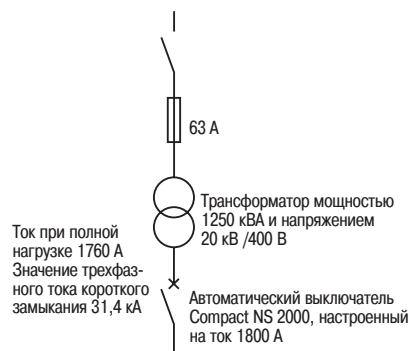
## 4.6 Селективное отключение трансформатора на подстанции потребителя

Обычно трансформатор на подстанции потребителя защищается высоковольтными плавкими предохранителями, имеющими соответствующий этому трансформатору номинал, в соответствии с принципами, изложенными в стандартах МЭК 60787 и МЭК 60420, и рекомендациями изготовителя указанных предохранителей.

Основное требование состоит в том, чтобы высоковольтный плавкий предохранитель не срабатывал при низковольтных коротких замыканиях, происходящих ниже низковольтного автоматического выключателя этого трансформатора с тем, чтобы кривая отключения этого выключателя располагалась слева от кривой плавления высоковольтного предохранителя.

Это требование обычно определяет максимальные уставки срабатывания защиты, обеспечиваемой низковольтным автоматическим выключателем:

- максимальная уставка магнитного расцепителя по отключаемому току короткого замыкания;
- максимальное время выдержки, допустимое для данного расцепителя (**рис. Н57**);
- мощность короткого замыкания на высоковольтных вводах трансформатора: 250 МВА;

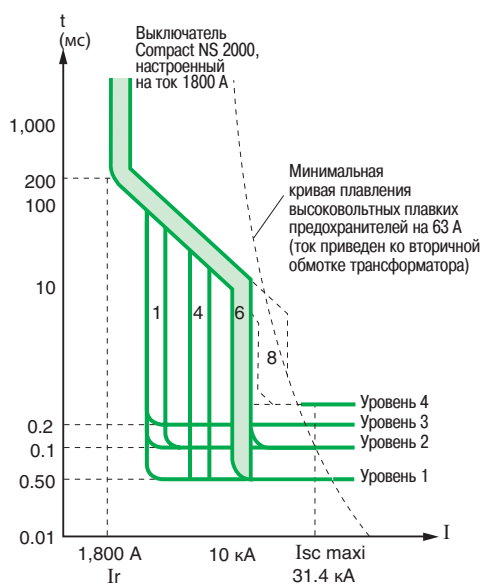


**Рис. Н57:** Пример

- трансформатор: 1250 кВА, 20/0,4 кВ;
- высоковольтные предохранители: 63 А;
- кабели между трансформатором и низковольтным автоматическим выключателем: 10-метровые, одножильные;
- низковольтный автоматический выключатель Compact NS 2000, настроенный на ток 1800 А ( $I_r$ ).  
Какова максимальная уставка по отключаемому току короткого замыкания и максимально допустимое время выдержки?

График на **рис. Н58** показывают, что селективное отключение обеспечивается, если расцепитель автоматического выключателя, настроен на:

- ток  $\leq 6 I_r = 10,8 \text{ кА}$ ;
- уставку времени 0.50 или 0.1.



**Рис. Н58:** Кривые срабатывания высоковольтных плавких предохранителей и низковольтного автоматического выключателя

## Раздел J

# Защита от перенапряжений в низковольтных сетях

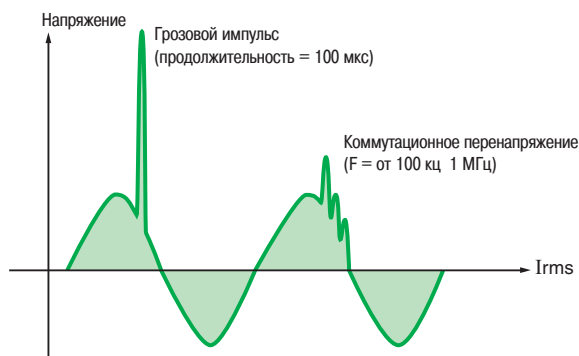
	Содержание	
1	<b>Общие положения</b>	<b>J2</b>
	1.1 Что такое перенапряжение?	J2
	1.2 Четыре типа перенапряжений	J2
	1.3 Основные характеристики перенапряжений	J4
	1.4 Различные виды перенапряжений	J5
2	<b>Устройства защиты от перенапряжений</b>	<b>J6</b>
	2.1 Устройства первичной защиты (молниезащита зданий)	J6
	2.2 Устройства вторичной защиты (молниезащита внутреннего оборудования)	J8
3	<b>Стандарты</b>	<b>J11</b>
	3.1 Описание устройств защиты от перенапряжения	J11
	3.2 Нормы для устройств защиты от перенапряжений	J11
	3.3 Характеристики устройств защиты от перенапряжений согласно стандарту МЭК 61643-1	J11
	3.4 Нормы молниезащиты	J13
4	<b>Выбор защитной аппаратуры</b>	<b>J15</b>
	4.1 Устройства защиты в зависимости от системы заземления	J15
	4.2 Внутренняя архитектура грозозащитных разрядников	J16
	4.3 Правила установки	J16
	4.4 Рекомендации по выбору устройств защиты	J16
	4.5 Выбор выключателя	J23
	4.6 Индикация завершения срока службы грозозащитного разрядника	J23
	4.7 Пример применения: супермаркет	J24



# 1 Общие положения

## 1.1 Что такое перенапряжение?

Перенапряжение - это импульс или волна напряжения с наложением на номинальное сетевое напряжение (см. **рис. J1**).



**Рис. J1:** Примеры перенапряжений

Этот тип перенапряжений характеризуется следующими параметрами (см. **рис. J2**):

- время нарастания ( $t_f$ ) в мкс;
- скорость нарастания в кВ/мкс.

Перенапряжения нарушают работу оборудования и вызывают электромагнитное излучение. Более того, продолжительность перенапряжения ( $T$ ) вызывает всплеск энергии в электрических цепях, который может повредить оборудование.



**Рис. J2:** Основные характеристики перенапряжения

## 1.2 Четыре типа перенапряжений

Существуют четыре типа перенапряжений, которые могут нарушать работу электроустановок и оборудования (потребителей):

- атмосферные перенапряжения;
- коммутационные перенапряжения;
- переходные перенапряжения промышленной частоты;
- перенапряжения, вызванные электростатическим разрядом.

### Атмосферные перенапряжения

#### Риск молний - некоторые сведения

От 2000 до 5000 гроз образуется постоянно в атмосфере земли. Грозы сопровождаются разрядами молнии, которые представляют серьезную угрозу для людей и оборудования. Разряды молнии в атмосфере земли происходят с частотой 30-100 разрядов в секунду. Ежегодно земля испытывает около 3 миллиардов ударов молнии.

- Каждый год во всем мире тысячи людей подвергаются ударам молнии, при этом погибает огромное число животных.
- Кроме того, молния является причиной многочисленных пожаров, большинство из которых возникает на фермах (с уничтожением сооружений или их выходом из строя).
- Молния поражает трансформаторы, счетчики электроэнергии, бытовые электроприборы и электрические и электронные системы в жилом секторе и промышленности.
- Высотные здания - одни из самых поражаемых молнией сооружений.
- Стоимость устранения ущерба, наносимого молнией, крайне велика.
- Трудно оценить последствия нарушений работы компьютерных или телекоммуникационных сетей, сбоев циклов PLC и отказов в системах управления.

Более того, потери из-за выхода машин из строя могут иметь финансовые последствия, выходящие за пределы стоимости оборудования, разрушенного молнией.

## Характеристики разряда молнии

**Рис. J3** содержит данные комитета по молниезащите (технический комитет 81 МЭК{}). Согласно этим данным 50% разрядов молнии имеют силу свыше 33 кА, а 5% - свыше 85 кА. Энергия разрядов крайне высока.

Вероятность - выше макс. Р (%)	Пиковое зна- чение тока I (кА)	Скорость нарастания S (кА/мкс)	Общая продолжит. Т (с)	Число разрядов (n)
95	7	9.1	0.001	1
50	33	24	0.01	2
5	85	65	1.1	6

**Рис. J3:** Характеристики разряда молнии согласно данным комитета по молниезащите

Важно определить наиболее подходящую защиту объекта. Ситуация усложняется тем, что ток молнии является импульсным током высокой частоты (ВЧ) порядка МГц.

## Воздействие молнии

Ток молнии является электрическим током высокой частоты. Кроме значительных наводок и перенапряжения, он оказывает такое же воздействие на проводник, как любой другой ток низкой частоты:

- Тепловой эффект: расплавление в точках воздействия молнии и тепловое действие тока приводят к пожарам.
- Электродинамический эффект: при циркуляции токов молнии в параллельных проводниках они вызывают силы притяжения или отталкивания между проводами, приводя к разрывам или механическим деформациям (раздавливание или сплющивание проводов).
- Эффект взрыва: молния может приводить к расширению воздуха и образованию зоны избыточного давления, расширяющейся на расстояние десятки метров. Ударная волна разрушает окна или перегородки и может отбрасывать животных или людей на несколько метров. Вместе с тем, ударная волна преобразуется в звуковую волну: гром.
- Перенапряжения в проводниках после воздействия молнии на воздушные электрические или телефонные линии.
- Перенапряжения, индуцированные электромагнитным излучением канала молнии, который действует как антенна в радиусе нескольких километров при прохождении по каналу сильного импульсного тока.
- Повышение потенциала земли из-за циркуляции тока молнии в грунте. Это объясняет не прямые разряды молнии из-за образующегося шагового напряжения и связанные с этим повреждения оборудования.

## Коммутационные перенапряжения

Резкое изменение установившегося режима работы электрической сети приводит к переходным процессам. Как правило, это волны перенапряжения высокой частоты (их частота изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен кГц).

Причины коммутационных перенапряжений:

- Отключения устройствами защиты (плавкий предохранитель, выключатель) и отключения или включения аппаратуры управления (реле, контактор и т.д.).
- Перенапряжения от индуктивных цепей из-за пуска или останова двигателей или отключения понижающих трансформаторов подстанций.
- Перенапряжения от емкостных цепей при подсоединении блоков конденсаторов к сети.
- Все устройства, имеющие в своем составе катушку, конденсатор или трансформатор на входе питания: реле, контакторы, телевизоры, принтеры, компьютеры, электропечи, фильтры и т.д.

Молнии происходят от разряда электрических зарядов, накопленных в кучевых облаках, которые образуют конденсатор с землей. Грозовые явления наносят значительный ущерб.

Молния - высокочастотное электрическое явление, вызывающее перенапряжения на всех проводящих элементах, особенно на нагрузках и проводах.

Переходные перенапряжения промышленной частоты (см. **рис. J4**)

Такие перенапряжения имеют такие же частоты, как сеть (50, 60 или 400 Гц):

- Перенапряжения из-за повреждения изоляции фаза/корпус или фаза/земля в сети с заземленной непосредственно или через сопротивление нейтралью или из-за разрыва нейтрального проводника. При этом однофазные устройства получают напряжение 400В.
- Перенапряжения из-за пробоя кабеля. Например, при падении кабеля высокого напряжения на низковольтную линию.
- Образование дуги при срабатывании защитного искрового разрядника высокого или среднего напряжения вызывает повышение потенциала земли, что приводит к появлению перенапряжений.

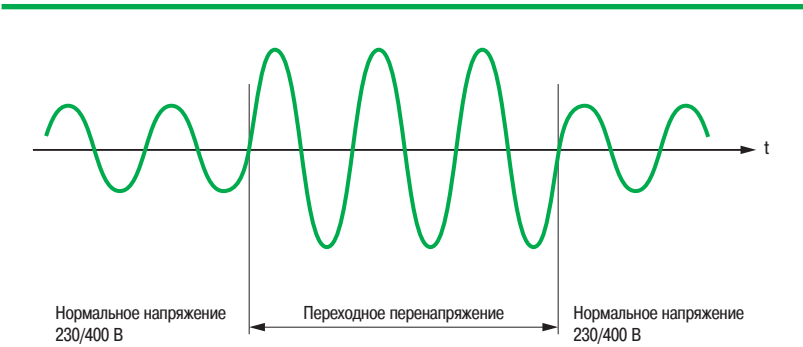


Рис. J4: Переходное перенапряжение промышленной частоты

Перенапряжения из-за электрического разряда

В сухой среде электрические заряды накапливаются и создают очень сильное электростатическое поле. Например, человек, идущий по ковру в изолирующей обуви, становится электрически заряженным до напряжения нескольких киловольт. Если человек проходит около проводящей конструкции, возникает электрический разряд в несколько ампер с очень коротким временем нарастания (несколько наносекунд). Если конструкция включает чувствительное электронное устройство, например, компьютер, его компоненты или монтажные платы могут быть повреждены.

1.3 Основные характеристики перенапряжений

Рис. J5 ниже показывает сводные основные характеристики перенапряжений.

Тип перенапряжения	Коэффициент перенапряжения	Продолжительность	Частота
Промышленная частота (повреждение изоляции)	1.7	Длительное 30 - 1,000 мс	Промышлен. частота (50-60-400 Гц)
Коммутационное	2 - 4	Кратковременное 1 - 100 мс	Средняя 1 - 200 кГц
Атмосферное	> 4	Очень кратковремен. 1 - 100 мкс	Очень высокая 1 - 1,000 кВ/мкс

Рис. J5: Основные характеристики перенапряжений

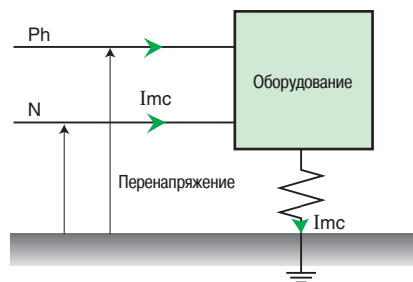
- Необходимо учитывать три фактора:
- Прямой или не прямой удар молнии может иметь разрушительные последствия для электросистем в радиусе нескольких километров.
  - Коммутационные перенапряжения наносят значительный ущерб.
  - Подземное размещение оборудования никоим образом не защищает его от поражения, хотя и ограничивает риск прямого поражения.

## 1.4 Различные виды перенапряжений

### Несимметричные (синфазные) перенапряжения

Несимметричные (синфазные) перенапряжения возникают между деталями под напряжением и землей: фаза/земля или нейтраль/земля (см. **рис. J6**).

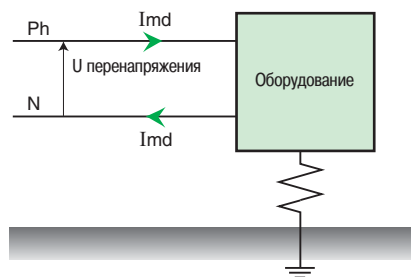
Они особенно опасны для конструкций, которые заземлены в силу риска пробоя диэлектрика.



**Рис. J6:** Несимметричные (синфазные) перенапряжения

### Симметричные (дифференциальные) перенапряжения

Симметричные (дифференциальные) перенапряжения циркулируют между проводниками фаза/фаза или фаза/земля под напряжением (**рис. J7**). Они особенно опасны для электронного оборудования, чувствительного компьютерного оборудования и т.д.



**Рис. J7:** Симметричные (дифференциальные) перенапряжения

## 2 Устройства защиты от перенапряжений

Два основных типа устройств защиты применяются для гашения или ограничения перенапряжений: устройства первичной и вторичной защиты.

### 2.1 Устройства первичной защиты (молниезащита зданий)

Назначение устройств первичной защиты состоит в защите от прямых ударов молнии. Они улавливают и отводят ток молнии на землю. Принцип работы основан на защитной зоне, определяемой конструкцией, расположенной выше всех остальных конструкций.

Этот принцип применяется к любому молниеприемнику (мачтовое сооружение, здание или очень высокая металлическая конструкция).

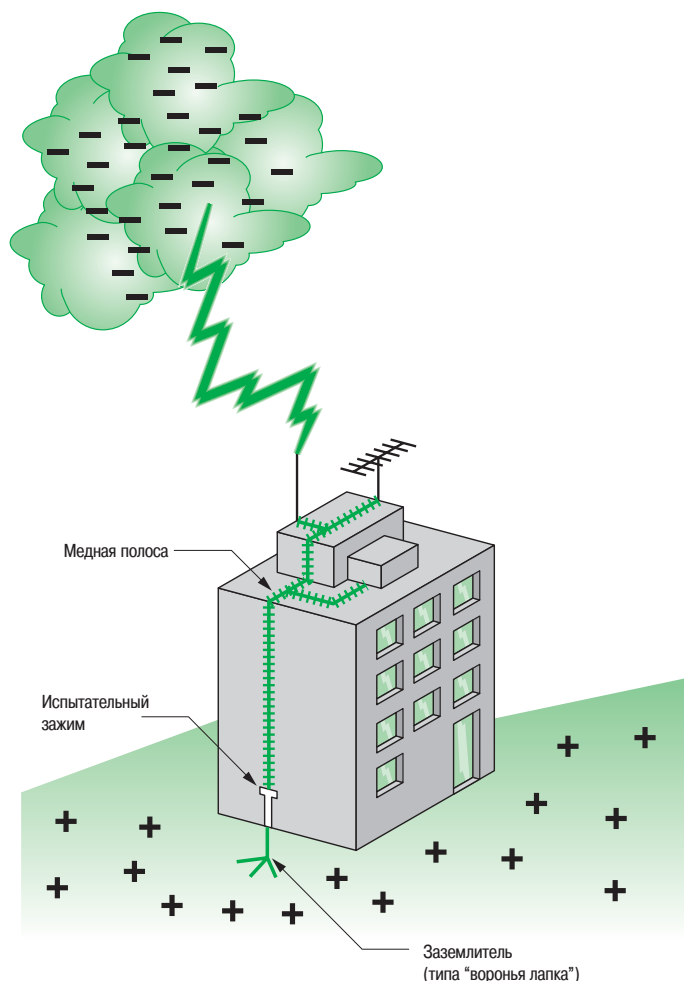
Существуют три типа первичной защиты:

- Стержневые молниеотводы, самые старые и известные устройства молниезащиты.
- Тросовые молниеотводы.
- Сетка или клетка Фарадея.

#### Стержневой молниеотвод

Молниеотвод представляет собой конусообразный стержень, расположенный наверху здания.

Он заземляется одним или несколькими проводниками-токоотводами (часто это медные полосы) (см. [рис. J8](#)).



**Рис. J8:** Пример защиты с помощью молниеотвода

## 2 Устройства защиты от перенапряжений

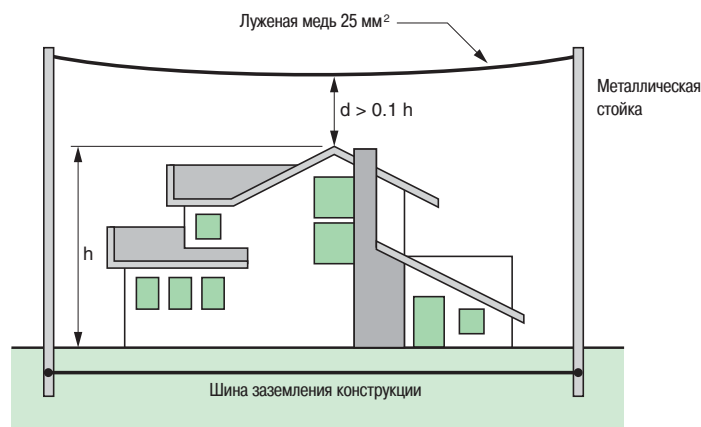
Проектирование и монтаж молниеотвода - это задача, которой должны заниматься специалисты.

При этом необходимо обеспечить соответствующее расположение проводников-токоотводов (медных полос), испытательных зажимов и заземляющих электродов для отвода высокочастотных токов молнии на землю, а также расстояния их относительно систем электропроводки, газо-, водоснабжения и т.д.

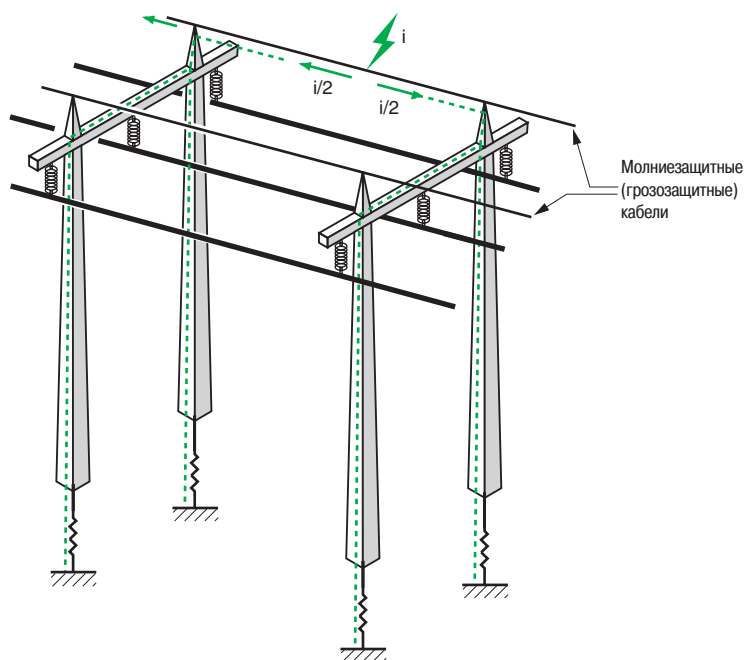
Кроме того, отвод тока молнии на землю индуцирует перенапряжения (из-за электромагнитного излучения) в защищаемых электрических цепях и сооружениях. Такие перенапряжения могут достигать нескольких десятков киловольт. Поэтому, необходимо симметрично развести токи вниз по двум, четырем или более проводникам токоотвода для минимизации электромагнитных эффектов.

### Тросовый молниеотвод

Трос натягивается над защищаемым сооружением (см. **рис. J9**). Этот метод применяется для специальных сооружений: площадки для запуска ракет, оборонные объекты и молниезащитные (грозозащитные) тросы для воздушных высоковольтных линий электропередачи (см. **рис. J10**).



**Рис. J9:** Пример защиты с помощью тросовых молниеотводов



**Рис. J10:** Молниезащитные (грозозащитные) кабели

J7

Устройства первичной защиты, такие как сетка или тросовый молниеотвод, применяются для защиты от прямых ударов молнии. Такие устройства не предотвращают разрушительное вторичное воздействие на оборудование (например, от повышенный потенциала земли и электромагнитной индукции из-за прохождения токов на землю). Для ограничения вторичных эффектов в телефонных и электрических сетях необходимо дополнительно использовать низковольтные разрядники.

### Сетка (клетка Фарадея)

Этот принцип применяется для защиты зданий, в которых размещается компьютерное оборудование или оборудование для производства интегральных схем (микрочипов). Он заключается в разветвлении ряда вертикальных токоотводов снаружи здания. Горизонтальные связи (обвязки) добавляются в случае высотных зданий; например, через каждые два этажа (см. **рис. J11**). Вертикальные токоотводы заземляются заземлителем (заземляющим устройством) типа "воронья лапка". В результате получается сетка с ячейками 10 x 15 м или 10 x 10 м. Это позволяет обеспечить эквипотенциальное соединение конструктивных элементов здания и развести токи молнии, что значительно снижает электромагнитные поля и индукцию.

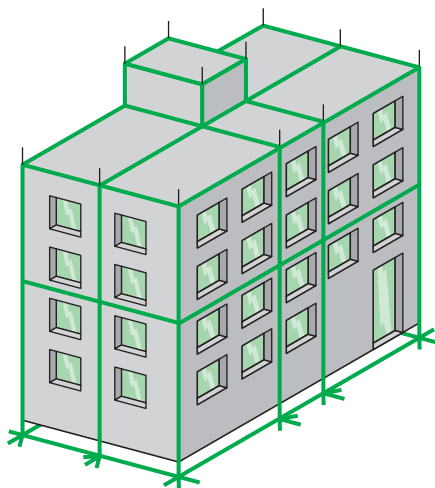


Рис. J11: Пример защиты по принципу сетки (клетки Фарадея)

## 2.2 Устройства вторичной защиты (молниезащита внутреннего оборудования)

Это устройства защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений или перенапряжений промышленной частоты. Они могут классифицироваться по способу их присоединения в установке: последовательное или параллельное.

### Устройство последовательной защиты

Это устройство с последовательным подсоединением к питающим проводам защищаемой системы (см. **рис. J12**).

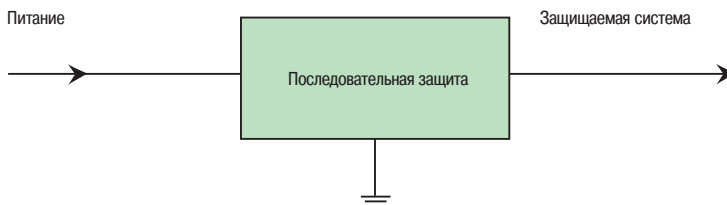


Рис. J12: Принцип последовательной защиты

### Трансформаторы

Ограничивают перенапряжения за счет индуктивного эффекта и устраняют определенные гармоники за счет соответствующего соединения первичной и вторичной обмоток. Данная защита не очень эффективна.

### Фильтры

Основанные на таких компонентах, как сопротивления, катушки индуктивности и конденсаторы служат для ограничения коммутационных перенапряжений в четко заданном диапазоне частот. Такие устройства не предназначены для ограничения атмосферных перенапряжений.

## 2 Устройства защиты от перенапряжений

### Ограничители перенапряжений

Состоят главным образом из воздушных (без сердечников) катушек индуктивности, ограничивающих перенапряжения, и разрядников, отводящих токи. Наиболее подходят для защиты чувствительного электронного и компьютерного оборудования, но защищают только от перенапряжений. К сожалению, это громоздкие и дорогостоящие устройства.

### Сетевые кондиционеры и статические источники бесперебойного питания (UPS)

Эти устройства применяются главным образом для защиты чувствительного оборудования, такого как компьютерное оборудование, требующее электропитания высокого качества. Они могут использоваться для регулирования напряжения и частоты, подавления помех и обеспечения бесперебойного питания даже в случае отключения сетевого питания (UPS). С другой стороны, они не защищены от сильных атмосферных перенапряжений и требуют использования разрядников.

### Устройство параллельной защиты

#### Принцип

Устройство параллельной защиты может использоваться в установках любой мощности (см. [рис. J13](#)).

Это наиболее широко применяемый тип устройств защиты от перенапряжений.

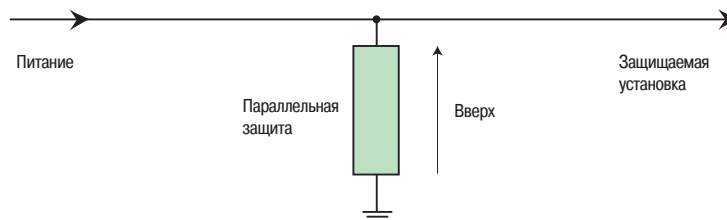


Рис. J13: Принцип параллельной защиты

#### Основные характеристики

- Номинальное напряжение устройства защиты должно соответствовать сетевому напряжению на вводах установки.
- При отсутствии перенапряжения ток утечки не должен протекать через устройство защиты в режиме «ожидания».
- При перенапряжении выше допустимого порогового значения для защищаемой установки устройство защиты должно быстро отводить ток, вызванный перенапряжением на землю, ограничивая напряжение необходимым верхним уровнем защиты ([рис. J14](#)).

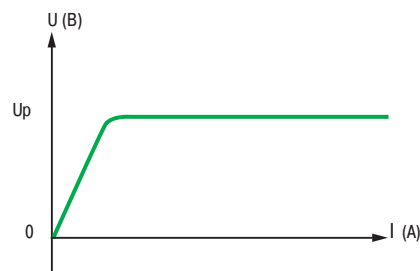


Рис. J14: Типовая вольт-амперная характеристика идеального устройства защиты

После устранения перенапряжения устройство защиты прекращает проводить ток и возвращается в ждущий нетокопроводящий режим. Ниже описывается идеальная вольт-амперная характеристика:

- Время реакции устройства защиты ( $t_r$ ) должно быть как можно более коротким для быстрой защиты объекта.
- Устройство защиты должно быть способно проводить энергию, вызванную предсказанным перенапряжением на защищаемом объекте.
- Устройство защиты от перенапряжений должно быть рассчитано на входной номинальный ток  $I_n$ .



## 2 Устройства защиты от перенапряжений

### Применяемые устройства

#### ■ Ограничители перенапряжения

Применяются на понижающих подстанциях (высокого/низкого) напряжения (ВН/НН) на выходах трансформаторов при системе заземления IT. Поскольку используются только в схемах с изолированной или заземленной через сопротивление нейтралью, они могут отводить перенапряжения на землю, особенно перенапряжения промышленной частоты (см. **рис. J15**).

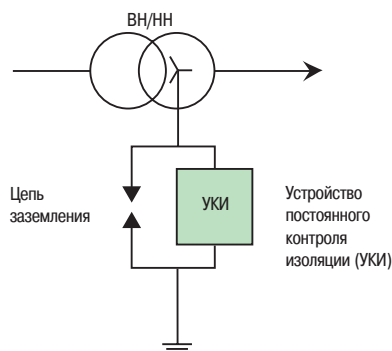


Рис. J15: Ограничитель перенапряжений

#### ■ Низковольтные ограничители перенапряжений

Этот термин обозначает различные устройства (по технологии и назначению). Низковольтные ограничители перенапряжений представляют собой модули, устанавливаемые внутри низковольтного распределительного щита. Существуют также сменные ограничители перенапряжений и ограничители перенапряжений для защиты силовых розеток. Они обеспечивают вторичную защиту подключенного к силовым розеткам оборудования. Некоторые ограничители встраиваются в различные устройства, потребляющие электроэнергию, хотя не могут защитить от больших перенапряжений.

#### ■ Слаботочные разрядники или устройства защиты от перенапряжений

Защищают телефонные или коммутационные сети от перенапряжений из-за внешних (молния) и внутренних причин (помехи, вызываемые работой другого оборудования, коммутационные перенапряжения и т.д.).

Слаботочные ограничители перенапряжений также устанавливаются в распределительных щитах или встраиваются в различные устройства, потребляющие электроэнергию.

## 3 Стандарты

### 3.1 Описание устройств защиты от перенапряжений

Устройство защиты от перенапряжений (УЗИП) служит для ограничения переходных перенапряжений и отвода импульсов тока на землю для снижения амплитуды перенапряжения до уровня, безопасного для электрических установок и оборудования.

Устройства защиты от перенапряжений включают один или несколько нелинейных компонентов. Устройство защиты от перенапряжений устраняет перенапряжения:

- Несимметричный (синфазный) режим: фаза - земля и нейтраль - земля
- Симметричный (дифференциальный) режим: фаза - фаза или фаза - нейтраль

При превышении перенапряжением пороговой величины  $U_c$  устройство защиты от перенапряжений отводит энергию на землю в несимметричном (синфазном) режиме. При симметричном (дифференциальном) режиме отводимая энергия направляется на другой активный проводник.

Устройство защиты от перенапряжений имеет встроенную тепловую защиту, которая обеспечивает защиту от выгорания в конце срока службы. Постепенно, со временем после нескольких перенапряжений устройство защиты от перенапряжений становится проводящим устройством. Индикатор информирует пользователя о завершении срока службы.

Некоторые устройства защиты от перенапряжений обеспечиваются дистанционной индикацией.

Кроме того, обеспечивается защита от КЗ посредством внешнего выключателя.

### 3.2 Нормы для устройств защиты от перенапряжений

#### Международный стандарт МЭК 61643-1, Изд. 02/2005

Для устройств защиты от перенапряжений (УЗИП), используемых в низковольтных распределительных сетях, определены три класса испытаний:

- Испытания класса I: Эти испытания проводятся при номинальном разрядном токе ( $I_n$ ), импульсе напряжения с формой волны 1.2/50 мкс и импульсном токе  $I_{imp}$ .
- Устройства, подлежащие испытаниям класса I, рекомендуются, как правило, для объектов в местах интенсивных воздействий, например, вводы линий в здания с системами молниезащиты.
- Испытания класса II: Эти испытания проводятся при номинальном разрядном токе ( $I_n$ ) и импульсе напряжения с формой волны 1.2/50 мкс.
- Испытания класса III: Эти испытания проводятся при комбинированной форме волны (1.2/50 и 8/20 мкс).

УЗИП, подлежащие испытаниям класса II или III, подвергаются воздействию импульсов меньшей длительности. Как правило, эти устройства рекомендуются для объектов, подверженных меньшим воздействиям. Эти три класса испытаний не являются унифицированными и зависят от страны с ее специальными требованиями. Каждая строительная организация может ссылаться на один из 3 классов испытаний.

#### Европейский стандарт EN 61643-11 2002

Включает определенные требования по стандарту МЭК 61643-1. Кроме того, устройства УЗИП подразделяются на три класса:

- Тип 1: УЗИП, испытанные по классу I
- Тип 2: УЗИП, испытанные по классу II
- Тип 3: УЗИП, испытанные по классу III

### 3.3 Характеристики устройств защиты от перенапряжений согласно стандарту МЭК 61643-1

■ **УЗИП:** Устройство, которое служит для ограничения переходных перенапряжений и пиков тока. Оно включает как минимум один нелинейный компонент.

■ **Классы испытаний:** Классификация испытаний разрядников для защиты от грозových перенапряжений.

■  **$I_n$ :** Номинальный разрядный ток: пиковое значение тока, протекающего через УЗИП с формой волны 8/20. Используется для испытаний УЗИП по классу II, а также в качестве предварительного условия для испытаний по классу I.

■  **$I_{max}$ :** Максимальный разрядный ток для испытания по классу II: пиковое значение тока, протекающего через УЗИП с формой волны 8/20 и амплитудой согласно испытаниям класса II.  $I_{max}$  больше чем  $I_n$ .

■  **$I_c$ :** Длительный рабочий ток; ток, протекающий через УЗИП при постоянном полном выдерживаемом рабочем напряжении ( $U_c$ ) в каждом режиме.  $I_c$  соответствует сумме токов через защитный элемент УЗИП и во всех внутренних цепях с параллельным соединением.

■ **limp**: Импульсный ток; определяется пиковым током  $I_{peak}$  и зарядом  $Q$ . Испытание на этот ток проводится при рабочей нагрузке. Используется для испытаний УЗИП по классу I.

■ **Un**: Номинальное напряжение сети.

■ **Uc**: Максимальное длительное рабочее напряжение; максимальное напряжение действующего значения переменного или постоянного тока, которое длительно подается на выводы УЗИП. Равно номинальному напряжению.

■ **Up**: Уровень напряжения защиты; параметр, характеризующий УЗИП в части ограничения напряжения на его выводах, который выбран из числа предпочтительных значений. Данное значение должно быть выше наибольшего из измеренных ограниченных перенапряжений.

Типовые значения для сети **230/400 В: 1 кВ – 1,2 кВ – 1,5 кВ – 1,8 кВ – 2 кВ – 2,5 кВ.**

■ **Ures**: Остаточное напряжение; пиковое напряжение на выводах УЗИП, возникающее из-за прохождения разрядного тока.

УЗП определяется параметрами  $U_c$ ,  $U_p$ ,  $I_n$  и  $I_{max}$  (см. **Рис. Ж 16**)

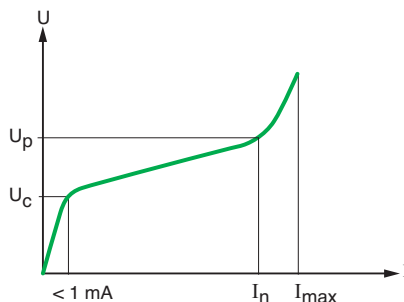
■ Для испытаний грозозащитного разрядника, в каждой стране определены стандартные волны напряжения и тока:

□ Волна напряжения

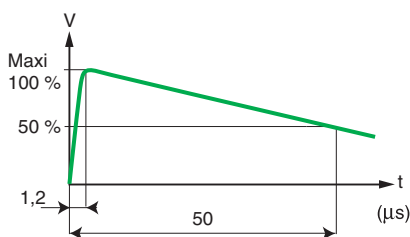
Например, 1.2/50 мкс (см. **Рис. Ж 17**)

□ Волна тока

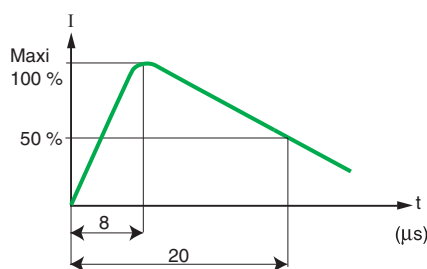
Например, 8/20 мкс (см. **Рис. Ж 18**)



**Рис. Ж16** : Вольтамперная характеристика



**Рис. Ж17** : Волна 1.2/50 мкс



**Рис. Ж18** : Волна 8/20 мкс

□ Другие волновые характеристики:

4/10 мкс, 10/1000 мкс, 30/60 мкс, 10/350 мкс...

Для получения правильных результатов сравнение различных устройств защиты от перенапряжений должно проводиться на основе одинаковых волновых характеристик.

## 3.4 Нормы молниезащиты

Нормы МЭК 62305 (разделы 1 - 5) являются измененным и обновленным вариантом норм МЭК 61024, МЭК 61312 и МЭК 61663.

Необходимость защиты, экономические преимущества от установки устройств защиты и соответствующие устройства защиты должны определяться с учетом факторов риска. Факторы риска определяются нормами МЭК 62305-2.

Критерии проектирования, монтажа и техобслуживания учитываются для трех отдельных групп:

■ Первая группа, включающая меры защиты для минимизации риска ущерба имуществу и вреда здоровью людей, определяется в стандарте МЭК 62305-3.

■ Вторая группа, включающая меры защиты для минимизации отказов электрических и электронных систем, определяется в стандарте МЭК 62305-4.

■ Третья группа, включающая меры защиты для минимизации риска ущерба имуществу и отказов инженерных сетей (в основном электрические и телекоммуникационные линии) определяется в стандарте МЭК 62305-5.

## 3.5 Нормы установки грозозащитных разрядников

■ **Международный стандарт: МЭК 61643-12, Принципы выбора и применения**

■ **Международный стандарт: МЭК 60364, Электроустановки зданий**

□ **МЭК 60364-4-443:** Защита для обеспечения безопасности

Если установка запитывается от воздушной линии или включает такую линию, должно предусматриваться устройство защиты от атмосферных перенапряжений, если грозовой уровень для рассматриваемого объекта соответствует классу внешних воздействий AQ 1 (более 25 дней с грозами в год).

□ **МЭК 60364-4-443-4:** Выбор оборудования установки.

Этот раздел помогает в выборе уровня защиты  $U_p$  для грозозащитного разрядника в зависимости от защищаемых нагрузок.

Номинальное остаточное напряжение устройств защиты не должно превышать выдерживаемого импульсного напряжения класса II (см. **Рис. J19**):

J13

Ном. напряжение установки <sup>(1)</sup> , В		Требуемое выдерживаемое импульсное напряжение, кВ			
3-фазные системы <sup>(2)</sup>	1-фазные системы со средней точкой	Оборудование источника питания (категория выдерживаемого импульсного напряжения IV)	Оборудование распределительных и оконечных цепей (категория выдерживаемого импульс. напряжения III)	Электроприемники (категория выдерживаемого импульсного напряжения II)	Оборудование, требующее спец. защиты (категория выдерживаемого импульсного напряжения I)
	120-240	4	2.5	1.5	0.8
230/400 <sup>(2)</sup>	-	6	4	2.5	1.5
277/480 <sup>(2)</sup>	-	8	6	4	2.5
400/690	-	8	6	4	2.5
1,000	-	Значения подлежат определению инженерами			

**Рис. J19 :** Выбор оборудования для установки по МЭК 60364

(1) По МЭК 60038

(2) В Канаде и США в случае напряжений относительно земли выше 300В, применяется выдерживаемое импульсное напряжение, соответствующее следующему по возрастанию напряжению в столбце.

□ МЭК 60364-5-534: Выбор и внедрение электрооборудования  
Этот раздел описывает условия монтажа грозозащитных разрядников:  
- В зависимости от системы заземления: Максимальное длительное рабочее напряжение  $U_c$  УЗИП должно быть не менее указываемого на **Рис. J20**.

УЗП, подсоединяемые между	Система заземления распределительной сети				
	TT	TN-C	TN-S	IT с распредел. нейтралью	IT без распредел. нейтрали
Линейный проводник и нейтраль	1.1 $U_o$	NA	1.1 $U_o$	1.1 $U_o$	NA
Каждый линейный проводник и проводник PE	1.1 $U_o$	NA	1.1 $U_o$	$\sqrt{3} U_o^{(1)}$	Линейное напряжение
Нейтраль и проводник PE	$U_o^{(1)}$	NA	$U_o^{(1)}$	$U_o^{(1)}$	NA
Каждый линейный проводник и проводник PEN	NA	1.1 $U_o$	NA	NA	NA

ПРИМЕЧАНИЕ 1:  $U_o$  – напряжение «фаза-нейтраль» для низковольтной системы.  
ПРИМЕЧАНИЕ 2: Эта таблица основана на стандарте МЭК 61643-1, Приложение 1.

**Рис. J20** : Минимальное требуемое значение  $U_c$  для УЗИП в зависимости от системы заземления сети.

J14

- **На вводе установки:** Если разрядник устанавливается на вводе электроустановки с питанием от распределительной сети общего пользования, его номинальный разрядный ток может быть ниже 5 кА. Если разрядник устанавливается за устройством защиты от замыкания на землю, должно использоваться устройство УЗО типа S с устойчивостью к импульсным токам не менее 3 кА (8/20 мкс).

- **Защита от перенапряжений при 50 Гц и последствий КЗ устройства УЗИП:**  
защита от коротких замыканий в УЗИП обеспечивается устройствами защиты от сверхтока, которые должны выбираться в соответствии с максимальной мощностью устройства защиты от перенапряжений, указанной в инструкциях изготовителя УЗИП.

- **При наличии молниеотводов:** Должен устанавливаться грозозащитный разрядник; необходимо учитывать дополнительные технические требования к грозозащитным разрядникам (см. МЭК 62305, Раздел 4).

(1) Эти значения приводятся для наихудших повреждений; поэтому, допуск 10% не учитывается.

## 4 Выбор защитной аппаратуры

При установке грозозащитных разрядников необходимо учитывать следующие факторы:

- Каскадирование
- Положение относительно УЗО
- Выбор автоматических выключателей

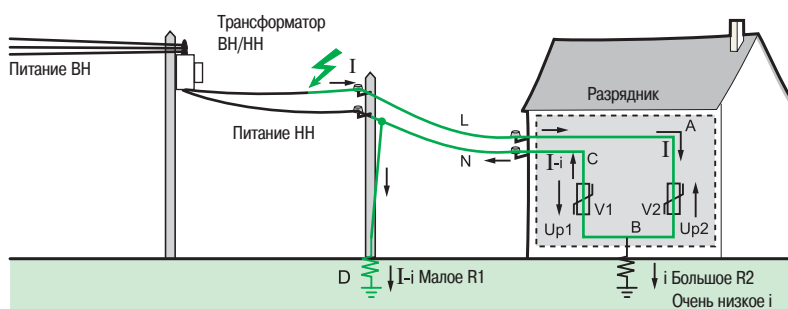
Необходимо также учитывать систему заземления.

### 4.1 Устройства защиты в зависимости от системы заземления

■ Несимметричные (синфазные) перенапряжения: Основная защита включает установку симметричных грозозащитных разрядников между фазой и проводником РЕ или фазой и проводником PEN в зависимости от типа используемой системы заземления.

■ Симметричные (дифференциальные) перенапряжения: В системах заземления ТТ и TN-S эти перенапряжения возникают из-за неодинаковости сопротивлений заземляющих устройств нейтрали при дифференциальном включении. При этом перенапряжение, вызванные ударом молнии, является несимметричным (синфазным).

Например, рассмотрим систему заземления ТТ. Двухполюсной грозозащитный разрядник установлен в несимметричном (синфазном) режиме для защиты установки (см. **Рис. J21**).



**Рис. J21** : Защита только в несимметричном (синфазном) режиме

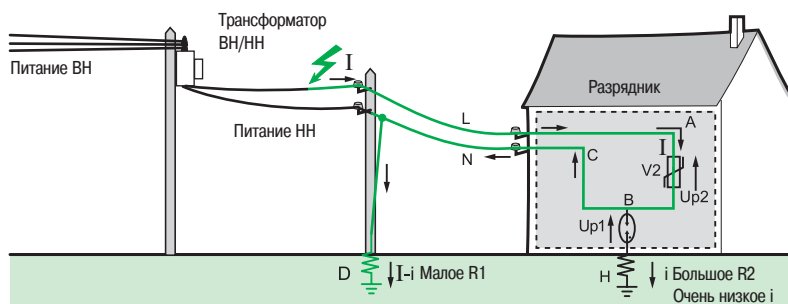
Резистор заземления нейтрали  $R_1$ , используемый для опор линии электропередач, имеет меньшее сопротивление, чем резистор  $R_2$ , используемый для электроустановки. Ток молнии протекает через цепь ABCD по пути наименьшего сопротивления. Он проходит через последовательные варисторы  $V_1$  и  $V_2$ , вызывая несимметричное напряжение, равное в экстремальных случаях удвоенному остаточному напряжению грозозащитного разрядника ( $U_{p1} + U_{p2}$ ) на зажимах А и С на вводе установки.

Чтобы обеспечить эффективную защиту между Ph и N, необходимо снизить дифференциальное напряжение (между А и С).

Поэтому, используется другая система заземления (см. **Рис. J22**).

Ток молнии протекает через цепь АВН с меньшим полным сопротивлением, чем цепь ABCD в силу нулевого сопротивления компонента между В и Н (газовый разрядник).

В этом случае дифференциальное напряжение равно остаточному напряжению грозозащитного разрядника ( $U_{p2}$ ).



**Рис. J22** : Защита в симметричном и несимметричном режиме

Режим	Между	ТТ	TN-S	TN-C	IT
Дифференциальный	фаза и нейтраль	да	да	-	-
Несимметричный (синфазный)	Фаза и земля	да	да	да	да
	Нейтраль и земля	да	да	-	да (если распределенная нейтраль)

Рис. J23 : Соединения в зависимости от используемой системы заземления в случае атмосферных перенапряжений

4.2 Внутренняя архитектура грозозащитных разрядников

- Грозозащитные разрядники 2P, 3P, 4P (см. Рис. J24):
- Обеспечивают только защиту от несимметричных перенапряжений
- Подходят для систем заземления TN-C и IT.

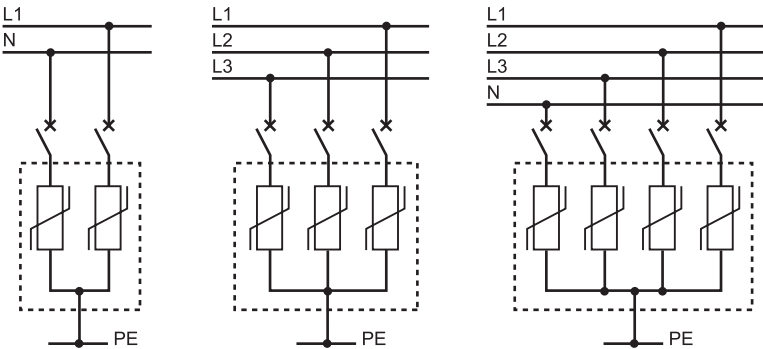


Рис. J24 : Грозозащитные разрядники 2P, 3P, 4P

- Грозозащитные разрядники (см. Рис. J25):
- Обеспечивают защиту от симметричных и несимметричных перенапряжений
- Подходят для систем заземления ТТ, TN-S и IT.

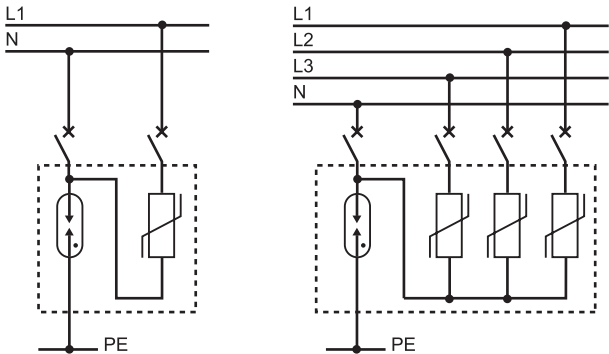


Рис. J25 : Грозозащитные разрядники 1P+N, 3P+N

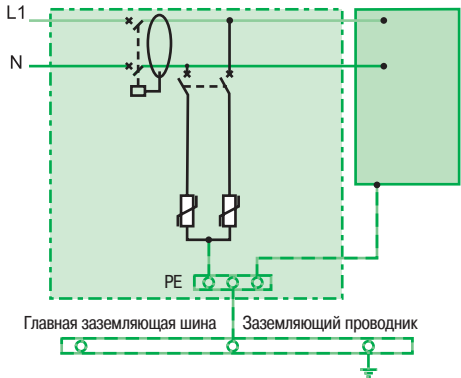


Рис. J26 : Пример соединений

- Однополюсные грозозащитные разрядники (1P) (см. Рис. J26):
- Используются для различных установок (согласно инструкциям изготовителя). Требуется определение размеров для защиты N - PE (например, 1+N и 3P+N)
- Блок подлежит испытаниям по стандарту EN 61643-11.

При каскадной защите требуется минимальный интервал 10 м между двумя устройствами защиты. Это требование применяется для всех объектов: жилые здания, сфера услуг или промышленность.

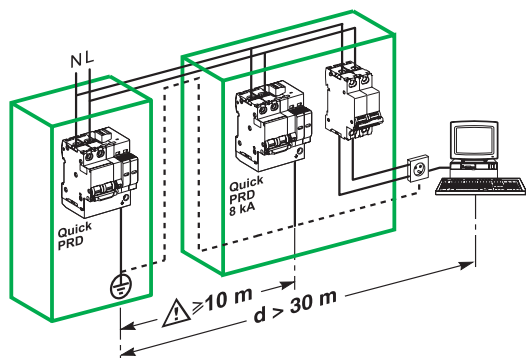


Рис. J27 : Каскадирование разрядников

## 4.3 Правила установки

Анализ защиты установки от перенапряжений может показать, что объект подвержен интенсивным воздействиям и оборудование, требующее защиты, является чувствительным к таким воздействиям. Грозозащитный разрядник должен быть рассчитан на отвод высоких токов и иметь низкий уровень защиты. Такое двойное ограничение может потребовать использования нескольких грозозащитных разрядников. Требуется второй разрядник (см. Рис. J27).

Первое устройство (P1, защита на входе) размещается на входе установки. Он служит для отвода максимального тока на землю при уровне защиты  $U_1=2000\text{В}$  — напряжение, которое может выдерживаться электрооборудованием (контакты, двигатели и т.д.). Второе устройство (конечная защита) размещается на корпусе распределительного устройства как можно ближе к чувствительным ЭП. Оно должно иметь низкую пропускную способность и низкий уровень защиты, т.е. значительно снижать перенапряжения и защищать чувствительные ЭП ( $U_2=1500\text{В}$ ).

### Координация грозозащитных разрядников

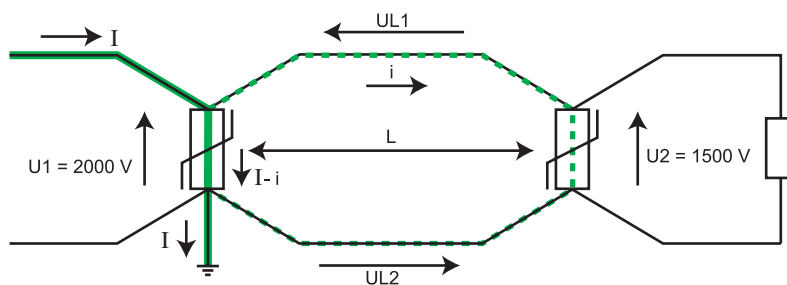


Рис. J28 : Координация грозозащитных разрядников

Устройство конечной защиты P2 устанавливается параллельно с устройством защиты на входе P1. При малом расстоянии L, при перенапряжении на входе устройство P2 с уровнем защиты  $U_2 = 1500\text{В}$  срабатывает до срабатывания устройства P1 с уровнем защиты  $U_1 = 2000\text{В}$ . Устройство P2 не подвергается чрезмерно высоким токам. Требуется координация работы устройств для обеспечения срабатывания устройства P1 до срабатывания устройства P2. Для этого необходимо определить длину кабеля (L), т.е., значение самоиндукции между двумя устройствами защиты. Такая самоиндукция должна блокировать ток на устройство P2 и обеспечивать определенную задержку (срабатывание устройства P1 до срабатывания устройства P2). Метр кабеля обеспечивает самоиндукцию около  $1\mu\text{H}$ .

Правило  $\Delta U = \frac{L di}{dt}$  приводит к падению напряжения около  $100\text{В/м/кА}$ , волна  $8/20\text{ мкс}$ .

При  $L = 10\text{ м}$ , получаем  $UL_1 = UL_2 \approx 1000\text{ В}$ .

Чтобы обеспечить срабатывание устройства P2 с уровнем защиты  $1500\text{В}$ , требуется  $U_1 = UL_1 + UL_2 + U_2 = 1000 + 1000 + 1500\text{ В} = 3500\text{ В}$ .

При этом устройство P1 срабатывает при  $2000\text{В}$  и защищает устройство P2.

**Примечание:** Если расстояние между грозозащитным разрядником на входе установки и защищаемым оборудованием превышает  $30\text{ м}$ , рекомендуется каскадирование грозозащитных разрядников, поскольку остаточное напряжение разрядника может в два раза превышать остаточное напряжение на зажимах разрядника на входе; в примере выше, конечный разрядник должен размещаться как можно ближе к защищаемым ЭП.

Первое правило требует, чтобы расстояние между грозозащитным разрядником и его выключателем не превышало  $50\text{ см}$ .



## 4.4 Рекомендации по выбору устройств защиты

1



### Оценка значимости защищаемого оборудования

При оценке значимости оборудования следует учитывать следующее:

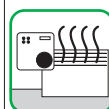
- Стоимость оборудования
- Экономические последствия повреждения оборудования.



- Бытовое оборудование:
  - ☐ аудио-видео аппаратура, компьютеры
  - ☐ бытовые приборы
  - ☐ охранная сигнализация.



- Чувствительное оборудование:
  - ☐ охранная сигнализация
  - ☐ пожарная сигнализация
  - ☐ контроль доступа
  - ☐ видеонаблюдение.



- Оборудование здания:
  - ☐ автоматизированное отопление или кондиционирование воздуха.
  - ☐ лифт.



- Производственное оборудование:
  - ☐ станок с ЧПУ
  - ☐ сервер
  - ☐ звукорежиссерская аппаратура.



- Ответственное оборудование:
  - ☐ больницы
  - ☐ производство
  - ☐ компьютерная обработка.

J18

2



### Определение электрической архитектуры зданий

Молниезащита может рассчитываться для всего здания или электрически независимой части здания

В зависимости от размера здания и его внутренней электрической сети, необходимо использовать один или несколько грозозащитных разрядников для распределительных устройств установки.

- Отдельный особняк.
- Двухквартирный дом.
- Коммунальная часть здания.
- Мастерские.
- Здания производственного назначения и сферы услуг:
  - ☐ главный распределительный щит (ГРЩ)
  - ☐ распределительный щит (РЩ)
  - ☐ чувствительное оборудование на расстоянии более 30 м от ГРЩ.

3



### Риск воздействия на объект

Молния воздействует на высокие токопроводящие точки. Например:

- Природная среда: высокие деревья, горы, влажные зоны, железистая почва
  - Сооружения: дымовая труба, воздушная линия, мачта, молниеотвод
- Косвенное воздействие может охватывать зону в радиусе 50 метров.

#### Положение здания



Город или пригород.



В зоне с особыми рисками (мачта, деревья, горы, влажная зона или водоем).


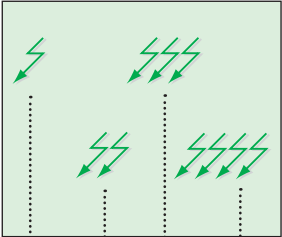
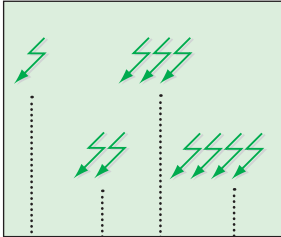


Плоская открытая местность.



Зона особых воздействий (молниеотвод на расстоянии от здания менее 50 м).

# 4 Выбор защитной аппаратуры

<div>1</div> <div>Защищаемое оборудование</div>	<div>Бытовое оборудование</div> <div><div></div><div>Аудио-видео аппаратура, компьютеры, бытовые приборы, охранная сигнализация и т.д.</div></div>		
<div>2</div> <div>Определение архитектуры здания</div>	<div>Отдельный особняк, мастерские</div>	<div>Двухквартирный дом</div>	<div>Коммунальная часть здания</div>
<div>3</div> <div>Степень риска удара молнии</div>	<div></div>		<div></div>
<div>Выбор типа грозозащитного разрядника</div>	<div>Тип 2 10 кА</div> <div>Тип 2 40 кА</div> <div>Тип 1 25 кА + Тип 2 40 кА</div> <div>Тип 1 25 кА + Тип 2 40 кА</div>	<div>Тип 2 10 кА</div>	<div>Тип 2 40 кА</div> <div>Тип 2 65 кА</div> <div>Тип 1 25 кА + Тип 2 40 кА</div> <div>Тип 1 25 кА + Тип 2 40 кА</div>

**Примечание:**

Тип 1: Грозозащитные разрядники с высокой разрядной емкостью, используемые с молниеотводом  и .



Тип 2: Грозозащитные разрядники, используемые в каскадной схеме за разрядником типа 1 или отдельно  и .

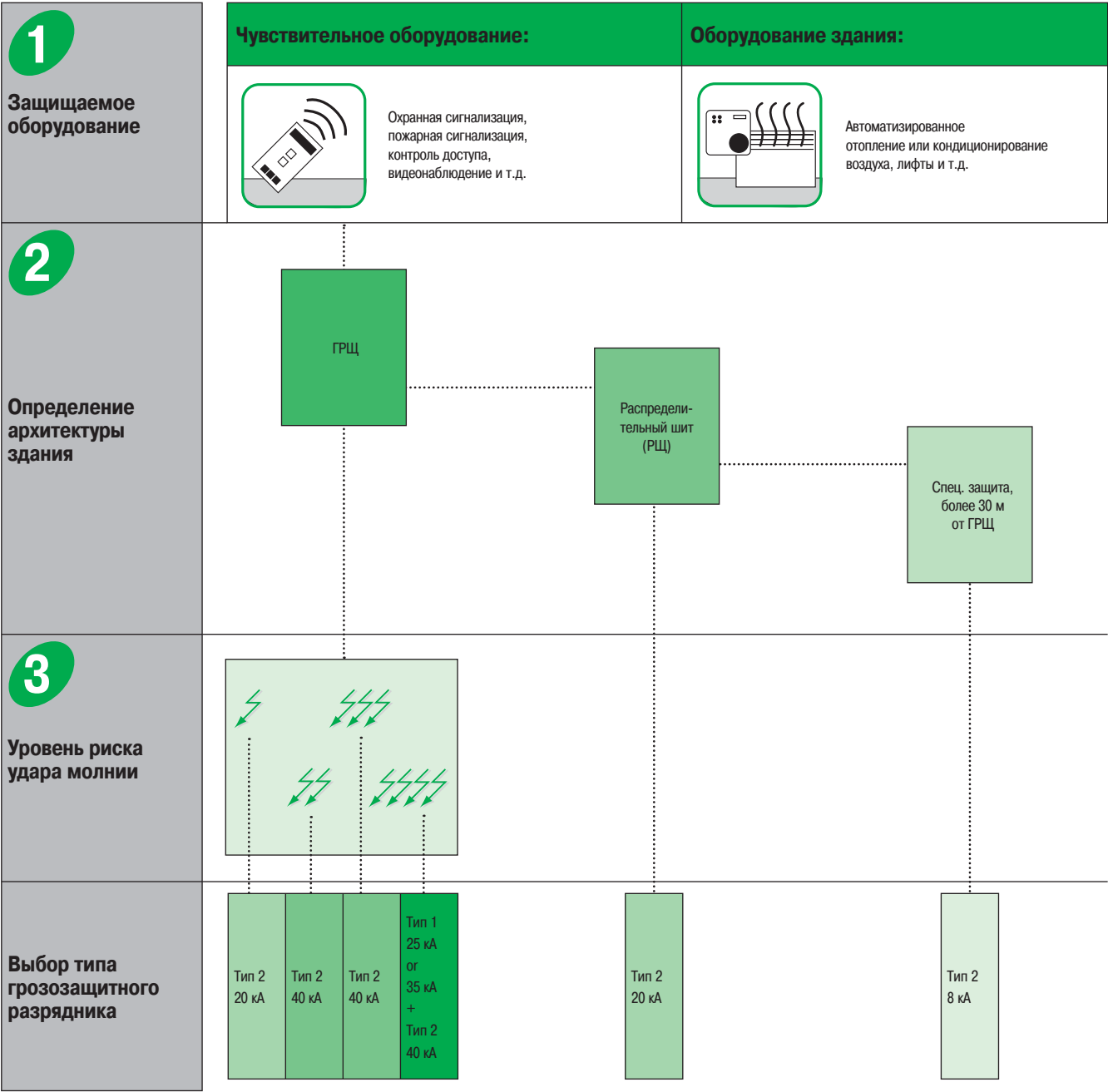
Рис. J32 : Бытовое оборудование

Молния воздействует на телекоммуникационную сеть. Она может повредить все оборудование, подсоединенное к таким сетям.

## Защита телекоммуникационного оборудования

Выбор грозозащитного разрядника	PRC
Аналоговые телефонные сети < 200В	<div></div>

J19







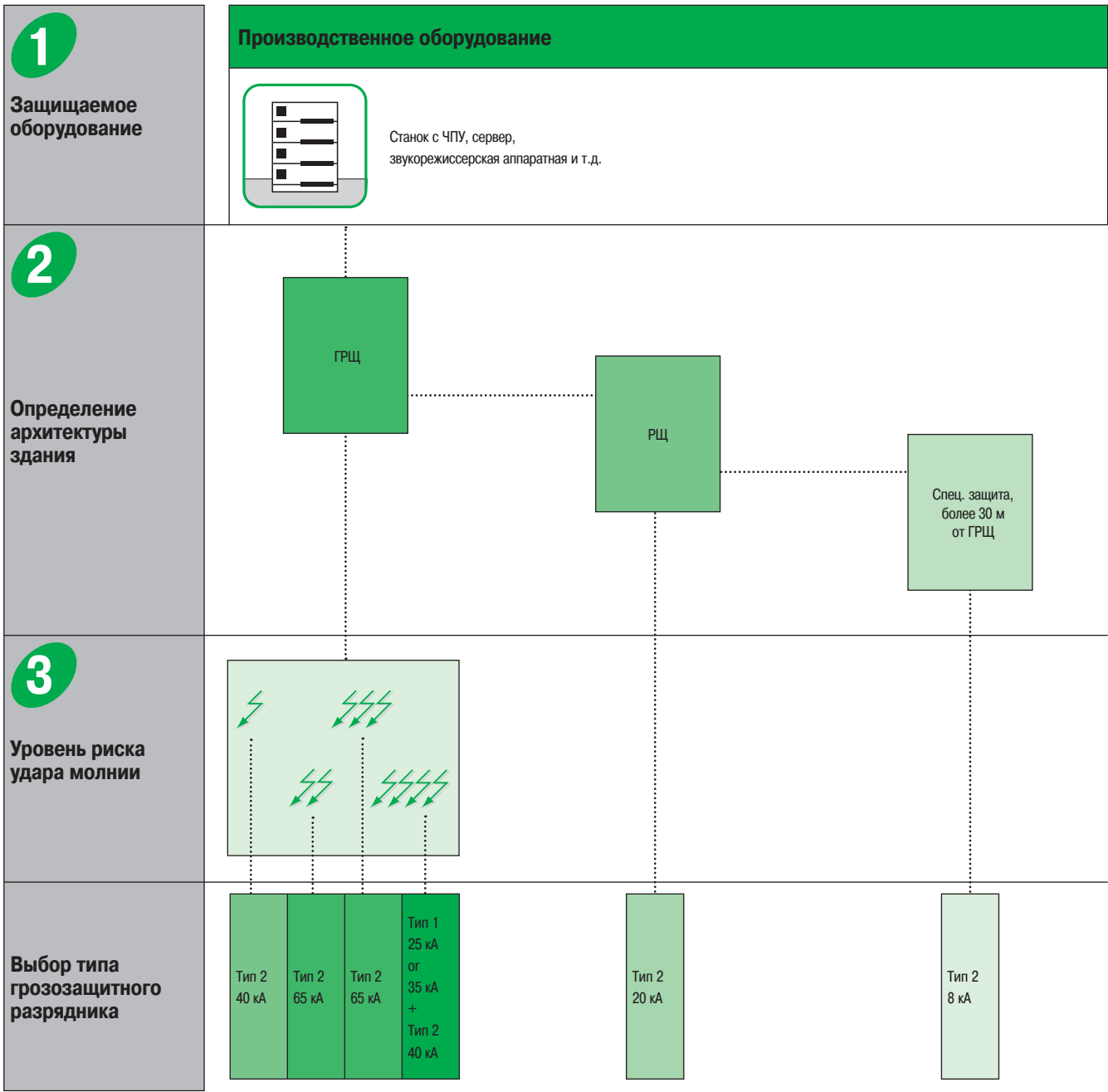
**Примечание:**  
Тип 1: Грозозащитные разрядники с высокой разрядной емкостью, используемые с молниеотводом  и  .  
Тип 2: Грозозащитный разрядник, используемый по каскадной схеме за разрядником типа 1 или отдельно  и  .

Рис. J33 : Чувствительное оборудование, оборудование зданий

# 4 Выбор защитной аппаратуры



**Примечание:**

Тип 1: Грозозащитные разрядники с высокой разрядной емкостью, используемые с молниеотводом  и .



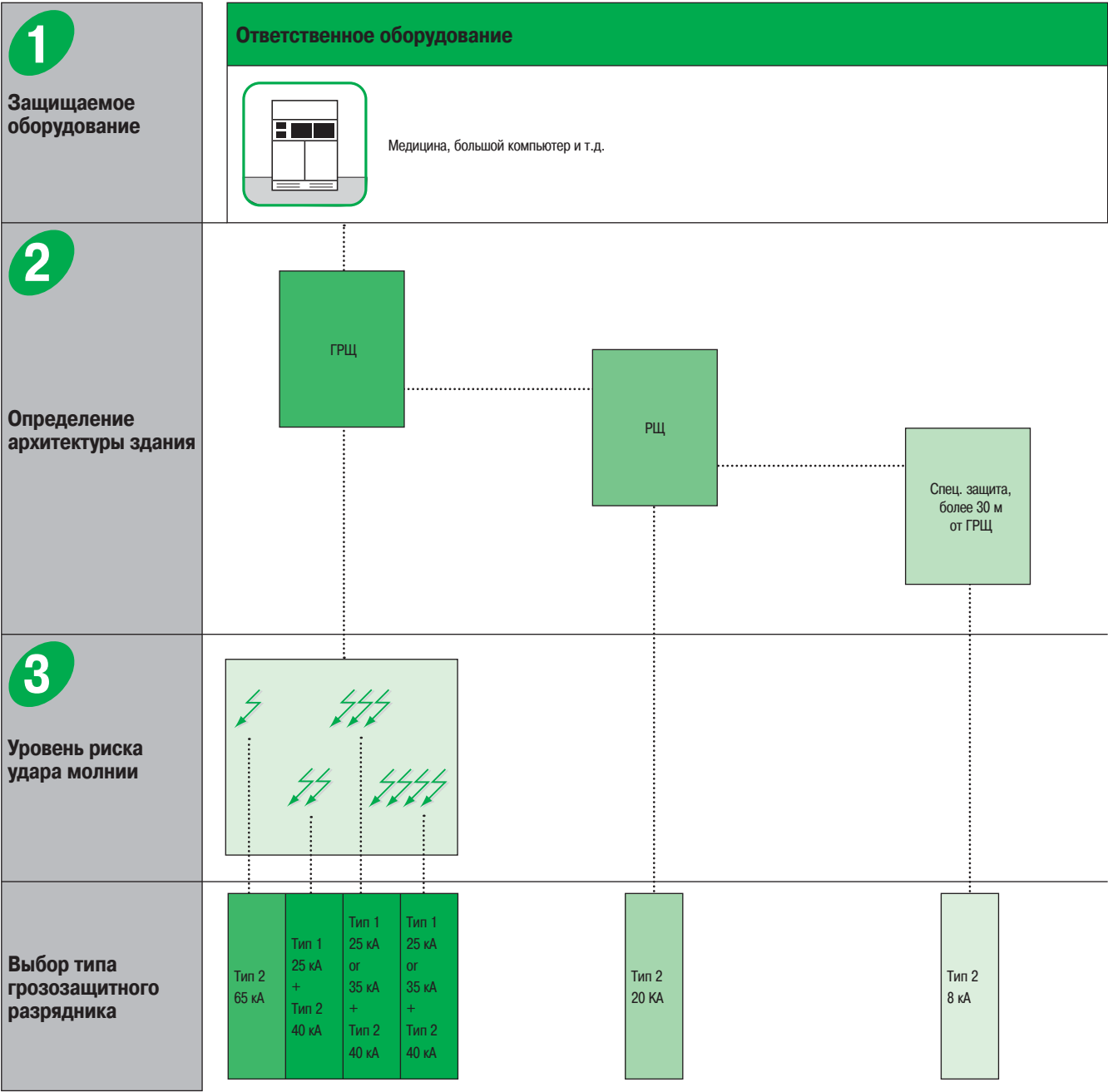
Тип 2: Разрядник, используемый по каскадной схеме за разрядником типа 1  и .

Рис. J34 : Производственное оборудование

J21



## 4.5 Выбор выключателя

### Выключатель необходим для обеспечения безопасности установки

■ Одним из параметров грозозащитного разрядника является максимальный ток ( $I_{max}$ , волна 8/20 мкс), который он может выдерживать без ухудшения работы. При превышении этого тока разрядник необратимо закорачивается и подлежит замене.

Поэтому, ток КЗ должен устраняться посредством внешнего выключателя, установленного перед разрядником.

Выключатель должен обеспечивать полную защиту грозозащитного разрядника, т.е.:

□ Он должен выдерживать стандартные испытательные волны:

- Он не должен срабатывать при 20 импульсах при  $I_n$

- Он должен срабатывать при  $I_{max}$  без повреждения

□ Отключение грозозащитного разрядника при КЗ.

■ Поставляемые грозозащитные разрядники со встроенным выключателем:

□ Combi PRF1

□ Quick PF

□ Quick PRD.

Таблица совместимости грозозащитных разрядников и выключателей

Типы	Isc	Грозозащитные разрядники	6 кА	10 кА	15 кА	25 кА	36 кА	50 кА	70 кА
Тип 1	35 кА <sup>(1)</sup>	PRF1 Master	Плавкий предохранитель NH 160 A gL/gG						
			NS160N 160 A						NS160H 160 A
Тип 2	25 кА <sup>(1)</sup>	PRF1	D125	Плавкий предохранитель NH 125 A gL/gG					
	65 кА <sup>(2)</sup>	PF65, PRD65	C60N 50 A Кривая C	C60H 50 A Кривая C		Обращайтесь к нам			
	40 кА <sup>(2)</sup>	PF40, PRD40	C60N 40 A Кривая C	C60H 40 A Кривая C		Обращайтесь к нам			
	20 кА <sup>(2)</sup>	PF20, PRD20	C60N 25 A Кривая C	C60H 25 A Кривая C		Обращайтесь к нам			
	8 кА <sup>(2)</sup>		C60N 20 A Кривая C	C60H 20 A Кривая C					

Isc: Расчетный ток КЗ в месте установки.

(1)  $I_{imp}$ .

(2)  $I_{max}$ .

Рис. J36 : Совместимость грозозащитного разрядника и выключателя

## 4.6 Индикация завершения срока службы грозозащитного разрядника

Имеются различные устройства индикации для предупреждения пользователя о том, что нагрузки более не защищены от атмосферных перенапряжений.

### Грозозащитный разрядник типа 1 (газовый)

#### PRF1 1P 260 V, Combi 1P+N and 3P+N и PRF1 Master

Эти грозозащитные разрядники имеют световую индикацию нормальной работы устройства. Эта индикаторная лампа требует минимального рабочего напряжения 120В пер. тока.

■ Эта лампа не загорается:

□ если рабочее напряжение < 120В пер. тока

□ если отсутствует сетевое напряжение

□ если неисправна электроника искрового перекрытия.

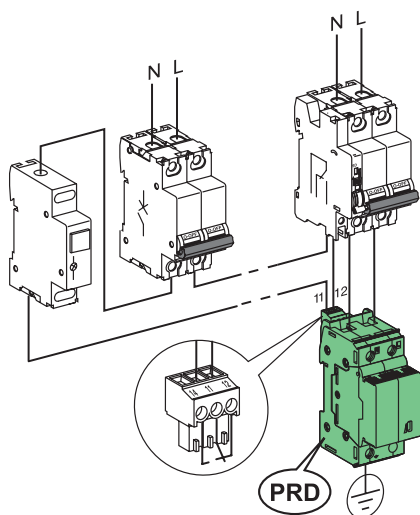


Рис. J37 : Пример индикации PRD

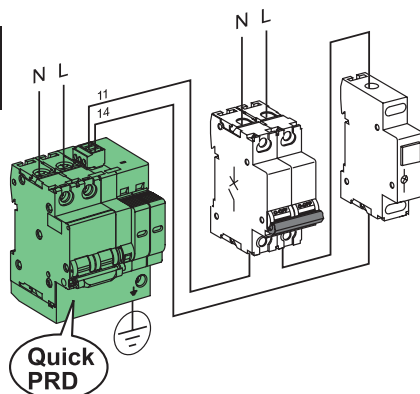


Рис. J39 : Пример индикации Quick PRD

## Грозозащитные разрядники типа 2 (варистор, варистор + газовый разрядник)

### PF, PRD

В конце срока службы грозозащитный разрядник или картридж разрушается

■ Два варианта разрушения:

□ внутреннее разьединение в конце срока службы: накопленные электрические удары приводят к старению варисторов и увеличению тока утечки.

При токе выше 1 мА происходит тепловой пробой и разьединение грозозащитного разрядника.

□ внешнее разьединение в конце срока службы: происходит в случае чрезмерного перенапряжения (прямой удар молнии на линии); выше разрядной емкости грозозащитного разрядника происходит глухое короткое замыкание варисторов на землю (или КЗ между фазой и нейтралью). Такое короткое замыкание устраняется путем отключения выключателем.

### Quick PRD и Quick PF

Независимо от факторов риска для сети питания, устройства Quick PRD и Quick PF включают идеально скоординированный выключатель.

■ На случай удара молнии <  $I_{max}$ , как и все грозозащитные разрядники, они имеют внутреннюю защиту против старения.

■ На случай удара молнии >  $I_{max}$ : Quick PRD и Quick PF обеспечены внутренней защитой посредством их внутреннего выключателя.

■ В случае обрыва нейтрали или изменения полярности «фаза-нейтраль» в сети питания: Quick PRD и Quick PF обеспечены внутренней защитой посредством встроенного выключателя. Для упрощения техобслуживания устройства Quick PRD оснащены местными индикаторами и выдвижными картриджами, механически соединенными с выключателем.

Устройства Quick PRD имеют индикаторные лампы на картриджах и встроенном выключателе для упрощения обслуживания.

Для обеспечения безопасности выключатель размыкается автоматически при снятии картриджа. Он не может включаться до вставки картриджа.

При замене картриджа отказоустойчивая система «фаза-нейтраль» обеспечивает безопасное подсоединение.

### Непрерывное отображение рабочего состояния

Устройство Quick PRD имеет встроенный контакт для передачи данных о рабочем состоянии удаленного грозозащитного разрядника. Устройства контроля грозозащитных разрядников, установленные по всей установке, обеспечивают данные о рабочем состоянии разрядников.

■ Такой контакт обеспечивает сигнализацию:

- в конце срока службы картриджа
- при отсутствии (снятии) картриджа
- при повреждении линии (КЗ, обрыв нейтрали, изменение полярности «фаза-нейтраль»)
- в случае местного ручного управления (опускание ручки).

Устройство PF имеет дополнительный контакт (SR) для передачи данных о рабочем состоянии удаленного грозозащитного разрядника.

## 4.7 Пример применения: супермаркет

### Решения и схема

■ Руководство по выбору грозозащитных разрядников позволяет определить подходящий грозозащитный разрядник на входе установки и согласовать его с выключателем.

■ В случае расположения чувствительных устройств ( $U_{imp} < 1,5 \text{ кВ}$ ) на расстоянии более 30 м от устройства защиты на входе, конечные грозозащитные разрядники должны устанавливаться как можно ближе к ЭП.

■ Для обеспечения бесперебойного обслуживания неотапливаемых помещений: используются УЗО или дифференциальные автоматы типа "si" для предотвращения ложного срабатывания из-за повышения потенциала земли при прохождении молнии.

■ Для защиты от атмосферных перенапряжений:

- необходимо установить грозозащитный разрядник в распределительном устройстве
- необходимо установить конечный грозозащитный разрядник для каждого распределительного устройства (1 и 2), запитывающего чувствительные ЭП, расположенные на расстоянии более 30 м от разрядника на входе установки.
- необходимо установить грозозащитный разрядник для телекоммуникационной сети для защиты запитываемых устройств, например, устройства пожарной сигнализации, модемов, телефонов, факсов.

### Назначение грозозащитного разрядника

- Отведение тока молнии на землю для обеспечения уровня защиты  $U_p$  для защищаемого электрооборудования.
- Ограничение роста потенциала земли и индуцированного электромагнитного поля.

J24

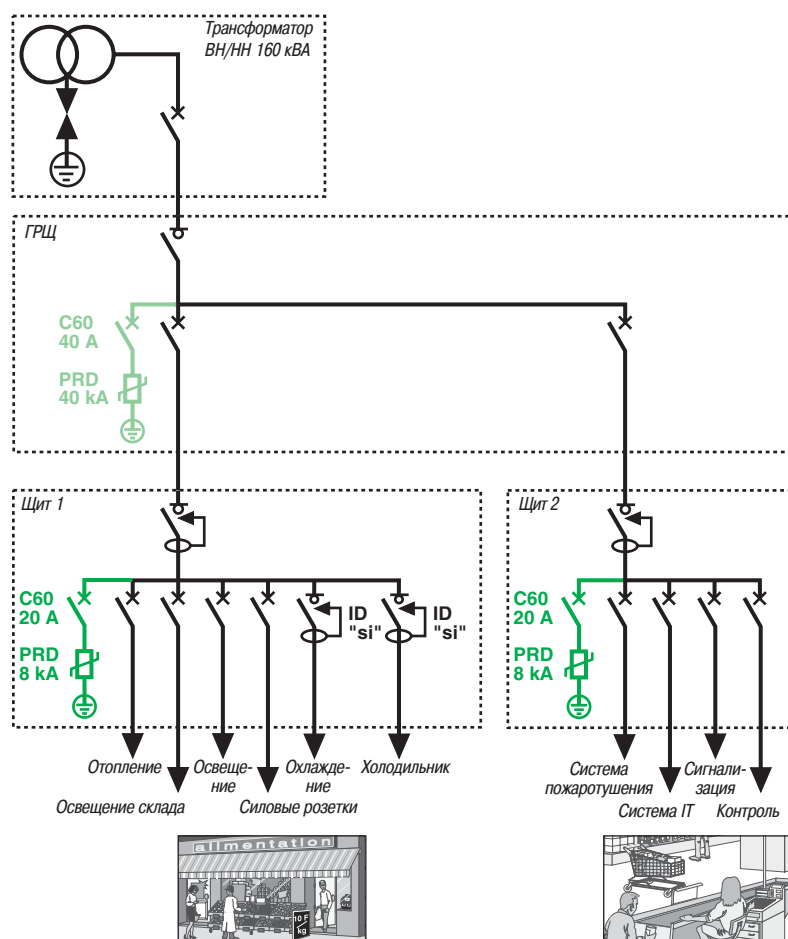


Рис. J39 : Пример применения: супермаркет

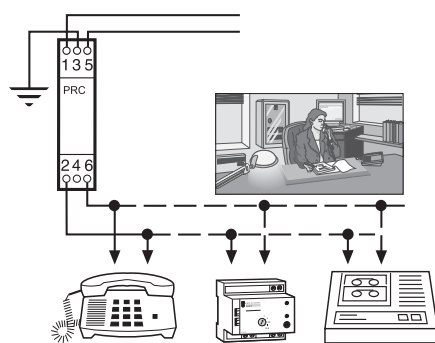


Рис. J40 : Телекоммуникационная сеть

### Рекомендации по разводке кабелей

- Следует обеспечить эквипотенциальность сети заземления в здании.
- Следует, по возможности, исключить петли, образуемые силовыми кабелями.

### Рекомендации по монтажу

- Следует установить грозозащитный разрядник  $I_{\max} = 40 \text{ кА}$  (8/20 мкс) и выключатель C60 с номинальным током 40А.
- Следует установить грозозащитный разрядник на входе  $I_{\max} = 8 \text{ кА}$  (8/20 мкс) и выключатель C60 с номинальным током 20А.





## Глава К

# Энергоэффективность в электрических сетях

### Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>K2</b>
<b>2</b>	<b>Энергоэффективность и электричество</b>	<b>K3</b>
	2.1 Законодательные меры повышения энергоэффективности	K3
	2.2 Как повысить энергоэффективность	K4
<b>3</b>	<b>Диагностика с использованием электрических измерений</b>	<b>K7</b>
	3.1 Получение физических данных	K7
	3.2 Данные электрической сети для реальных целей	K8
	3.3 Построение системы начинается с установки отдельно стоящих решений	K10
<b>4</b>	<b>Решения по энергосбережению</b>	<b>K13</b>
	4.1 Двигатели и их замена	K13
	4.2 Насосы, вентиляторы и двигатели переменной скорости вращения	K14
	4.3 Освещение	K18
	4.4 Стратегия распределения нагрузки по времени	K20
	4.5 Коррекция коэффициента мощности	K22
	4.6 Подавление высокочастотных помех	K22
	4.7 Другие методы энергосбережения	K23
	4.8 Информационная система	K23
	4.9 Таблица решений по энергосбережению	K30
<b>5</b>	<b>Оценка энергосбережения</b>	<b>K31</b>
	5.1 Введение в IPMVP и EVO	K31
	5.2 Принципы и методики оценки сбережения энергии	K31
	5.3 Шесть условий, необходимых для расчета экономии энергии	K32
	5.4 Варианты оценки энергосбережения	K32
	5.5 Основные пункты отчета по энергетическому аудиту	K33
<b>6</b>	<b>От окупаемости проекта к постоянным дивидендам</b>	<b>K34</b>
	6.1 Техническое обслуживание системы мониторинга	K34
	6.2 Информационные сервисы	K35

**K1**

В настоящее время существует целый ряд факторов, заставляющих задуматься о сокращении энергопотребления. Наиболее весомыми из них являются рост цен на энергоносители и растущая социальная сознательность в сфере охраны окружающей среды. В связи с этим правительства некоторых стран вводят законодательные меры, сильно меняющие отношение населения к энергосбережению. Некоторые страны устанавливают цели по снижению потребления энергии и вводят законодательные регуляторы для контроля их выполнения.

На всемирном саммите в Киото в 1997 году была поставлена глобальная задача снижения выбросов парниковых газов. Принятый протокол был ратифицирован 169 странами в декабре 2006 года, что ввело его в силу с февраля 2005 года.

Согласно Киотскому протоколу промышленные страны должны уменьшить их совокупный объем выбросов парниковых газов в атмосферу на 5,2% в 2008-2012 годах относительно значений 1990 года. Если учитывать прогнозы объемов выбросов парниковых газов в атмосферу к 2012 году, без учета договоренностей по Киотскому протоколу, введенные ограничения приведут к уменьшению объемов выбросов на 29%. В Европе общее сокращение объема выбросов парниковых газов должно составить 8%, при этом снижение выбросов CO<sub>2</sub> должно сократиться на 20% к 2020 году.

Из шести парниковых газов, перечисленных в Киотском протоколе, двуокись углерода (CO<sub>2</sub>) является наибольшим по объему выбросов. В основном его выбросы обусловлены генерацией электрической энергии и сжиганием топлива при нагреве.

До 50% выбросов CO<sub>2</sub>, относимых к эксплуатации жилых и коммерческих зданий, происходит из-за потребления электрической энергии. Кроме того, в жилых домах все чаще используются компьютерные и мультимедийные системы, распространяется применение систем принудительной вентиляции и кондиционирования, что приводит к резкому росту потребления электрической энергии, значительно превышающему рост потребления других видов энергии.

Вероятность достижения целей сокращения объемов выбросов убеждением людей использовать энергию рационально и внедрять современные энергосберегающие и энергоэффективные технологии крайне мала. Новые здания занимают менее 2% существующего рынка недвижимости. Если потребление электрической энергии во вновь построенных зданиях будет равно текущим значениям, к 2020 году потребление электрической энергии при эксплуатации зданий будет увеличено на 22%. В случае если строящиеся дома будут потреблять на 50% меньше электроэнергии чем существующие, то к 2020 году потребление электрической энергии увеличится на 18%.

Для сокращения потребления электроэнергии на 20% к 2020 году необходимо выполнение следующих условий:

- Все строящиеся дома должны потреблять на 50% меньше энергии, чем существующие, при той же полезной площади
- Ежегодно необходимо снижать энергопотребление одного из десяти существующих зданий на 30% (см. **рис. К1**).

К настоящему времени 80% зданий, которые будут эксплуатироваться в 2020 году, уже построено. Модернизация существующих зданий и улучшение управления энергоснабжением является наиболее важным фактором, необходимым для достижения целей снижения объема выбросов в атмосферу. В развитых странах в большей части зданий уже проведено улучшение тепловой изоляции, например, создание воздушной прослойки в стенах, утепление и остекление чердачных помещений, что приводит к экономии средств за счет сокращения энергопотребления.

Мероприятия по энергосбережению в существующих зданиях и сооружениях должны быть выполнены для достижения поставленных на ближайшие годы целей по снижению объема выбросов парниковых газов. Для этого правительства стран вводят новые законы. Стало ясно, что в ближайшем будущем будут вводиться новые законодательные меры, касающиеся всех сфер энергопотребления, включая эксплуатацию существующих зданий и, конечно, промышленность.

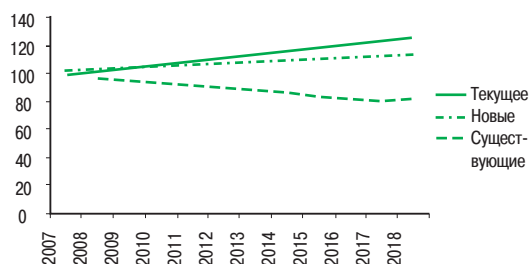
В то же время, в связи с истощением энергоресурсов на планете, растут цены на энергию, а электрическая инфраструктура некоторых стран практически не справляется с удовлетворением резко растущего потребления электроэнергии.

Современные технологии позволяют увеличить энергоэффективность в различных областях деятельности человека — от снижения потребления электроэнергии до более эффективного использования других видов энергии. Жесткий регулирующий контроль может потребоваться для того, чтобы убедиться в возможности использования этих технологий для достижения поставленных целей к 2020 году.

Промышленность, бизнес и правительства стран должны задуматься и сделать повышение энергоэффективности своей основной целью. В противном случае, поставленных задач уменьшения загрязнения атмосферы будет невозможно достичь.

**Основная мысль, которую надо усвоить, что те, кто не бережет энергию сейчас, будут вынуждены сделать это в будущем под давлением законов.**

K2



Необходима модернизация не менее 10% существующих зданий ежегодно для достижения снижения объема выбросов менее чем на 20%

Модернизация обеспечивает 70% экономии энергии  
Новые здания обеспечивают 30% экономии энергии

**Рис. К1.** Как достичь целей снижения потребления электроэнергии при эксплуатации зданий на 20% к 2020 году

## 2 Энергоэффективность и электричество



### 2.1 Законодательные меры повышения энергоэффективности

Киотский протокол был отправной точкой для четкого определения целей и планов по снижению выбросов CO<sub>2</sub> с конкретными обязательствами правительств стран-участниц.

Дополнительно к Киотскому протоколу, который затрагивает только период до 2012 года, многие страны установили более долгий временной период и цели согласно последним рекомендациям конвенции ООН по изменению климата, что требует стабилизации концентрации CO<sub>2</sub> на уровне 450 частиц на миллион, что должно к 2050 году обеспечить двукратное снижение выбросов CO<sub>2</sub>.

Европейский союз является хорошим примером ответственного отношения к окружающей среде - четкие обязательства достичь снижения выбросов на 20% к 2020 году были приняты главами Европейского союза в марте 2007 года. Эти обязательства иногда называются 3x20: снижение выбросов CO<sub>2</sub> на 20%, увеличение энергоэффективности на 20%, выработка 20% энергии за счет возобновляемых ресурсов. Эти обязательства по снижению выбросов более чем на 20% могут быть расширены до 30% и более к 2020 году в рамках пост-Киотского международного договора.

Некоторые европейские страны планируют подписать международное соглашение по снижению выбросов в атмосферу к 2050 году на 50%. Это иллюстрирует, что цели повышения энергоэффективности и сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу будут существовать достаточно долго.

Выполнение этих обязательств потребует изменения законов, стандартов и инструкций и заставит правительства стимулировать их выполнение постоянно.

#### Законодательство разных стран ужесточает обязанности заинтересованных лиц и вводит материальное стимулирование повышения энергоэффективности

##### ■ В США:

- Акт энергетической политики 2005 года
- Строительные нормы
- Энергетические нормы (10CFR434)
- Государственная энергетическая программа (10CFR420)
- Энергосбережение для частных нужд (10CFR430)

##### ■ В Европейском союзе:

- Схема торговли выбросами Евросоюза
- Энергоэффективность в строительстве
- Руководство по использованию энергии
- Руководство по использованию энергии конечными пользователями

##### ■ В Китае:

- Закон об энергосбережении Китая
- Закон об архитектуре Китая (Энергосбережение в строительстве)
- Закон о возобновляемых источниках энергии Китая
- 1000 лучших производственных программ по энергосбережению

Законодательные нормы по энергосбережению	Энергоэффективность в строительстве	Маркировка энергоэффективности бытовых приборов	Схема торговли выбросами	Тепло и энергия	Использование энергии	Использование энергии конечными пользователями
	Дек. 2002 EPB 2002/91	Июл. 2003 ELDA 2003/66	Окт. 2003 ETS 2003/87	Фев. 2004 CHP 2004/8	Июл. 2005 Eco Design 2005/32	Апр. 2006 EUE & ES 2006/32

Рис. К2. Законодательные нормы по энергосбережению

#### Различные законодательные и материально стимулирующие схемы разработаны на национальном и региональном уровне, такие как:

- Аудит и оценочные схемы
- Схемы маркировки уровня эффективности
- Строительные нормы
- Сертификаты энергоэффективности
- Требование стимулирования потребителей энергии в сфере энергосбережения ее поставщиками
- Добровольные соглашения в промышленности
- Финансовые механизмы (налоговые скидки, ускоренная амортизация, сертификаты низкого энергопотребления)
- Налоговые и стимулирующие схемы

В настоящее время законодательное регулирование затрагивает практически все области энергопотребления - не только новое строительство, но и существующие здания, промышленный и жилой секторы.

В то же время постоянно разрабатываются новые стандарты, некоторые из которых уже действуют, некоторые находятся в процессе принятия.

В строительной отрасли рассматривается любое использование энергии:

- Освещение
- Вентиляция
- Отопление
- Охлаждение и кондиционирование

Для промышленности и коммерческих предприятий разрабатываются стандарты энергетического менеджмента в соответствии с хорошо известным стандартом качества ISO 9001 и экологическим стандартом ISO 14001. Стандарты на энергоэффективность также находятся в разработке.

## 2.2 Как повысить энергоэффективность

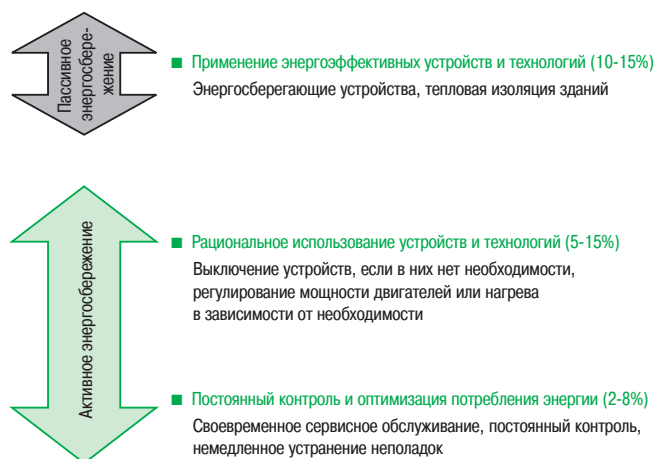


Рис. К2. Современные технологии позволяют снизить потребление энергии на 30%

Сокращение потребления энергии на 30% достижимо с использованием существующих энергосберегающих технологий, но, чтобы понять в чем заключаются эти возможности, необходимо понять основные отличия между пассивным и активным энергосбережением.

К пассивному энергосбережению относятся: использование специальных мер, по снижению тепловых потерь, использованию оборудования с низким энергопотреблением и т.д. Активное энергосбережение определяется как эффективный мониторинг, измерение и контроль использования энергии. Важно, но недостаточно использовать энергосберегающее оборудование и устройства, например, энергосберегающие лампы. Без должного контроля, данные меры препятствуют излишним потерям энергии, вместо того, чтобы реально снизить ее потребление и увеличить эффективность использования.

Во всех областях, где происходит потребление энергии — от затрат на освещение или нагрев до электроприводов, вентиляции и кондиционирования, бойлерных и т.д., - должно применяться активное сбережение, чтобы достичь поставленных целей. Это включает и изменение в культуре и мышлении отдельных групп людей, что должно привести к изменениям в их поведении на работе и дома. Понятно, что такие изменения не столь необходимы при широком использовании технических мер контроля и управления.

■ От 10 до 15% сбережения энергии достигается за счет пассивных энергосберегающих мер, таких как установка энергосберегающих устройств, теплоизоляции зданий и т.д.

■ От 5 до 15% экономии энергии можно достичь за счет оптимизации использования оборудования, выключения устройств, если в них нет необходимости, регулировании работы приводов или нагрева с необходимой мощностью.

□ До 40% потенциального сбережения для электродвигателей может быть реализовано при помощи управления и автоматизации.

□ До 30% потенциального сбережения в освещении зданий может быть достигнуто за счет установки системы управления светом.

■ В будущем от 2 до 8% экономии энергии может быть достигнуто за счет активных энергосберегающих мер, таких как постоянный контроль и управление потреблением электроэнергии.

## 2 Энергоэффективность и электричество

Следующие факторы могут значительно снизить эффективность применяемых энергосберегающих мероприятий:

- Незапланированные и/или неуправляемые остановки оборудования и технологических процессов
- Отсутствие автоматизации и регулировки (двигатели, нагрев)
- Отсутствие непрерывности технологических процессов.

### Энергоэффективность – это просто: всего 4 шага

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>1. Измерение</b>            | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Счетчики энергии</li><li>■ Измерительные приборы качества энергии</li></ul>  |
| <b>2. Первичная экономия</b>   | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Энергосберегающие устройства</li><li>■ Тепловая изоляция</li><li>■ Повышение качества энергии</li><li>■ Повышение надежности поставок энергии</li></ul>  |
| <b>3. Автоматизация</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Системы управления зданиями</li><li>■ Системы управления освещением</li><li>■ Системы управления двигателями</li><li>■ Системы «Умный дом»</li><li>■ Частотные преобразователи для электродвигателей</li></ul> |
| <b>4. Контроль и улучшение</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>■ Программное обеспечение для контроля и управления энергией</li><li>■ Системы телеметрии</li></ul>  |

Рис. К4. 4 шага к энергосбережению

Энергоэффективность не отличается от других наук, и, при ее изучении, необходимо использовать рациональный подход с общеизвестным порядком действий: определение, измерение, анализ, улучшение и управление.

Как обычно, для начала необходимо провести ряд измерений, чтобы понять, где находятся основные потребители энергии, характер их потребления и т.д. Эти первоначальные измерения, совместно с некоторыми исходными данными, позволят понять насколько эффективно расходуется энергия, определить область основных модернизаций и провести примерную оценку ожидаемой прибыли от использования энергоэффективных технологий. Невозможно улучшить то, что нельзя измерить.

После этого необходимо применить меры пассивного энергосбережения: заменить старые устройства новыми, с низким энергопотреблением (лампы, двигатели и т.д.), улучшить тепловую изоляцию установок и зданий и обеспечить качество электрической энергии, чтобы достичь стабильных условий работы, в которых энергия будет экономиться непрерывно в течение продолжительного периода времени.

Следующим этапом необходимо переходить к фазе автоматизации или активного энергосбережения. Как уже было сказано, ко всему, что потребляет энергию, необходимо применить активные меры экономии, чтобы достичь постоянных доходов от энергосбережения.

Активное энергосбережение может применяться не только для энергосберегающих устройств, но и для любых потребителей энергии. Именно наличие контроля работы оборудования и устройств критически необходимо для достижения максимальной энергоэффективности. Для примера, представьте энергосберегающую лампу, включенную в пустой комнате. Все что достигнуто – это меньшее энергопотребление по сравнению с обычной лампой, но энергия по-прежнему расходуется.

Ведущие производители оборудования постоянно разрабатывают более эффективную продукцию. По большей части, КПД оборудования определяет его потенциал по энергосбережению.

В большинстве случаев общий КПД системы – это то, что можно посчитать. Для примера, энергосберегающее устройство, которое постоянно находится в режиме ожидания, может быть менее эффективным, чем устройство с худшим КПД, но выключающегося, если в нем нет необходимости.

Подытожим, управление энергией необходимо производить с учетом повышения ее полезности и экономии ее расхода. Чем больше появляется продукции, более эффективной по сравнению с существующей, чем чаще применяется контроль отключения или уменьшаются значения температуры или скорости, тем больший эффект сбережения можно достичь.

## 2 Энергоэффективность и электричество

### Ключ к постоянной экономии энергии

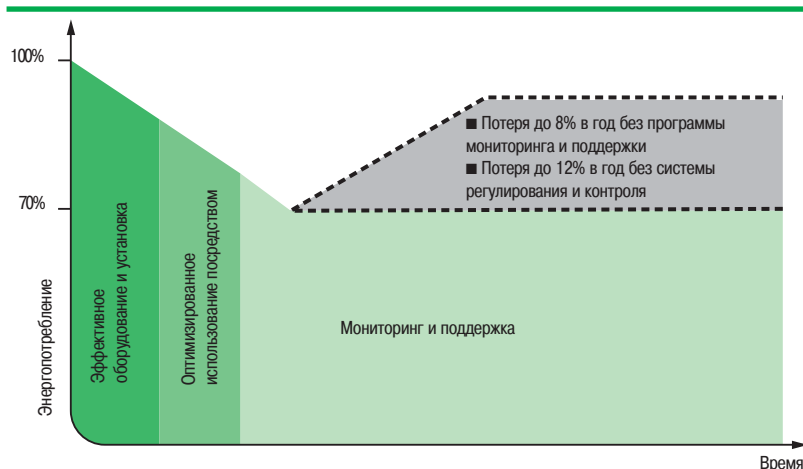


Рис. К5. Постоянный контроль и мониторинг поддерживают энергосбережение

Как можно заметить, 30% экономии потребляемой энергии доступно и может быть легко достигнуто при помощи существующих технологий, а до 8% энергопотребления ежегодно может быть потеряно, если не обеспечить необходимого обслуживания и диагностики используемого оборудования и устройств. Информация о потреблении и состоянии оборудования является ключевым фактором, обеспечивающим постоянное сбережение.

Невозможно управлять каким-либо устройством или процессом при отсутствии измеряемых величин. Таким образом, измерение и мониторинг оборудования совместно с анализом полученных данных является тем инструментом, который поможет сберечь больше энергии.

### Постоянное повышение энергоэффективности



Рис. К6. Цикл непрерывного повышения энергоэффективности

Для постоянной и значительной экономии потребляемой электроэнергии необходим структурированный подход к энергосбережению. Schneider Electric работает со своими клиентами именно по подобному алгоритму. Только компании, обладающие оборудованием и знаниями необходимыми для работы на всех этапах цикла энергосберегающих мероприятий, могут помочь своим клиентам достичь реальной экономии потребления энергии. Мы начинаем с комплексного энергетического обследования зданий или производственных процессов. Это дает нам полное понимание ситуации и основных путей решения проблем сбережения энергии. Но данных мер недостаточно, это только начальная стадия, которая реально не отражается на результатах работы.

После этого мы применяем первичные действия по сбережению, автоматизируем процессы и устройства, проводим финальный контроль, обслуживание и модернизацию. После этого необходимо начать все с начала и, таким образом, продолжить циклический процесс.

Энергоэффективность — проблема, в которой должны быть установлены отношения с клиентом основанные на разделении рисков и взаимовыгодных отношениях, для того чтобы достичь ощутимого результата.

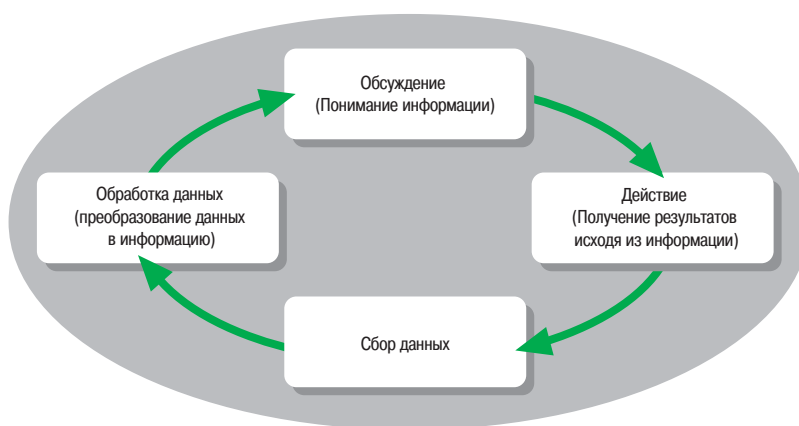
Т.к. цели энергосбережения установлены на долгую перспективу (более 20% к 2020 году, более 50% к 2050 году), основная часть наших клиентов по программам энергосбережения нацелена не столько на немедленное достижение результатов, сколько на долгую перспективу. Таким образом, контракты на решение определенных проблем являются идеальным способом решения задач наших клиентов.

## 3 Диагностика с использованием электрических измерений

Показатели энергоэффективности в области электричества могут быть представлены в виде измерений фундаментальных физических величин: напряжения, тока, гармонического состава и т.д. Результаты замеров затем преобразуются в цифровой вид и, в дальнейшем, представляются в виде, более понятном человеку.

В необработанном виде данные инструментальных измерений представляют небольшой интерес. К сожалению, некоторые энергетические менеджеры полностью сосредотачиваются на инструментальных замерах и считают сбор данных своей основной задачей. Ценность результатов измерений представляет только информация, полученная после их обработки (доступная для понимания энергетического менеджмента) и обоснование необходимости затрат для улучшения показателей энергоэффективности.

Энергетический аудит электрической сети состоит из четырех этапов: сбор данных, обработка данных, обсуждение и действие (см. **рис. К7**). Подобные этапы могут быть применены при обследовании любой системы. Подобная последовательность действий работает только в случае, если полностью отлажена система обмена данными.



**Рис. К7.** Этапы энергоаудита

**K7**

Результатом обработки данных должна быть информация, которая будет понятна ее получателю. Способность понимания полученных данных пользователем остается основной проблемой для принятия решений по энергосбережению.

Затем данные напрямую воздействуют на энергопотребляющую нагрузку: производственные процессы, освещение, кондиционирование и т.д., - далее результаты сообщаются службе, отвечающей за это оборудование или процесс – количество произведенной продукции, комфорт посетителей супермаркета, температуру воздуха в холодильнике и т.д.

Информационная система тогда готова использоваться на повседневной основе, чтобы достичь целей повышения эффективности использования энергии, установленных руководством компании.

### 3.1 Получение физических данных

Для успешного энергетического аудита необходимо обеспечить качество исходных данных, которые должны быть получены за счет измерений в нужном месте, в нужное время и в необходимом объеме.

Обычно производятся замеры напряжения и тока, протекающего через проводники. Из этих основных параметров вычисляются остальные: мощность, энергия, коэффициент мощности и т.д.

Изначально необходимо удостовериться в достаточности класса точности токовых трансформаторов, трансформаторов напряжения и точности самих средств измерения. Класс точности для высоковольтного оборудования должен быть выше: ошибка измерения высокого напряжения может составить значительные объемы энергии.

Общая ошибка измерений представляет собой квадратичную сумму каждой из составляющих:

$$\Sigma \text{ of error} = \sqrt{\text{error}^2 + \text{error}^2 + \dots + \text{error}^2}$$

Например, трансформатор тока с точностью 2% подключен к амперметру с точностью 2%. Таким образом, общая ошибка измерения составит:

$$\Sigma \text{ of error} = \sqrt{(2)^2 + (2)^2} = 2,828\%$$

Это означает абсолютную погрешность измерений на уровне 2 828 кВт·ч при потреблении 100 000 кВт·ч электроэнергии.



**Параметры ТТ:**

- Коэффициент трансформации, например, 50/5А
- Класс точности, например, 0.5
- Номинальная вторичная нагрузка в В·А для подключения измерительных устройств ко вторичной обмотке, например 1,25 В·А.
- Номинальный коэффициент безопасности – кратность воздействия по отношению к номинальному первичному току, при котором ТТ уходит в насыщение. Пример:  $FLP (Fs)=10$  для измерительных устройств, согласованных с ТТ

**Измерение напряжения**

Низкое напряжение может быть измерено напрямую вольтметром. В случае если уровень напряжения превышает возможности применяемого вольтметра, необходимо применение трансформаторов напряжения.

Основными параметрами трансформатора напряжения (ТН) являются:

- Первичное и вторичное напряжения
- Полная мощность
- Класс точности

**Измерение тока**

Измерения тока производятся с помощью трансформаторов тока (ТТ) с цельными или разборными магнитопроводами, установленными на фазные и нейтральный проводники.

В соответствии с требуемой точностью измерений, трансформаторы тока, используемые в цепях релейной защиты, могут быть использованы для измерения величины тока в штатных режимах.

**Измерение энергии**

Для измерения энергии необходимо сделать два допущения:

- Для коммерческого учета энергии, например между энергетической компанией и ее клиентом или даже между аэропортом и магазинами, арендующими помещения аэропорта (суб-поставка) – должны использоваться счетчики, удовлетворяющие стандарту IEC 62053 21 класса 1 или 2 или стандарту IEC 62053 22 класса 0.5S или 0.2S.
- Полный набор измерительного оборудования с использованием трансформаторов тока и напряжения и измерительного прибора должен удовлетворять требованиям точности по классу 1 в диапазоне низких напряжений, классу 0,5 – в диапазоне средних напряжений и классу 0,2 – в диапазоне высоких напряжений, или даже 0,1 в будущем.
- Для внутреннего учета электрической энергии в компании, например, для учета затрат электроэнергии на производство какой-либо определенной продукции, достаточно применение измерительных приборов полного цикла (трансформаторы тока и напряжения, измерительный прибор), удовлетворяющих требованиям точности в соответствии с классом 1 или 2.

Рекомендуется использовать приборы с классом точности достаточным для тех или иных измерений. В этом вопросе нет универсального решения – необходимо найти компромисс между техническими и экономическими факторами, удовлетворяющий заданным параметрам. Следует учитывать, что высокая точность приборов сильно сказывается на их стоимости, что, в свою очередь, отражается на экономических параметрах внедряемой системы.

Энергоэффективность электрической сети значительно повышается в случае, если она до этого не была оборудована соответствующим образом. Тем не менее, постоянные модификации электрической сети компании в зависимости от текущих требований, требуют от нас своевременной ее оптимизации.

Пример:

Аналоговый амперметр класса точности 1, с пределом измерений 100 А отражает значение тока  $\pm 1$  А на уровне тока в 100 А. Однако, если он показывает значение 2 А, значение измеряемого тока составляет  $2 \pm 1$  А и, таким образом, относительная погрешность измерения составляет 50%.

Счетчик электрической энергии, например РМ710, также как и другие счетчики и приборы измерения параметров электрической сети, имеет точность 1% во всем диапазоне измерений, как это и требуется в стандарте IEC 62053.

Следующие физические параметры могут быть использованы для расширения исходной информации:

- Включенное/выключенное состояние различных устройств
- Выбросы потребления энергии
- Температура трансформатора или двигателя
- Время работы нагрузки, количество включений/выключений
- Нагрузка двигателя
- Нагрузка батареи источника бесперебойного питания
- Журнал отказов оборудования
- Прочее

## 3.2 Данные электрической сети для реальных целей

Пользовательская информация, полученная после обработки данных измерения электрических параметров должна удовлетворять следующим условиям:

- Она должна влиять на поведение пользователей с целью более разумного энергопотребления и, в конечном итоге, снижению затрат на энергию
- Она должна содействовать повышению эффективности труда персонала
- Она должна содействовать снижению затрат на электроэнергию
- Она должна содействовать в понимании, как используется электроэнергия и какое оборудование или процессы могут быть модернизированы для улучшения энергоэффективности
- Она может помочь в увеличении продолжительности жизни оборудования, подключенного к электрической сети
- Она может стать ключевым фактором, влияющим на повышение производительности соответствующего процесса (производственного или управления офисом или зданием) за счет недопущения или сокращения времени отключения или повышения качества электроэнергии, подаваемой в нагрузку.



Многофункциональный измерительный модуль РМ700

Эксплуатационные затраты могут быть представлены в виде айсберга (см. **рис. К8**). Айсберг кажется большим выше поверхности, но при этом большая его часть скрыта под поверхностью воды. Точно так же оплата электроэнергии, которая показывается на поверхности ежемесячно, когда ваша энергетическая компания выставляет вам счет. Энергосбережение в этой области важно и достаточно для того, чтобы введение системы управления энергией было необходимым. При этом существуют менее заметные, но гораздо более значимые возможности по энергосбережению, которые находятся ниже поверхности и доступные для внедрения, если у вас в распоряжении есть необходимые инструменты.

### Изменение поведения потребителей

Используя отчеты о распределении энергии, можно проверить точность получаемых счетов, распределить затраты на электроэнергию внутри организации по отделам, принять эффективные решения, основанные на фактических данных и стимулировать ответственность персонала в использовании электроэнергии. Затем, используя данные о стоимости электроэнергии для каждого из отделов вашей организации, вы можете изменить поведение персонала с целью более рационального использования энергии и, в конечном счете, снизить общие затраты организации на электроэнергию.

### Улучшение эффективности работы энергетической службы

Одной из наиболее важных задач энергетической службы является необходимость принятия правильного решения в кратчайшие сроки. Для данного персонала первой потребностью является понимание того, что происходит в электрической сети, и возможность получить информацию с каждого ее участка.

Использование системы мониторинга электрической сети делает ее работу прозрачной и предоставляет данные с разных ее участков, что позволяет персоналу энергетической службы:

- Понимать направление потоков электрической энергии, проверять правильность функционирования сети, ее сбалансированность, знать основных потребителей электроэнергии, когда они включены.
- Понимать поведение сети – легче определить причину срабатывания автоматического выключателя фидера, если обладаешь информацией о токе подключенных нагрузок перед отключением
- Быть немедленно проинформированным о событиях в сети, находясь в любой точке организации и даже за ее пределами, при использовании современных мобильных средств связи
- Сразу же отправляться в точку неисправности с необходимой запасной частью и пониманием картины произошедшего события
- Проводить сервисное обслуживание согласно реальным данным о времени работы устройств или установок, не рано, но и не поздно
- Обладать данными со всех участков электрической сети, что предоставляет возможность оптимизации нагрузки на нее и, в определенных случаях, снизить общие затраты на электроэнергию

Вот некоторые примеры использования простейших систем мониторинга:

- Проведение проверок для выявления ненормального потребления
- Отслеживание незапланированного потребления
- Уверенность, что потребление электроэнергии в организации не выше чем у конкурентов
- Определение оптимального тарифного плана на электроэнергию
- Настройка простейшего управления по расписанию с акцентом на оптимизацию управления нагрузкой, например, освещением
- Возможность требования компенсации с энергопоставляющей компании в связи с поставкой электроэнергии не удовлетворяющей требованиям качества, например: «Производственный процесс был остановлен из-за перекоса фаз в питающей сети»

### Внедрение энергоэффективных проектов

Система мониторинга электрической сети может предоставить информацию, которая необходима для комплексного энергетического аудита компании. Подобный аудит может быть проведен не только для электрической сети, но и для проверки потребления воды, сжатого воздуха, газа и пара. Измерения, тесты и данные о потреблении могут дать информацию об эффективности производственных процессов. На ее основе можно внедрять соответствующие энергосберегающие меры. Их область может затрагивать целый ряд параметров, например, настройку автоматического управления освещением, систем автоматики зданий, изменением скорости вращения двигателей, автоматизации процессов и т.д.

### Оптимизация ресурсов

Обычно электрическая сеть постоянно развивается и, однажды, возникает вопрос: сможет ли она развиваться дальше и как заставить ее выдержать дополнительную нагрузку? Это типичный случай, в котором система мониторинга поможет найти правильный ответ.

Благодаря возможности постоянной записи параметров сети, появляется возможность реально оценить использование ресурсов сети и достаточно точно рассчитать резервы всей сети в целом, отдельного фидера или трансформатора. Кроме того, аккуратное использование ресурсов сети и недопущение перегрузок позволяет значительно увеличить их жизненный срок.

Система мониторинга может дать точную информацию об использовании того или иного ресурса сети, что позволит обслуживающему персоналу принять решение о проведении необходимых сервисных работ точно в нужное время, не рано, но и не поздно.

В некоторых случаях, мониторинг гармонического состава напряжения электрической сети может положительно сказаться на сроке эксплуатации некоторых устройств, например, двигателей или трансформаторов.



**Рис. К8.** Эксплуатационные затраты могут быть представлены в виде айсберга

### Повышение производительности за счет сокращения времени простоя

Отключение питания — это кошмар для любого человека, связанного с электрическими сетями. Оно может привести к очень высоким материальным потерям компании, нервозности и сильному стрессу обслуживающего персонала, которому требуется восстановить работу электрической сети в кратчайшее время.

Наличие системы мониторинга и управления электрической сетью позволяет значительно сократить общее время отключений сети.

Даже при отсутствии системы современной системы управления, необходимой для целого ряда задач, наличие обычной системы телеметрии, может дать информацию, необходимую для сокращения времени отключения:

- Немедленно проинформировать диспетчерский или обслуживающий персонал, в том числе отсутствующий на объекте (при использовании мобильных технологий, таких как DECT или GSM/SMS).
- Предоставить информацию о состоянии всех ресурсов сети
- Помочь в локализации аварийного участка
- Дать детальную информацию о любом событии в сети, зарегистрированную распределенными датчиками и измерителями, например причину отключения

Наличие системы удаленного управления ресурсами сети необходимо, но не обязательно. В большинстве случаев все равно необходимо прибытие ремонтного персонала на аварийный участок для проведения ремонтных работ.

### Повышение производительности за счет улучшения качества электроэнергии

Некоторые виды электрических устройств достаточно чувствительны к качеству электроэнергии. Операторы подобных установок могут столкнуться с непредвиденными ситуациями, если качество электроэнергии не соответствует нормам. Мониторинг качества электроэнергии является оптимальным решением для предотвращения подобных неожиданностей или принятия мер для их недопущения.



Автоматический выключатель Compact NSX с электронным расцепителем Micrologic

K10



Многофункциональный измеритель ION 6200



Контроллер электродвигателя TeSys

## 3.3 Построение системы начинается с установки отдельно стоящих решений

Выбор средств проведения измерений на электрооборудовании зависит от ваших энергетических приоритетов и существующих технологических решений:

- Для сетей низкого и среднего напряжений существуют измерительные устройства, обеспечивающие все измерительные и защитные функции. Примеры: устройства релейной защитной автоматики Sepam, электронный расцепитель Micrologic для автоматических выключателей Compact NSX и Masterpact, драйвер двигателя TeSys U, контроллер коэффициента мощности NRC12, источник бесперебойного питания Galaxy и т.д.
- Защитные устройства могут устанавливаться отдельно от измерительного модуля, например, в ячейке с расцепителем

Пример: Измерительный модуль PowerLogic ION 6200.

Технический прогресс сделал возможным реализовать современные электронные и IT решения в одном корпусе, что дает следующие преимущества:

- Упрощается монтаж распределительных ячеек
- Уменьшается стоимость оборудования и количество устанавливаемых устройств
- Упрощается отладка и эксплуатация устройств за счет возможного обновления программного обеспечения

### 3 Диагностика с использованием электрических измерений

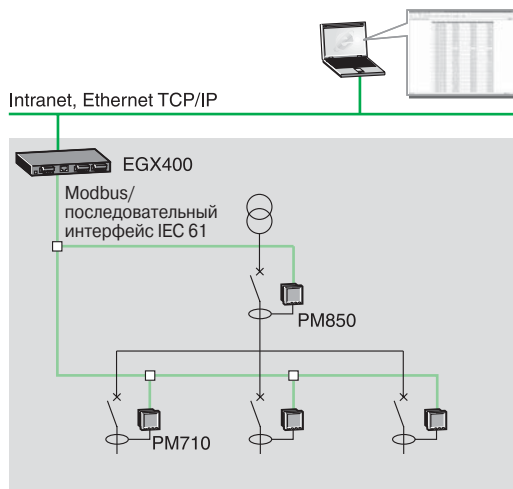


Рис. К9. Пример электрической сети, защищаемой и контролируемой через Intranet веб сайт

#### Пример решения для сети среднего размера

Компания Analysesample Ltd. специализируется на анализе образцов от местных фабрик: пластика, металлов и т.д., - и их сертификации на соответствие заданному химическому составу. В указанной компании решили установить контроль энергопотребления существующих электрических печей и системы кондиционирования, а также убедиться в качестве электропитания высокоточных устройств, предназначенных для анализа образцов.

#### Защита и мониторинг электрической сети при помощи Intranet сервера

Решение данной проблемы заключается в установке Intranet веб сервера и подключенных к нему измерительных модулей, которые обеспечивают измерение основных электрических параметров и контроль качества электрической энергии. Использование Intranet веб сервера позволяет достаточно легко получить доступ к измеряемым данным или экспортировать их в электронную таблицу Microsoft Excel™. Кривые мощности могут быть получены при помощи электронных таблиц в реальном времени (см. рис. К9). Данное решение не требует материальных вложений в программное или аппаратное обеспечение для анализа данных.

Для примера, чтобы уменьшить сумму счета за электроэнергию и лимитировать потребление электроэнергии в ночное время и выходные дни, необходимо проанализировать кривые, полученные при помощи измерительных модулей (см. рис. К10).

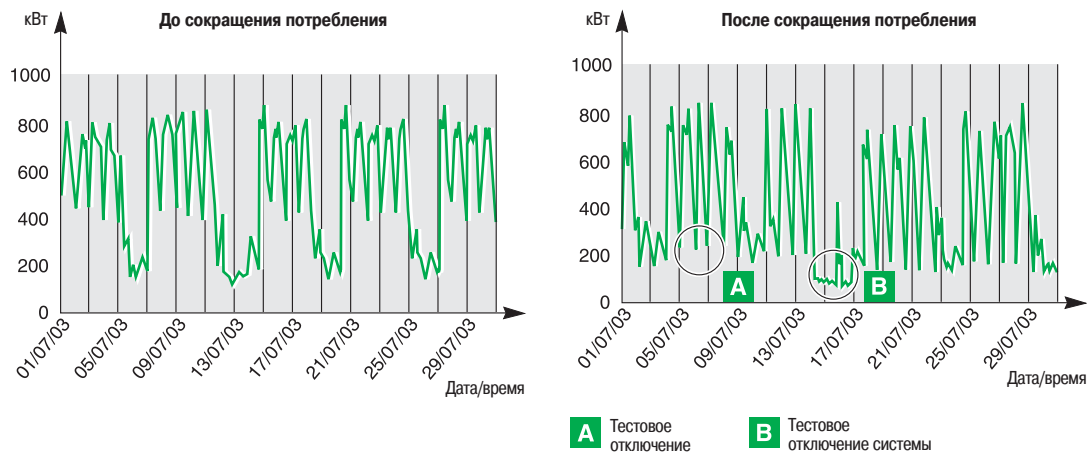


Рис. К10: А Тестовое отключение освещения, В Тестовое отключение системы кондиционирования

В данном случае энергопотребление в нерабочее время кажется избыточным, поэтому было принято два решения:

- Снизить уровень освещенности в ночное время
- Отключать систему кондиционирования в выходные дни

Кривая энергопотребления после произведенных мероприятий показывает существенное сокращение энергопотребления

K11

3 Диагностика с использованием электрических измерений

Примеры возможных измерений, доступных для передачи с использованием протокола Modbus по интерфейсу RS-485 или Ethernet (см. Рис. К11)

	Измеряемые величины	Модули релейной защиты и измерений для среднего напряжения	Модули релейной защиты и измерений для низкого напряжения	Контроллеры компенсаторов реактивной мощности	Измерители сопротивления изоляции
Примеры	Счетчик, измеритель	Sepam	Masterpact & расцепители Compact Micrologic	Varlogic	Система Vigilohm
Контроль расхода электроэнергии					
Мощность, мгновенная, макс., мин.	■	■	■	■	-
Энергия, возможность сброса счетчика	■	■	■	-	-
Коэффициент мощности, мгновенный	■	■	■	-	-
cos φ, мгновенный	-	-	-	■	-
Повышение надежности энергообеспечения					
Ток, мгновенный, макс., мин., перекос	■	■	■	■	-
Ток, форма	■	■	■	-	-
Напряжение, мгновенное, макс., мин., перекос	■	■	■	■	-
Напряжение, форма	■	■	■	-	-
Состояние устройства	■	■	■	■	-
История ошибок	■	■	■	-	-
Частота, мгновенная, макс., мин.	■	■	■	-	-
Гармонический состав	■	■	■	■	-
Улучшение условий эксплуатации электрооборудования					
Температура нагрузки, температурная характеристика	■	■	-	■	-
Сопротивление изоляции	-	-	-	-	■
	Контроллеры двигателей	Частотные преобразователи низкого напряжения	Безударные пускатели низкого напряжения	Безударные пускатели среднего напряжения	Источники бесперебойного питания
Примеры	TeSys U	ATV.1	ATS.8	Motorpact RVSS	Galaxy
Контроль энергопотребления					
Мощность, мгновенная, макс., мин.	-	■	-	■	■
Энергия, возможность сброса счетчика	-	■	■	■	-
Коэффициент мощности, мгновенный	-	-	■	■	■
Повышение надежности энергообеспечения					
Ток, мгновенный, макс., мин., перекос	■	■	■	■	■
Ток, форма	-	-	-	■	■
Состояние устройства	■	■	■	■	■
История ошибок	■	■	■	■	-
Гармонический состав	-	■	-	-	-
Улучшение условий эксплуатации электрооборудования					
Температура нагрузки, температурная характеристика	■	■	■	■	■
Время наработки двигателя	-	■	■	■	-
Контроль состояния батареи	-	-	-	-	■

Рис. К11. Примеры возможных измерений, доступных для передачи с использованием протокола Modbus по интерфейсу RS-485 или Ethernet:

Основываясь на данных полученных при помощи системы мониторинга электрической сети, можно осуществить ряд проектов по улучшению энергоэффективности. Существует несколько направлений возможных действий:

- Часто, для начала, пытаются применить достаточно простые решения по энергосбережению, не требующие больших материальных вложений, чтобы получить достаточно быстрый эффект, до того как приступят к серьезным вложениям в повышение энергоэффективности
- Простой расчет срока окупаемости (время, за которое окупятся вложения) является достаточно популярным подходом к оценке и выбору различных решений. Преимуществом данного метода является его простота. С другой стороны, недостатком указанного метода является то, что не всегда учитываются долгосрочные перспективы
- Могут быть использованы другие, более сложные, методы, например, расчет приведенной стоимости или внутренний срок окупаемости. В этом случае требуются дополнительные затраты на экономический расчет, но картина материальной выгоды представляется более реальной

Сокращение энергетических затрат может быть достигнуто несколькими путями:

- Уменьшение использования электроэнергии для достижения тех же результатов или проверка, что энергия не расходуется больше, чем необходимо. Например, использование энергосберегающих ламп позволяет получить то же значение освещенности при меньших затратах на электроэнергию. Примером второго случая может служить сокращения числа ламп в зонах с излишне ярким освещением до значения, обеспечивающего необходимую освещенность.
- Мероприятия, не снижающие общее потребление электроэнергии, но уменьшающие ее стоимость. Например, перенос определенных процессов или процедур на ночное время, чтобы потребление энергии осуществлялось по более низким ночным тарифам. Отключение нагрузки в пиковое время то же может служить примером
- Повышение эффективности потребления электроэнергии за счет сокращения числа отключений. В этом случае выгода заключается в сокращении затрат электроэнергии, используемой для перезапуска устройств и установок.



Рис. К12. Комплексная стратегия энергосбережения

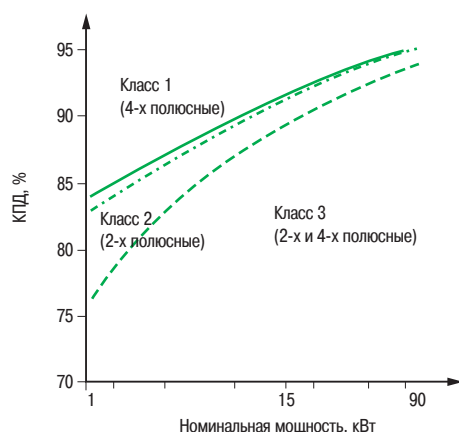


Рис. К13. Определение класса КПД для электродвигателей низкого напряжения, установленные Европейской комиссией и СЕМЕР (Европейским комитетом производителей электроустановок и силовой электроники)

## 4.1 Двигатели и их замена

Примерно 60% электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для работы электродвигателей, поэтому, с большой вероятностью, названные выше задачи энергосбережения будут применяться и к ним. Есть две причины для замены двигателей, что приведет к пассивному энергосбережению:

- Использование преимуществ современных высокоэффективных двигателей
- Недопущение превышения достаточной мощности двигателя

В зависимости от мощности, коэффициент полезного действия современных высокоэффективных двигателей выше, чем у обычных на 1-10%. Двигатели, работающие достаточно много должны стать первыми в очередь на замену более современными, тем более, если им требуется перемотка. Перемотанные двигатели, как правило, теряют 3-4% КПД по сравнению с изначальным значением. Однако, если двигатель работает достаточно мало (менее 3000 часов в год), его замена может быть экономически нецелесообразна, особенно, если он еще не выработал свой ресурс и ему не требуется перемотка. Также при замене двигателя важно убедиться, что рабочие характеристики (такие как скорость вращения) нового двигателя соответствуют заменяемому.



Электрические моторы достигают наивысшего КПД, если они нагружены на 60-100% от максимальной возможной мощности. При работе с нагрузкой менее 50% КПД электродвигателя резко падает. Так принято, что конструкторы обычно завышают необходимые параметры двигателей для обеспечения достаточного запаса прочности, чтобы устранить риск отказа оборудования при любых, даже маловероятных, условиях. Изучение указанной проблемы показало, что примерно в трети случаев применения электродвигателей, их характеристики значительно превышают необходимые и, как результат, эти двигатели работают с нагрузкой менее 50% номинальной. Средняя нагрузка на двигатели – 60%. Двигатели с избыточной мощностью не только неэффективны в процессе эксплуатации, но и стоят значительно дороже. Работа электромотора с мощностью, значительно меньше номинальной, также приводит к снижению коэффициента мощности, что может привести к дополнительным материальным затратам на оплату электроэнергии. Решение о замене двигателя должно учитывать приведенные выше факторы, не забывая о сроке эксплуатации мотора. Также необходимо заметить, что некоторые двигатели могут быть настолько мало нагружены по мощности или времени, что они не потребляют достаточное количество электроэнергии и из-за этого их замена может быть экономически нецелесообразна.

Для достижения максимального энергосбережения необходимо объединить приведенные доводы и производить замену двигателей современными высокоэффективными моторами с правильно выбранной мощностью.

Другие мероприятия, которые могут быть применены для электродвигателей:

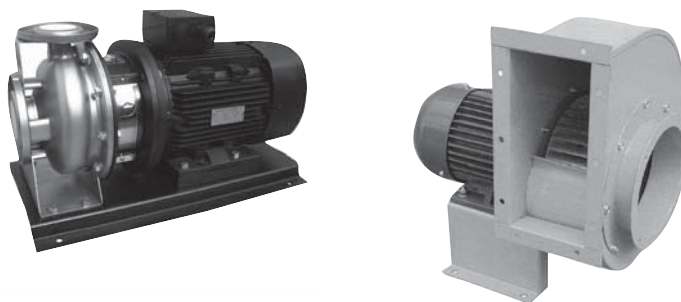
- Сокращение энергопотребления двигателя за счет его отключения на время, когда он не требуется. Это может привести к необходимости использования автоматического управления или обучения, контроля и стимулирования персонала. Если работник, отвечающий за работу двигателя, не заинтересован в сокращении энергопотребления, он может оставить двигатель включенным даже при отсутствии в этом необходимости.

- Проверка и регулировка щеточного механизма, особенно для крупных двигателей. Неотрегулированные щеточные узлы приводят к повышенному потреблению электроэнергии и могут привести к поломке мотора. Угловое смещение щеточного узла всего на 0.6 мм приводит к потерям мощности до 8%.

## 4.2 Насосы, вентиляторы и двигатели переменной скорости вращения

63% электроэнергии, потребляемой электродвигателями, расходуется насосным и вентиляционным оборудованием. В большинстве случаев, электродвигатели насосов и вентиляторов работают на полной скорости, даже если нет необходимости создания настолько мощного протока. Чтобы в этих условиях обеспечить необходимый проток жидкости или газа, используются энергонезэффективные методы, такие как клапаны, заслонки, дроссели и т.д. Это все равно, что использовать для поддержания скорости автомобиля тормоза при постоянно нажатой до упора педали газа. Тем не менее, эти методы регулирования наиболее часто встречаются в промышленности. Т.к. электродвигатели насосного оборудования являются лидерами по энергопотреблению, а насосное оборудование – самая большая область применения электродвигателей в промышленности, энергосбережение в этой области наиболее актуально.

Применение частотного преобразователя Altivar является примером активного энергосбережения, позволяющего отрегулировать производительность насосного оборудования для текущих нужд и сократить потребление электроэнергии. При правильном подборе оборудования, срок окупаемости составит от 10 месяцев до 3 х лет. Частотные преобразователи могут найти применение и в других областях, таких как компрессорное оборудование, формовка пластика и т.д.



**Рис. K14.** Примеры центробежных насоса и вентилятора, эффективность которых может быть повышена за счет установки частотного преобразователя

(1) James E. Piper, Инструкция по эксплуатации и обслуживанию электрохозяйства (Operations and Maintenance for Energy Management)  
(2) Данные департамента энергетики США

Большая часть насосов используется либо для перемещения жидкости из одной точки в другую, например, заполнение резервуара, находящегося выше источника, или циркуляции жидкости, например, жидкостное охлаждение. Вентиляторы используются либо для перемещения воздуха или других газов или создания разницы давления. Для того чтобы обеспечить движение жидкости или газа с заданной скоростью, необходимо создать разницу давлений. Большинство насосных или вентиляционных систем требуют, чтобы поток или давление зависели от различных факторов.

Для изменения потока или давления в системе существует несколько возможных вариантов. Необходимый метод выбирается исходя из конструкции насоса или вентилятора, например, поршневой или центробежный насос, осевой или центробежный вентилятор, из следующего списка:

- Включение в систему нескольких насосов или вентиляторов. Это обеспечивает ступенчатое изменение производительности при соответствующем включении или отключении определенных насосов или вентиляторов. Обычно, при использовании данного метода, появляются потери энергии, т.к. необходимое значение давления или потока может быть между «ступенями».
- Включение/отключение оборудования. Данный метод может быть использован только в случае, если допускается использование прерывистого потока.
- Клапан-регулятор потока. В данном методе регулирования используется клапан, регулирующий гидродинамическое сопротивление системы на выходе насоса или вентилятора. Это приводит к излишнему потреблению электроэнергии, т.к. в этом случае насос или вентилятор создают поток, который потом искусственно уменьшается клапаном. К тому же, у каждого насоса есть оптимальный режим работы и увеличение сопротивления выходному потоку может привести к снижению КПД насоса (увеличению потребления энергии) и снижению его надежности.
- Задвижка. По принципу работы напоминает клапан-регулятор потока в насосных системах, т.к. снижает производительность вентиляционной системы за счет уменьшения сечения выходного канала вентилятора. Этот принцип приводит к излишним затратам электроэнергии, т.к. вентилятор создает избыточный поток воздуха или газа, который уменьшается заслонкой.
- Байпасный метод (техника обхода). В данном случае насосная система также работает с максимальной мощностью, но излишний поток жидкости перенаправляется от выхода насоса обратно к забору. Это позволяет получить низкий уровень потока жидкости без риска увеличения выходного давления насоса, но приводит к излишнему потреблению электроэнергии, необходимой для прокачки избыточной жидкости через байпасную магистраль.
- Выброс воздуха. Данный метод напоминает байпасный метод для насосных систем. В этом случае вентилятор работает с максимальной мощностью, а излишний воздух просто выбрасывается в атмосферу через специальный клапан. Эффективность процесса снижается за счет затрат энергии на прокачку излишков воздуха или другого газа.
- Изменяемый угол атаки лопастей. Некоторые модели вентиляторов позволяют в процессе работы изменить угол атаки лопастей в зависимости от требований производительности.
- Входной направляющий аппарат. В этой технике на входе вентилятора устанавливаются жалюзи, регулирующие поступление воздуха или другого газа в вентилятор, что напрямую сказывается на выходном потоке вентилятора.

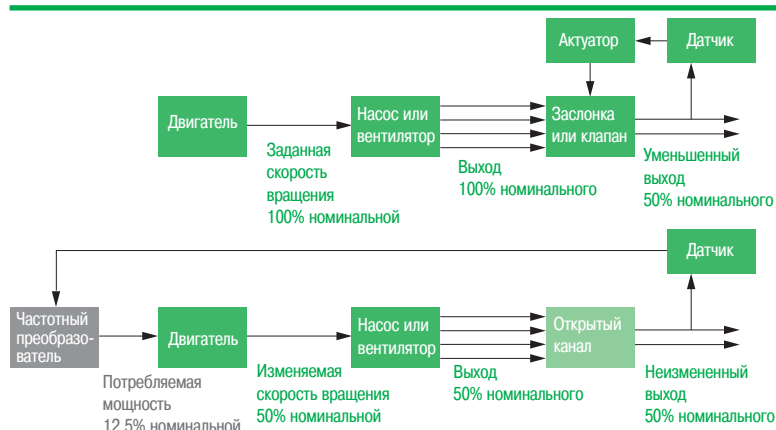


Рис. К15. Теория управления насосом или вентилятором

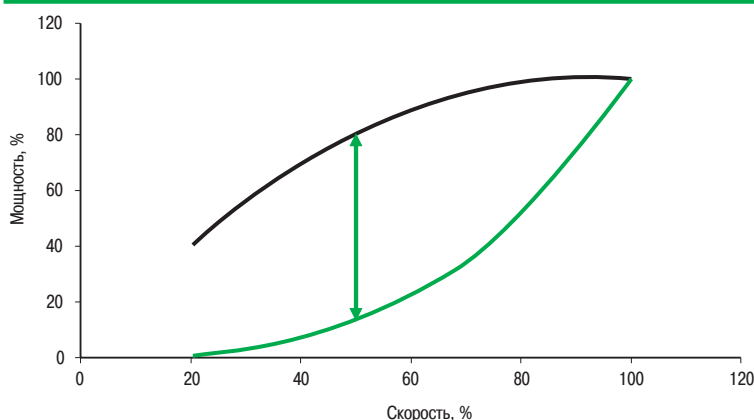
Если насос или вентилятор должны обеспечивать разный поток жидкости или газа, их производительность выбирается из расчета максимально возможных параметров и, при этом, с запасом по мощности. Таким образом, в основном, двигатели насосного или вентиляционного оборудования работают в неэффективных режимах. При этом указанные выше принципы управления потоком газа или жидкости также достаточно неэффективны. Использование частотных преобразователей, снижающих мощность двигателей насосов или вентиляторов, если в ней нет необходимости, может позволить существенно снизить затраты на электроэнергию. Если же не требуется изменение производительности насоса или вентилятора и перечисленные варианты управления либо не установлены, либо не используются (например, заслонки или клапаны полностью открыты), существует вероятность, что правильно выбранный электродвигатель будет постоянно работать в максимально эффективном режиме. В этом случае установка частотного преобразователя не будет оправдана.



Для насосных или вентиляционных систем с изменяемой производительностью установка преобразователя частоты позволяет снизить скорость вращения электродвигателя и сократить его энергопотребление. Для вентиляционных систем КПД зависит от их конструкции. Управление скоростью вращения центробежного вентилятора с загнутыми вперед или назад лопатками может быть достаточно выгодно. Осевые вентиляторы обладают большим КПД и, обычно, установка частотного преобразователя для управления ими экономически нецелесообразна. Эффективность насосных систем зависит от гидростатических (перепада высот трубопровода) и гидродинамических (сопротивления потоку труб, клапанов и т.д.) потерь. Режимы работы устанавливаемого частотного преобразователя должны соответствовать диапазону безопасных режимов насоса. Обычно применение частотных преобразователей дает больший экономический эффект, если в системе преобладают гидродинамические потери. В некоторых случаях замена насоса или вентилятора на более подходящий по конструкции может дать лучший экономический эффект, чем установка частотного преобразователя. Применение частотных преобразователей с редко используемым, пусть и неэффективным вентиляционным или насосным оборудованием может быть экономически нецелесообразно, т.к. не принесет ощутимой экономии электроэнергии из-за малого времени работы системы. Тем не менее, изменение производительности насосов и вентиляторов за счет изменения скорости вращения гораздо более эффективно, чем применение клапанов-регуляторов или байпасных систем.

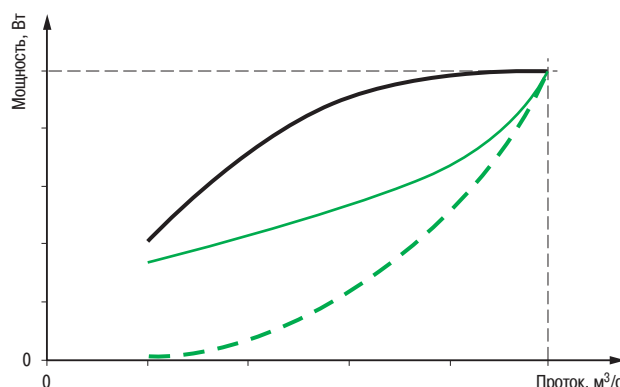
При работе вентиляторов и насосных систем наблюдаются следующие сходные зависимости:

- Проток прямо пропорционален скорости вращения ротора двигателя
- Уменьшение скорости вращения ротора двигателя в два раза приведет к уменьшению потока в два раза
- Давление и напор пропорциональны квадрату скорости вращения ротора двигателя
- Уменьшение скорости вращения ротора двигателя в два раза приведет к уменьшению давления в 4 раза
- Потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения ротора двигателя
- Уменьшение скорости вращения ротора двигателя в два раза приведет к уменьшению потребляемой мощности в 8 раз
- Следовательно, уменьшение потока в два раза сократит потребляемую мощность в 8 раз.



**Рис. K16.** Теоретическое значение экономии энергии при работе двигателя вентилятора со скоростью в два раза меньше номинальной

Если не требуется работа насоса или вентилятора с максимальной производительностью, появляется возможность достаточно сильно сократить потребление электроэнергии при незначительном уменьшении производительности. К сожалению, на практике энергетические потери в различных узлах делают указанные теоретические значения экономии недостижимыми.



**Рис. K17.** Зависимость потребляемой мощности от потока для различных методов управления: ограничивающей заслонки, входного клапана, частотного преобразователя (сверху вниз)

Реальные возможности энергосбережения зависят от конструкции насоса или вентилятора, его КПД, мощности, времени работы в течение года и стоимости электроэнергии. Эти возможности могут быть оценены при помощи специального программного обеспечения, например ESO8, или более точно проанализированы с помощью временной установки измерительного модуля и анализа данных измерений, полученных при реальных режимах работы.

Частотный преобразователь может быть использован с разными вариантами обратной связи:

■ По давлению. В данном случае к частотному преобразователю подключается датчик давления, при этом автоматически изменяется производительность работы насоса или вентилятора. Этот метод регулирования встречается достаточно часто, например, в водопроводных системах, где требуется постоянное давление воды, а ее проток зависит от потребления. Также подобная схема управления используется в системах централизованного охлаждения, распределения воды и ирригации, где используется заранее неизвестное количество разбрызгивателей.

■ По температуре. В системах отопления и охлаждения необходимо изменять проток жидкости или газа в зависимости от температуры. В этом случае к частотному преобразователю подключается температурный датчик и изменение производительности насоса или вентилятора будет происходить в зависимости от реальной температуры, требуемой для того или иного процесса. Эта схема похожа на стабилизацию давления, где также изменяется проток жидкости или газа, только требование к стабилизации температуры привело к необходимости замены датчика давления датчиком температуры.

■ По потоку. В водоснабжении или ирригации иногда требуется обеспечить постоянство протока. Например, может меняться перепад высот между насосной станцией и приемником жидкости, в этом случае давление на выходе насоса будет переменным. Такой вид обратной связи также необходим в некоторых системах охлаждения, разбрызгивателях и системах мойки, где необходимо подать определенный объем жидкости, несмотря на возможные изменения параметров гидросистемы. В основном они меняются по нескольким причинам: изменение уровня жидкости в заборном баке, приводящее к снижению входного давления, увеличение гидродинамического сопротивления трубопроводной системы из-за загрязненности фильтров или образования «пробок» и т.д. Для обеспечения стабилизации используется датчик протока, обычно устанавливаемый на отходящую от насоса линию.

Установка подобной системы контроля дает следующие преимущества:

- Снижение потребления электроэнергии, и, следовательно, и ее стоимости за счет ухода от неэффективных методов регулирования и других устаревших устройств, например, двухскоростных двигателей.
- Лучшее управление и точность результатов стабилизации давления или протока.
- Уменьшение шумов и вибраций, т.к. инвертор позволяет обеспечить плавное изменение скорости вращения двигателя и предотвращает работу насосов и вентиляторов в резонанс с трубопроводной арматурой.
- Увеличение срока эксплуатации и надежности оборудования. Для насосов работа в прерывистом режиме сильно сокращает срок службы.
- Упрощение трубопроводной системы (удаление заслонок, клапанов-регуляторов и байпасных линий)
- Мягкий старт/стоп электродвигателей снижает негативный эффект от переходных процессов в электрической сети и механических частях насосов или вентиляторов. Это также значительно снижает уровень гидроударов в насосах, т.к. частотный преобразователь обеспечивает плавное, а не скачкообразное изменение производительности.
- Уменьшенный объем сервисных работ.

	Без частотного преобразователя	С частотным преобразователем	Экономия	Экономия, %
<b>Средняя потребляемая мощность (2 двигателя на насос)</b>	104 кВт на двигатель	40 кВт на двигатель	64 кВт на двигатель	62%
<b>Стоимость электроэнергии на насос</b>	3 420 руб. на тонну протока	1 315 руб. на тонну протока	2 105 руб. на тонну протока	
<b>Выбросы CO<sub>2</sub></b>	459 т/год	175,5 т/год	283,5 т/год	
<b>Стоимость работы в год.</b>	1 737,2 тыс. руб.	664,4 тыс. руб.	1 072,8 тыс. руб.	
<b>Срок окупаемости</b>		10 месяцев при использовании собственных средств 14 месяцев при использовании заемных средств		

**Рис. К18.** Примеры экономии при применении частотных преобразователей с насосным оборудованием

Дополнительно, значительного сбережения электроэнергии можно достичь простой сменой передаточного числа в насосе или вентиляторе для того, чтобы электродвигатель работал в более подходящем режиме. Это решение не даст гибкости как с системой изменения скорости вращения двигателя, но материальные затраты на него значительно ниже, и часто оно может быть реализовано за счет бюджета на сервисное обслуживание, что не требует одобрения руководства компании на капитальные вложения.

## 4.3 Освещение

Расходы на освещение, в зависимости от рода деятельности, составляют более 35% общего потребления электроэнергии в зданиях. Система управления освещением является наиболее простым способом снижения энергетических затрат с низкими начальными вложениями, поэтому применяется достаточно широко.

### Лампы и пускорегулирующие устройства

Нормы освещения для коммерческих зданий четко стандартизированы. Освещение должно нести не только функциональную нагрузку, но и обеспечивать безопасность для зрения работающего персонала. В большинстве случаев освещение офисных зданий избыточно, поэтому энергосбережение может быть осуществлено за счет пассивных мер: устранения избыточных светильников, замены старых ламп накаливания современными энергосберегающими с электронными дросселями. В основном, это даст положительный результат в помещениях, где освещение требуется постоянно или в течение достаточно продолжительного времени, т.к. в этом случае экономия за счет выключения света неприменима. Сроки окупаемости подобных мер имеют достаточно большой разброс, но в большинстве случаев составляют порядка двух лет.

В зависимости от требований, типа и возраста системы освещения, возможно использование более эффективных светильников. Для примера, 40 ка ваттные лампы дневного света T12 могут быть заменены современными 32 х ваттными лампами T8 (Т означает лампу цилиндрической формы, а число — ее диаметр в восьмых частях дюйма, таким образом, диаметр лампы T12 составляет около 3,8 см, но стандарты в разных странах могут отличаться). Замена люминесцентной лампы также влечет за собой замену пускорегулирующей арматуры (дросселя).

Лампы дневного света накачаны специальным газом, излучающим ультрафиолетовое излучение под действием электричества. Фосфор, покрывающий внутреннюю поверхность лампы, преобразует спектр света из ультрафиолетового в видимый. Для зажигания и управления течением электрического разряда в лампе дневного света применяется пускорегулирующая арматура светильников, которая стабилизирует ток внутри лампы, чтобы обеспечить необходимый уровень светового потока. Пускорегулирующая аппаратура также используется в светильниках с дуговыми или ртутными лампами. Энергопотребление современных конструкций светильников с электронными дросселями потребляют меньше электроэнергии по сравнению со старыми, оснащенными электромагнитными дросселями. Светильники с лампами T8 и электронной пускорегулирующей арматурой используют на 32-40% меньше электроэнергии, чем светильники с лампами T12 и электромагнитными дросселями.

У электронной пускорегулирующей арматуры есть один недостаток. Она работает на частотах от 20 до 60 кГц, в то время как электромагнитные дроссели — на частоте 50 или 60 Гц, поэтому применение электронной арматуры может стать причиной возникновения высокочастотных помех в питающей сети. Это может привести к перегреву или сокращению срока эксплуатации трансформаторов, двигателей, нулевых проводников, появлению высоковольтных разрядов и повреждению электронных приборов.

Обычно таких проблем не возникает, за исключением крупных зданий с высоким уровнем освещенности с очень большим количеством электронной пускорегулирующей аппаратуры. Как правило, производители светильников с электронной арматурой включают в нее пассивные фильтры, которые позволяют снизить коэффициент несинусоидальности (отношение действующего значения высших гармонических к действующему значению первой гармоники) до уровня менее 20%.

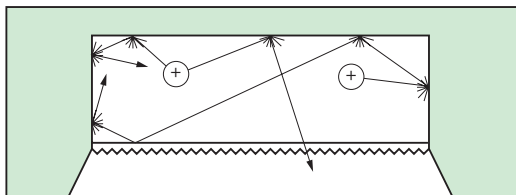
Если в здании требуется высокое качество напряжения питающей сети, например для больниц, производственных помещений с чувствительным оборудованием и т.д., существует электронная пускорегулирующая аппаратура с коэффициентом несинусоидальности менее 5%.

Существуют и другие типы ламп, которые могут быть использованы в зависимости предназначения здания. При выборе типа светильников следует тщательно проанализировать характер работ в помещении и необходимые значения освещенности и цветовой температуры. Большинство старых светильников были разработаны для большей освещенности, чем требуется современными стандартами. Экономии энергии можно достичь за счет изменения системы освещения для обеспечения минимального необходимого уровня освещенности.

Применение эффективных ламп дневного света с электронными пускорегулирующими устройствами имеет целый ряд преимуществ: они потребляют меньшее количество электроэнергии, более надежны, что ведет к снижению эксплуатационных расходов, обеспечивают достаточный уровень освещенности для офисных помещений и лучшую цветовую температуру, создающую более комфортную обстановку. Кроме того, у современных ламп отсутствует «мерцание», часто становившееся причиной мигреней и усталостей глаз у работающего персонала.

### Отражатели

Еще одной возможностью пассивного энергосбережения, которая должна использоваться совместно с заменой ламп и пускорегулирующей аппаратуры, является замена отражателей светильников. Отражатель в светильнике служит для направления света от лампы в необходимую сторону. В настоящее время выпускаются отражатели из современных материалов и более качественной конструкции, которые можно установить в уже существующие светильники. Данная мера приведет к увеличению полезного светового потока, что может дать возможность сократить число работающих ламп без ущерба для освещенности помещения.



**Вверху:** До 70% светового потока лампы дневного света направлено в стороны и вверх от освещаемой поверхности;

**Внизу:** Форма отражателя KW/2 сделана так, чтобы отразить максимально возможную часть светового потока вниз

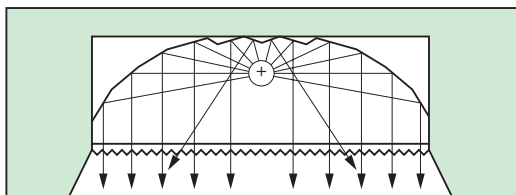


Рис. K19. Принцип работы отражателя KW/2

Современный отражатель KW/2 обладает спектральной эффективностью более 90%. Это означает, что две лампы могут быть заменены одной и позволяет снизить стоимость энергетических затрат на освещение на 50% и более. Существующие светильники могут быть переоборудованы этими высокотехнологичными отражателями, сохраняя существующее расстояние между ними, что делает подобную замену простым и эффективным решением, практически не изменяющим дизайн потолка.

### Управление освещением

Дополнительным методом, позволяющим сократить потребление электроэнергии на освещение, является установка системы управления светильниками. Следующие рекомендации не могут применяться во всех случаях, но имеют достаточно короткий срок окупаемости – от 6 до 12 месяцев. Сами по себе пассивные методы энергосбережения, такие как установка энергосберегающих ламп, электронных дросселей и новых рефлекторов, не может максимально снизить затраты, т.к. даже энергосберегающие лампы, оставленные включенными, когда не требуется, по-прежнему напрасно расходуют электроэнергию. Забывчивость людей делает применение активного контроля и управления освещением более эффективным решением, чем стимулирование и обучение персонала. Главным назначением подобных систем является, как и у любых других мер активного энергосбережения, без ущерба для производственного процесса или комфорта людей выключать свет, когда в нем нет необходимости. Алгоритм управления освещением может сильно меняться в зависимости от требований и условий.

Некоторые методы управления, применяемые на практике:

- Свет выключается таймером через определенный интервал после включения. Применение таймеров наиболее подходит к помещениям, где люди находятся строго определенное время, например, коридоры отелей, где заранее известно время, за которое человек дойдет до номера.
- Свет управляется по сигналу датчика присутствия или движения, когда в помещении не наблюдается движения человека в течение определенного времени. Датчики присутствия наиболее подходят для офисов, магазинов, лестниц, кухонь и санузлов, где заранее неизвестно, сколько времени люди будут находиться там.
- Фотоэлементы и датчики освещенности, устанавливаемые вблизи окон. Свет выключается или приглушается, когда дневное освещение становится достаточным для этого.
- Программируемые таймеры для включения и выключения света в определенное время (наружная реклама или дежурное освещение офисных помещений, которые выключаются по ночам и на выходные).
- Приглушение света, чтобы снизить уровень освещенности при необходимости, например, парковка, которая должна быть ярко освещена в пиковое время (например, до полуночи), а в другое время уровень освещенности может быть снижен.
- Регуляторы напряжения, чтобы оптимизировать потребление энергии. Электронная пускорегулирующая аппаратура может снизить уровень отдачи ламп дневного света. Сейчас также выпускаются регуляторы напряжения для других видов ламп, например, натриевых ламп высокого давления.

K19

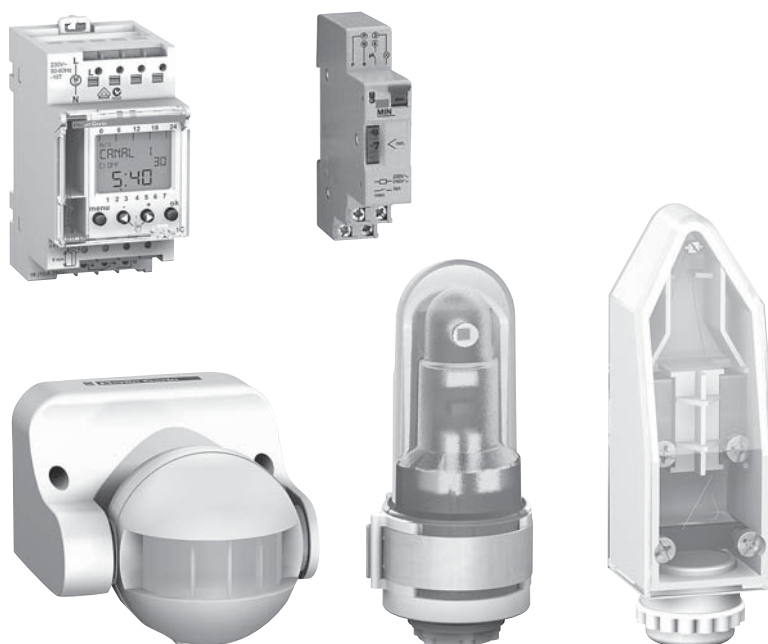


Рис. K20. Примеры устройств управления освещением: таймеры, датчики освещенности, датчики движения и т.д.

Методы управления освещением могут объединяться, например, система уменьшения уровня освещенности на автостоянке может использовать датчики движения или выключатель с таймером отключения, чтобы была возможность увеличить уровень освещенности, если кто-то появится на стоянке в необычное время.

Сложные и гибкие алгоритмы управления освещением могут быть реализованы с использованием стационарно установленной системы управления. Могут быть учтены и дизайнерские ходы в освещении, например, установка программируемых панелей управления и запись различных алгоритмов работы освещения, запускаемых одним нажатием кнопки. Подобное полезно, например, в конференц-залах, требующих различного освещения для проведения встреч, презентаций, демонстраций и т.д. А современные беспроводные технологии позволяют сделать управление простым и легким для пользователей.

Системы управления освещением, например C-Bus и KNX, предлагают дополнительное преимущество – возможность подключения к сети и интеграции в общую систему управления зданием, что делает управление более гибким с возможностью центрального мониторинга и контроля, а также объединения управления освещением совместно с другим оборудованием здания, например с климатической системой, для сбережения большого объема электроэнергии.

Установка системы управления освещением позволяет сэкономить до 30% энергии, но это сильно зависит от каждого конкретного случая. Обследование системы освещения совместно с энергетическим аудитом помогает найти наилучшее решение для обеспечения всех видов мероприятий и работ, проводимых в помещении или здании, а также выявить основные возможности по энергосбережению. Дополнительно к внутреннему освещению, Schneider Electric предлагает готовые решения для уличного освещения территории, стоянок и т.д. и подсветки для обеспечения оптимального уровня энергопотребления.

## 4.4 Стратегия распределения нагрузки по времени

На сегодняшний день накопление электроэнергии в достаточно больших объемах экономически нецелесообразно, а зачастую и технически невозможно, поэтому электроэнергия должна вырабатываться в четком соответствии с ее потреблением. В связи с этим поставщики электроэнергии вынуждены обеспечивать уровень генерируемой мощности равной максимальной нагрузке, которая не так часто встречается. В остальное время энергия может быть излишней и невосребованной, напоминая капитал, замороженный в неиспользованном оборудовании промышленных предприятий. По этой причине поставщикам электроэнергии выгодно сглаживать пики потребления. Распределение нагрузки по времени является активным подходом к энергосбережению, т.к. даже высокотехнологичные устройства могут создавать максимумы потребления.

### Недопущение пиковой нагрузки

Одним из способов, которым энергетические компании заставляют потребителей избегать пиков в потреблении, заключается в том, что затраты на поддержание потенциально высокой мощности генерации электроэнергии перекладываются на тех, кто создает наиболее большой разброс потребляемой мощности. Счета за электроэнергию состоят из нескольких статей расходов. Одной из них является реально потребленная электроэнергия, другая (максимально допустимая мощность) обычно рассчитывается исходя из пиковой мощности потребления в предыдущий период, который может составлять год или квартал. Счета за максимально допустимую мощность выставляются компаниям с достаточно большим энергопотреблением за то, что поставщик поддерживает избыточный уровень генерации энергии и содержит необходимую инфраструктуру для обеспечения максимально возможного потребления в любое время, даже если это требуется достаточно редко. Если потребителю удастся избежать пиков в потреблении электроэнергии, он может избежать дополнительных затрат за максимально допустимую мощность потребления, даже если фактическое потребление останется на том же уровне. Следует заметить, что резкое единоразовое увеличение мощности потребления электроэнергии заставляет нести дополнительные затраты в течение долгого времени, т.к. это поднимает плату за максимально допустимую мощность не только в следующем месяце, но и в последующий период времени, определяемый тарифом, доходящий до года. Это означает, что единоразовый всплеск потребления, продолжительностью пусть и несколько минут, может иметь достаточно долгие последствия в счетах за электроэнергию.

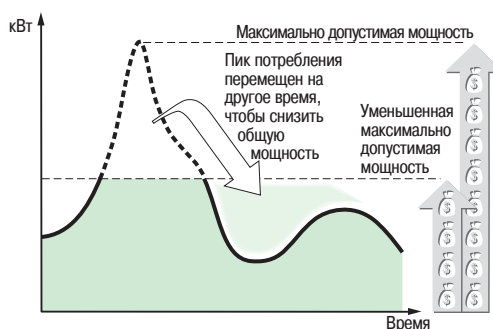
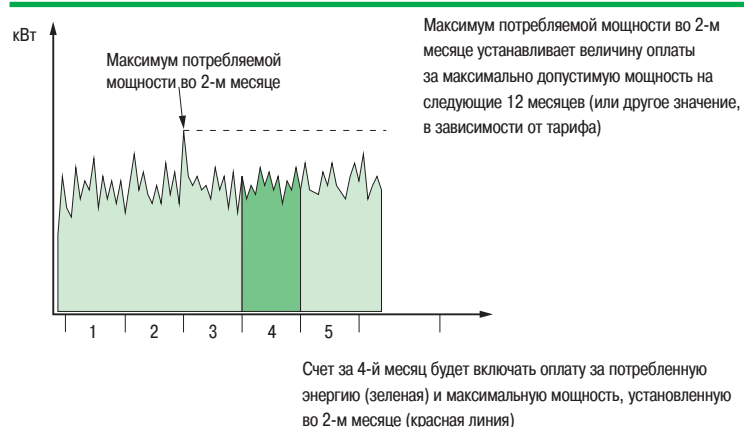


Рис. К21. Пример стратегии распределения нагрузки по времени

Для снижения всплесков потребления электроэнергии применяются автоматические системы управления и распределения электроэнергии, построенные на программируемых логических контроллерах. Максимально допустимая мощность рассчитывается как точное значение потребления электроэнергии за определенный промежуток времени, например, кВт·ч за 15 минут. Целью управления является удержание общего потребления электроэнергии в любой такой промежуток времени ниже определенного уровня. Если потребитель расходует больший объем энергии за один из временных интервалов, система определяет это как назревающий пик потребления. В этом случае включается сигнал тревоги и, если диспетчер не предпримет определенных действий, система контроля начинает отключать неважные нагрузки в заранее установленном порядке до тех пор, пока состояние тревоги не будет сброшено или не закончится временной отрезок. Все нагрузки потребителя разделяются на три категории: критические, важные и неважные. Обычно отключаются только неважные потребители энергии, причем порядок отключения может быть запрограммирован заранее.



**Рис. К22.** Влияние максимальной потребляемой мощности на счет за электроэнергию.

Если у потребителя электроэнергии есть достаточное количество неважных нагрузок, чтобы воздействовать на всплески потребления, можно уменьшить плату за максимально возможную мощность на 10-30%, которая может составлять до 60% от общей суммы счета за электроэнергию. Установка подобной системы обычно имеет срок окупаемости до года.

### Потребление по расписанию

Многим компаниям обычно предлагают тарифы на электроэнергию, зависящие от времени дня. Во время рабочего дня, тарифы максимальны. Многие пользователи переносят время включения нагрузок, чтобы воспользоваться более дешевым тарифом. Обычно это относится только к нагрузкам не требовательным к времени включения.

### Ограничение потребляемой мощности по требованию

Другая тактика недопущения создания пиков потребления — отключение нагрузок по запросу, что означает распределение и управление электроэнергией в зависимости от запросов пользователей с учетом возможностей питающей сети. Пользователям могут быть представлены определенные льготы, за то, чтобы они уменьшали потребляемую мощность, когда у сети нет возможности обеспечить электроэнергией всех потребителей. В основном такая ситуация возникает в наиболее жаркую погоду, когда обывателям и бизнесу необходима дополнительная мощность на вентиляцию и кондиционирование. В некоторых странах существуют специальные сторонние компании, которые анализируют параметры электрической сети и определяют цену электроэнергии в каждый момент. Потребителям, согласившимся на отключение нагрузки при необходимости, предоставляются определенные льготы, а у поставщика появляется дополнительная энергия, которую можно продать. В любом случае у такой компании должен быть договор с потребителем, который должен сократить энергопотребление до заранее определенного уровня по первому требованию поставщика. Подобные контракты могут содержать как аварийные схемы потребления (потребитель должен уменьшить нагрузку под угрозой высоких штрафов) и опционные (снижение потребления стимулируется материально, а потребитель решает сам насколько ему необходимо снизить нагрузку). Обычно контракты лимитируют продолжительность ограничений в пределах 2-х — 4-х часов и количество подобных ограничений (от 3-х до 5-ти) в год. У промышленности больше возможностей по применению указанной схемы, в то время как офисные или жилые строения не могут резко сократить энергопотребление без существенного влияния на комфорт находящихся в них людей. Уведомление о необходимости ввода ограничения потребления электроэнергии поступает по телефону или автоматически с узла учета и мониторинга. Обычно оно приходит заранее, за 30-60 минут до момента, когда необходимо снизить потребляемую мощность. После получения уведомления потребитель либо вручную, либо при помощи программируемой автоматики последовательно отключает или сокращает энергопотребление своих нагрузок до достижения требуемого уровня. После этого автоматика узла учета и мониторинга или диспетчерская служба поставщика электроэнергии начинает отсчет времени ограничения потребления энергии. После



его завершения та же автоматика или диспетчерская служба посылает уведомление о завершении режима ограничения, после чего потребитель электроэнергии может восстановить нормальную работу оборудования или производства.

Выгода от применения ограничения потребления электроэнергии зависит от конкретных условий и тарифов. Применяются различные варианты поощрения клиентов за использование подобной схемы. Если у потребителя имеется достаточное количество некритичных ко времени работы нагрузок, отключение которых позволяет избежать пика потребления в электросети, его выгода может составить до 30% от общей суммы.

Срок окупаемости систем автоматического снижения потребления электроэнергии, как правило, составляет менее одного года. Без использования автоматических систем отключение нагрузки приходится проводить вручную, что приводит к определенным рискам, например, если диспетчер не успеет отреагировать на введение режима ограничения за определенное время. Если потребитель, работающий по такой схеме, не ограничит потребление электроэнергии, на него будут наложены достаточно высокие штрафы. Таким образом, установка автоматизированной системы, позволяющей избежать всплеска потребления и обеспечить ограничение потребления энергии по запросу поставщика, является достаточно выгодным вложением материальных средств.

Совместное использование оборудования контроля и управления электросетью и веб-сайта снижения потребления по требованию, делает участие потребителя в схемах снижения нагрузки по запросу питающей сети более удобным. Подобный сайт дает возможность поставщику электроэнергии уведомить своих потребителей об аварийных или опционных ограничениях электроэнергии. Пользователи, узнав необходимость и условия опционного ограничения, могут проверить и проанализировать свое энергопотребление, и, в зависимости от различных условий, более оперативно принять или нет решение об опционном ограничении потребления электроэнергии. Подобный сайт также поддерживает функции аудита и записи прошедших событий, демонстрирующих функционирование сети.

### Генерация энергии по месту использования

Выработка электроэнергии непосредственно на производстве позволяет добиться определенной гибкости. Наличие локального генератора позволяет обеспечить электроэнергией нагрузки, которые были бы отключены для недопущения пика потребления или согласно схеме снижения потребляемой мощности по запросу поставщика. Автоматизированная система электрической сети предприятия может быть расширена для внедрения системы управления генераторными установками, включенными в единую электрическую сеть предприятия. Автоматическая система управления может быть запрограммирована для постоянного сравнения стоимости электроэнергии, предоставляемой энергетической компанией, со стоимостью энергии, вырабатываемой дополнительным источником энергии, например, автономным дизель-генератором. Если тариф поставщика электроэнергии выше стоимости энергии, вырабатываемой автономным генератором, автоматика переключает нагрузку на питание от локального источника энергии. Когда стоимость энергии от поставщика снижается, нагрузки автоматически переключаются на штатный режим работы, а генератор отключается. При этом надо учитывать, что в некоторых местах законодательно запрещено использование дизельных генераторов больше заранее определенного количества часов в год. Это сделано для сокращения выбросов вредных газов в атмосферу. Этот фактор также должен учитываться, т.к. он ограничивает возможности использования автономных генераторов.

## 4.5 Коррекция коэффициента мощности

Если энергетическая компания начисляет на потребителя штрафы за работу с низким коэффициентом мощности, установка компенсатора реактивной мощности может быть достаточно весомым фактором снижения затрат на электроэнергию. Установка компенсатора реактивной мощности относится к пассивным мерам по энергосбережению. Подобная мера требует только единовременных вложений, дополнительные текущие расходы, изменение технических процессов или дополнительная нагрузка на рабочий персонал не требуется. Обычно срок окупаемости компенсатора реактивной мощности составляет один год или менее.

Коррекция коэффициента мощности подробно описана в главе L.

## 4.6 Подавление высокочастотных помех

Большинство методов энергосбережения имеют побочные эффекты в виде высокочастотных помех в электрической сети. Высокоэффективные электродвигатели, частотные преобразователи, электронные дроссели для ламп дневного света и импульсные источники питания компьютерной техники могут создавать высокочастотные помехи в электрической сети, которые могут наносить достаточно серьезный вред. Высокочастотные помехи могут создавать переходные процессы с достаточно высокими скачками напряжения, приводящими к отключениям защитных устройств, что увеличивает время простоя. Кроме того, присутствие высших гармоник в питающей сети увеличивает нагрев и вибрацию нейтральных проводников, силовых трансформаторов, электродвигателей и генераторов, что приводит к их преждевременному выходу из строя. Конденсаторы коррекции коэффициента мощности также могут подавить высокочастотные помехи в электрической сети и предотвратить лишние перегрузки и преждевременный выход оборудования из строя.

Вопросы гармонического состава тока и напряжения в питающей сети обсуждаются в главе M.

### 4.7 Другие методы энергосбережения

Если рассмотреть проблему с другой стороны, не рассматривающей напрямую сбережение энергии, могут быть определенные меры экономии в зависимости от процессов и требований в каждом конкретном случае. Улучшение производительности, например устранение «бутылочного горла», устранение дефектов и уменьшение отхода материалов могут дать возможность сократить производственные расходы. Печи (тигельные, муфель, котлы) и системы нагрева и охлаждения (паровые системы, отопление, холодильники, чиллеры, сушилки) обладают потенциалом для экономии средств.

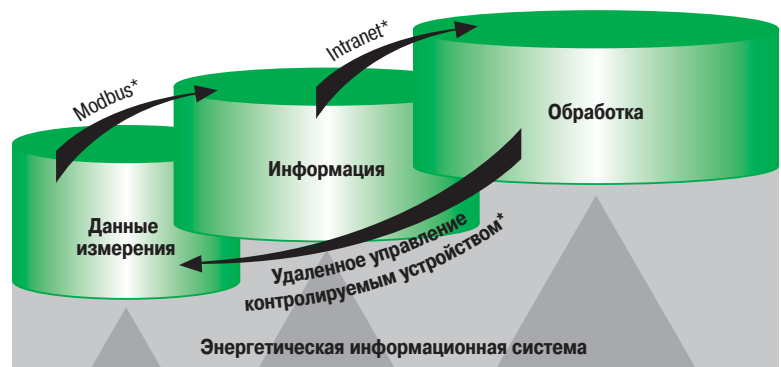
### 4.8 Информационная система

У большинства организаций уже установлена определенная часть информационной системы, несмотря на то, что она так не называется. Следует отметить, что в современном постоянно меняющемся мире любая разрабатываемая информационная система должна выполнять следующую функцию – обеспечивать управляющий персонал необходимым объемом информации. Подобная система в области энергетики должна обеспечивать сбор и отображение информации об энергетических параметрах на любом уровне организации с использованием современных каналов связи.

Объективные данные о распределении и расходе энергии могут стать преимуществом организации в конкурентной борьбе. В большинстве компаний уже работает IT персонал, задачей которого является обслуживание высокотехнологичных коммуникационных систем. Эти люди могут стать важными игроками при построении энергетической информационной системы, т.к. могут обеспечить возможность мониторинга и обмен данными в организации.

#### Коммуникационная сеть на уровне продукта, оборудования или организации

Структурная схема работы энергетической информационной системы представлена как замкнутая круговая диаграмма (см. **рис. K23**).



\* Сеть обмена данными

**Рис. K23.** Структура информационной системы

Различные устройства могут использоваться для сбора данных с измерительных и защитных модулей, установленных в распределительных щитах, например устройства Schneider Electric TransparentReady™.

K23



### Протокол обмена данных Modbus

Протокол обмена данными Modbus широко применяется для обмена данными в промышленном оборудовании, соединенном каналами связи, например RS 485, Ethernet (интерфейс TCP/IP) или модемным соединением (GSM, радиоканал и т.д.). Данный протокол широко используется в измерительных и защитных устройствах для электрических сетей.

Изначально созданный фирмой Schneider Electric, в настоящее время протокол Modbus является открытым стандартом, регулируемым независимой организацией Modbus-IDA, полностью открывающей разрабатываемые спецификации протокола. Являясь промышленным стандартом с 1979 года, протокол Modbus обеспечивает обмен данными между миллионами вариантов устройств. Специальная комиссия интернет разработок (IETF) одобрила выделение специального порта (502) в протоколе TCP/IP специально для обмена информацией между различными устройствами подключенных к Internet/Intranet сети с использованием протокола Modbus TCP/IP.

Протокол Modbus обеспечивает обмен информацией между двумя устройствами, используя структуру запрос-ответ, включающую в себя возможность чтения/записи (функции). Запрос создается единственным в сети сервером (master), ответ формируется и отправляется одним из клиентов (slave), к которому был адресован запрос (см. **рис. K24**).

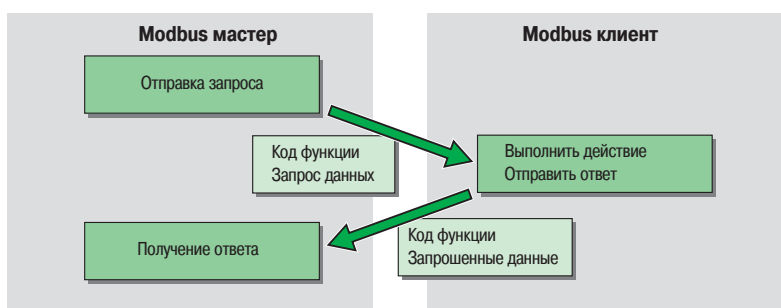
Каждому устройству-клиенту, подключенному к сети обмена данных с использованием протокола Modbus, присваивается свой идентификатор, называемый адресом клиента, принимающий значения от 1 до 247.

Мастер-устройство, например web-сервер, установленный в электрощите, постоянно отправляет запросы клиентским устройствам, содержащие их точный адрес, код функции, объем необходимой информации из памяти клиентского устройства и ее адрес. Запрос и ответ не могут превышать по размеру 253 байт каждый.

Отвечает на запросы мастер-устройства только тот клиент, которому адресован запрос. Обмен данными всегда инициируется мастер-устройством (в данном случае web-сервером). Подобная архитектура обмена данных называется режимом Master-Slave протокола Modbus.

Структура запрос-ответ подразумевает, что мастер-устройство сможет получить всю необходимую ему информацию от клиентского устройства, после того как отправит запрос.

Мастер-устройство может успешно обрабатывать запросы и ответы только в случае полной совместимости всех устройств в сети. Также можно посчитать максимальное количество устройств, подключенных к мастеру, чтобы обеспечить приемлемое время ответа на запрос, особенно по низкоскоростному интерфейсу RS 485.



**Рис. K24.** Коды функций позволяют отправлять или получать данные. Программная проверка ошибок передачи CRC16 позволяет повторить обмен данными в случае их повреждения при передаче и обеспечить передачу ответа только устройством, которому был адресован запрос

### Intranet сеть

Обмен данными в промышленности обычно налаживается через существующую корпоративную сеть организации с использованием современных web технологий.

Современная IT технология обеспечивает совместимость и независимость работы различных задач: организации используют корпоративную IT сеть для работы с офисными приложениями, печати документов, резервного копирования данных, контроля доступа, управления производством, бизнес планирования, удаленного доступа и т.д. При этом работа многочисленных различных программных продуктов с использованием одной и той же сети передачи данных не представляет какихлибо технических проблем.

Если в организации уже есть некоторое количество компьютеров, серверов и принтеров, соединенных в локальную сеть, используя широко распространенный интерфейс Ethernet, то в этом случае возможна быстрая установка информационной системы, позволяющей получать энергетическую информацию от оборудования, установленного в электрощитах распределительной сети. При этом не требуется специальное программное обеспечение — достаточно обычного интернет браузера.

Информация от измерительного оборудования передается по стандартным сетям Ethernet на скорости до 1 Гб/сек. Для построения таких сетей передачи данных обычно используются медная витая пара или оптоволоконный кабель, с помощью которых можно обеспечить подключение устройств в любых точках коммерческих или промышленных зданий.

Если в организации создана Intranet локальная сеть для электронной почты или совместного использования данных, то в подавляющем большинстве случаев используется наиболее распространенный протокол TCP/IP.

Протокол передачи данных TCP/IP был разработан для широко использующихся web сервисов, таких как HTTP, чтобы получать доступ к web-сайтам, SMTP для передачи электронных сообщений и т.д.

Сервис	SNMP	NTP	RTPS	DHCP	TFTP	FTP	HTTP	SMTP	Modbus				
Протокол	UDP					TCP							
Соединение	IP												
Интерфейс	Ethernet 802.3 или Ethernet II												

Данные электрических измерений, записанные промышленным web-сервером, установленным в электрическом щите, могут быть просмотрены с использованием стандартного протокола TCP/IP в существующей сети передачи данных, что позволяет максимально снизить затраты на создание и содержание сети. Этот принцип используется оборудованием Schneider Electric Transparent Ready™ для обеспечения передачи данных по энергоэффективности. Оборудование электрического щита автономно и не требует установки каких-либо дополнительных IT систем или компьютера. Все данные, относящиеся к энергоэффективности, записываются и могут быть получены привычным способом через интернет, GSM-, телефонный и прочие каналы связи.

### Безопасность

Установка системы мониторинга позволяет ответственному персоналу быть более информированным и обеспечивает большую безопасность труда, т.к. работникам больше не требуется получать доступ в электрические щиты и осуществлять стандартные проверки электрического оборудования — надо просто просмотреть данные измерений. В этих условиях коммуникационные системы дают работникам компании определенные преимущества и уверенность, что они не допустят ошибок. Кроме того, использование систем мониторинга позволяет электрикам, механикам, постоянному и приходящему персоналу работать в одной команде в полной безопасности.

В зависимости от секретности данных, IT специалист просто присваивает определенные права доступа для каждого конкретного работника.

### Обслуживание локальной сети

В распоряжении IT специалистов компании есть все технические возможности для добавления и последующего контроля устройств в локальной сети организации.

В связи с тем, что системы мониторинга используют широко распространенные web стандарты передачи данных, частным случаем которых является протокол Modbus TCP/IP, а также то, что они спроектированы с использованием современных, защищенных от вирусов, технологий, IT специалистам не требуется дополнительно заботиться об обеспечении производительности и безопасности (вирусы, взлом) локальной сети в связи с установкой системы мониторинга.

### Возможность работы со сторонними организациями

При необходимости, учитывая вопросы конфиденциальности, можно привлекать к наблюдению за параметрами электрической сети партнеров по энергосистеме: поставщиков электроэнергии, монтеров, строителей, проектировщиков или службы Schneider Electric. В случае установки системы мониторинга появляется возможность удаленного наблюдения, анализа и, при необходимости, консультаций для энергопотребляющих компаний. Существующее web-оборудование позволяет отправлять собранные данные по электронной почте или через web-страницы для получения дополнительных консультаций.

## От мониторинга и управления электрическими сетями к интеллектуальному оборудованию

Уже много лет системы управления и телеметрии строятся на базе автоматических централизованных SCADA систем. Установка подобных систем (п. 3 рис. K25) применяется только в особых случаях в связи с высоким энергопотреблением и чувствительностью к качеству питания. Основанные на технологиях автоматизации, SCADA системы обычно разрабатываются и внедряются специалистами по системной интеграции. Высокая стоимость, необходимость наличия персонала высокого класса для работы с подобными системами, стоимость модернизации при изменении схемы энергоснабжения обычно отпугивает потенциальных пользователей. Другой вариант (п. 2, рис. K25) может быть более гибко и быстро внедрен в соответствии с требованиями электротехнического персонала и имеет гораздо меньший срок окупаемости. Тем не менее, в связи с применением централизованной архитектуры системы, ее стоимость также может оказаться достаточно высокой.

В некоторых случаях варианты 2 и 3, представленные на рис. K25, могут сосуществовать, предоставляя наиболее точную информацию для электротехнического персонала.

В настоящее время доступен еще один вариант информационной системы (п. 1, рис. K25). Он представляет собой начальный этап внедрения вариантов 2 и 3, но при этом вполне работоспособен и обладает достаточной функциональностью.

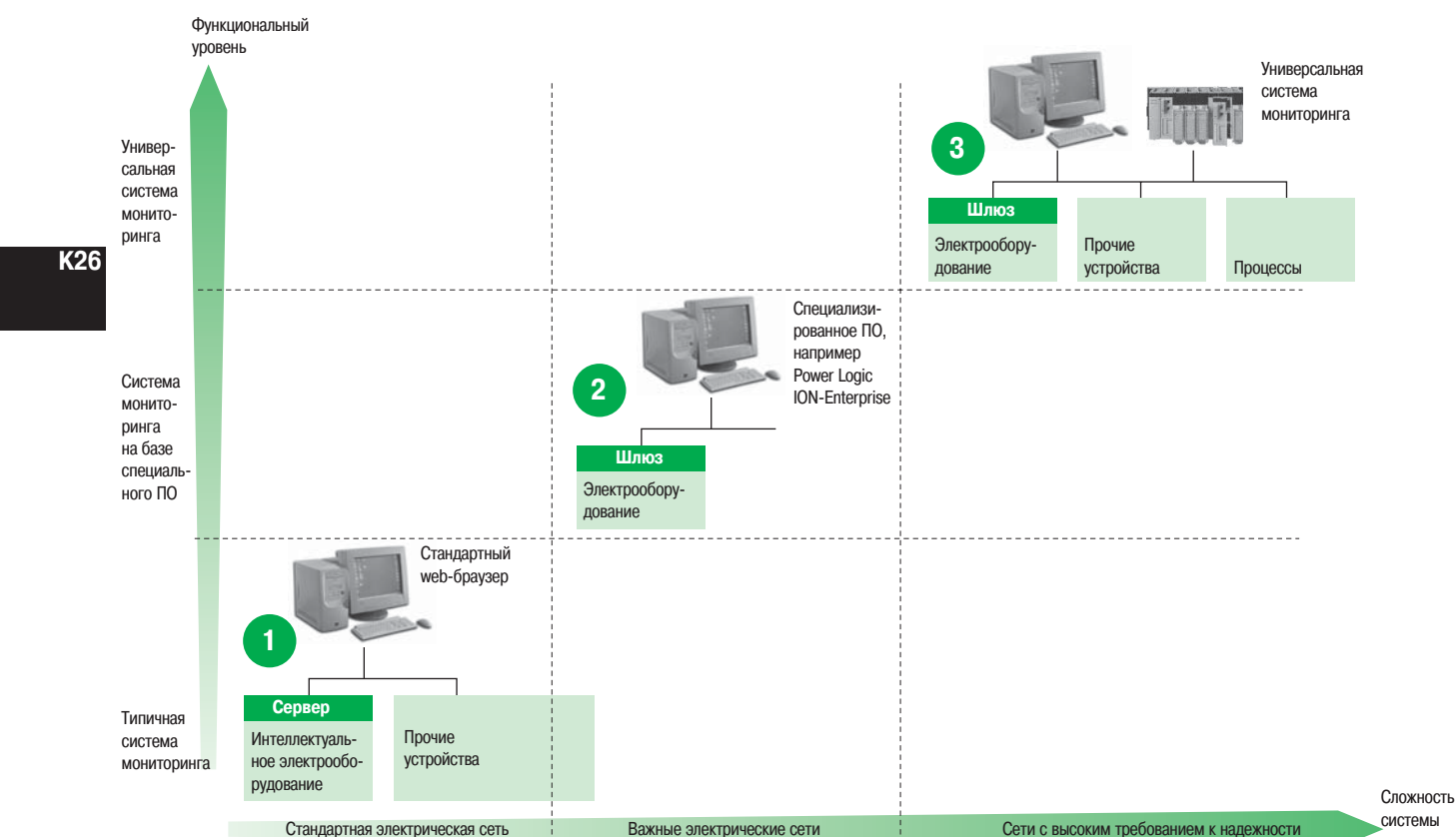


Рис. K25. Классификация систем мониторинга

## ■ Уровень 1

### Интеллектуальная система телеметрии и управления (рис. K26)

Основанный на современных web технологиях, данный вариант системы появился достаточно недавно и является начальной точкой глобальных систем диспетчеризации. Из-за использования широко распространенных web технологий, появляется возможность максимально возможно использовать существующие разработки в области коммуникаций и существующее бесплатное программное обеспечение.

При использовании интеллектуальной системы телеметрии и телемеханики, электротехнический персонал может получить доступ к параметрам электрической сети в любой точке организации, что дает целый ряд преимуществ.

При необходимости доступ к параметрам может быть получен через интернет из любой точки мира.

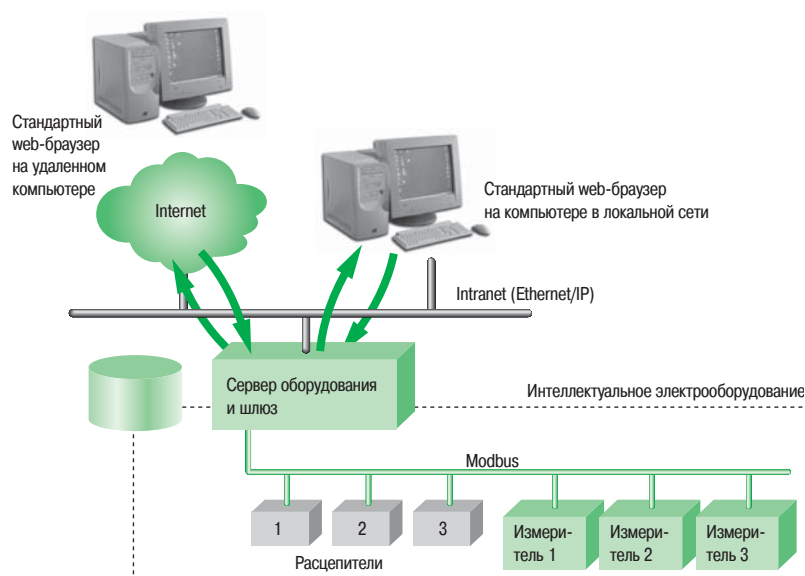


Рис. K26. Архитектура интеллектуальной системы управления и телеметрии

## ■ Уровень 2

### Специализированная система телеметрии и управления (рис. K27)

Предназначенная для электротехнического персонала, эта система представляет собой централизованный сервер, на котором могут быть отражены все необходимые параметры для каждой конкретной конфигурации электрической сети. Указанная архитектура информационной системы требует более низкого уровня квалификации рабочего персонала по сравнению с приведенной выше. Все существующие распределительные устройства включены во встроенную библиотеку элементов, поэтому система может быть легко настроена для работы с любой конфигурацией электрической сети. Кроме того, начальная стоимость подобной системы минимальна, т.к. не требует проектирования и внедрения специалистом высокого класса.

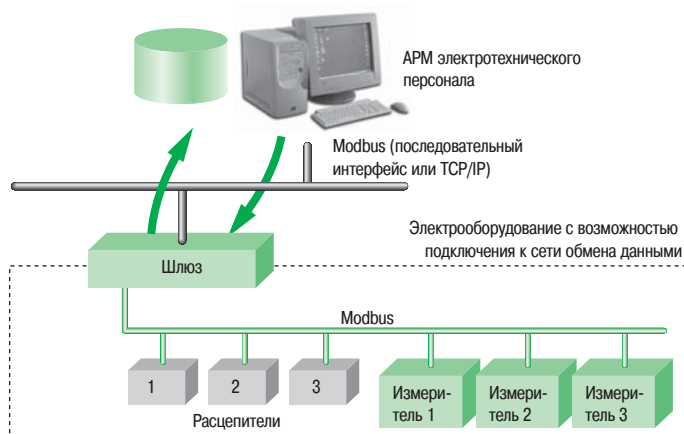


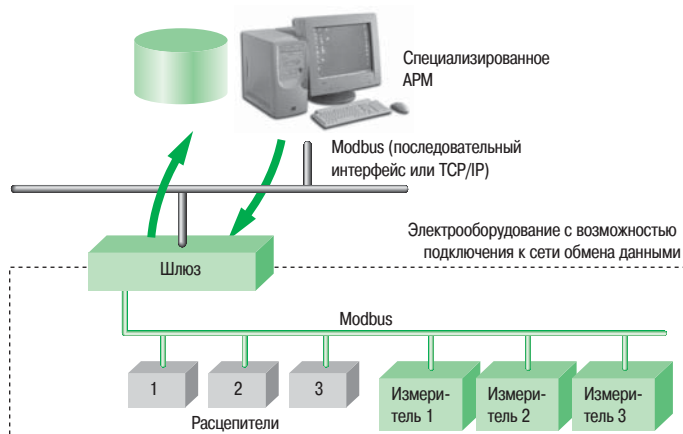
Рис. K27. Специализированная система телеметрии и управления

## ■ Уровень 3

**Универсальная централизованная система телеметрии и управления (рис. К28)**

Данный вариант представляет собой систему, основанную на стандартных устройствах автоматизации, таких как SCADA, и шлюзах. Обычно этот вариант используется в случаях, когда крайне необходимо обеспечить бесперебойность питания. В этом случае надежность электросистемы является крайней необходимостью и может быть обеспечена либо автоматически, либо за счет наличия на объекте круглосуточного дежурного персонала. Для обеспечения максимальной надежности, такие системы часто строят с учетом того, что они должны выдерживать без видимого эффекта как минимум один отказ оборудования, такого как SCADA или коммуникационный модуль.

Энергоэффективность также является важным фактором, и устанавливаемая система должна предоставлять возможность управлять распределением электроэнергии и контролировать ее качество. Также эта система должна обеспечивать необходимую электрическую защиту, чтобы предотвратить любое повреждение дорогостоящего электротехнологического оборудования. Кроме того, часто необходим обмен информацией с автоматизированными системами управления оборудованием, особенно через удаленное управление двигателями среднего и низкого напряжений. Наиболее подходящей для указанных условий кажется система PowerLogic SCADA (Modbus или IEC 61850 совместимые).



**Рис. К28.** Универсальная система телеметрии и управления реального времени

**Электронная поддержка**

Установка информационной системы для улучшения энергоэффективности очень быстро оправдывает себя материально. Срок окупаемости подобных систем в области электроэнергетики обычно составляет менее 2 х лет.

Дополнительным, недооцененным на сегодняшний день, преимуществом информационных систем является использование современных коммуникационных технологий в электроэнергетическом секторе — появляется возможность удаленного регулярного мониторинга и анализа электрической сети сторонними организациями через интернет, что позволяет решить следующие проблемы:

- Заключение контракта на поставку электроэнергии. Обладая достаточным объемом информации, можно провести экономический анализ потребления электроэнергии и, в зависимости от него, произвести смену поставщика электроэнергии или тарифа. При этом нет необходимости ждать годового отчета о потреблении энергии
- Контроль электрических параметров через интернет. Параметры электрической сети организации преобразуются в относительные величины и могут быть просмотрены на специальной web странице широким кругом потребителей, что позволяет более рационально планировать нагрузку и проводить анализ распределения мощности
- Комплексная диагностика неисправностей в электрической сети, необходимая для технического специалиста. Подобная функция редко доступна через интернет
- Мониторинг потребления электроэнергии и предупреждение в случае возникновения неожиданных всплесков потребления
- Снизить стоимость эксплуатационных расходов, часть из которых перестает быть необходимой

K28

Повышение энергоэффективности больше не проблема, с которой организации сталкиваются самостоятельно. Существуют организации, готовые помочь в ее решении, когда в этом возникнет необходимость. Главным условием подобной помощи обычно является наличие результатов измерений в электрической сети организации и их доступность через интернет.

Внедрение информационной системы может быть разбито на этапы. Сначала могут быть оснащены ключевые места электрической сети. Постепенно набор средств измерения и управления может расширяться, делая систему более точной и увеличивая количество точек контроля.

Компании предоставляется выбор: привлечь стороннюю организацию для анализа данных электрической сети, провести анализ самостоятельно или воспользоваться обоими вариантами одновременно.

Также организация сможет выбрать: либо самостоятельно контролировать электрическую сеть или привлечь стороннюю организацию для контроля качества электроэнергии и нагрузки на электрическую сеть с целью увеличения срока службы оборудования.

*Пример: Schneider Electric предлагает электронные средства для визуализации нагрузки и анализа цены электроэнергии. Это упрощает задачи собственников недвижимости, географически расположенных в различных местах, обеспечивая понятной информацией о стоимости и использовании энергии для всех географических положений. Система преобразует данные о потреблении энергии пользователем в понятную информацию доступную всем внутренним пользователям. Она позволяет контролировать расходы, демонстрируя клиентам как они используют энергию.*

Система должна обеспечивать различную функциональность, как то:

- доступ к данным энергопотребления и их анализ,
- прошлые и ожидаемые счета,
- сравнение тарифов,
- анализ затрат в случае изменения схемы работы, например, изменения времени работы нагрузок, снижения потребления на известную величину и т.д.
- автоматическое оповещение о тревоге
- сохранение отчетов
- определение эффективности потребления энергии, приведенной к другим величинам, например, площади помещений, времени работы, единиц выпущенной продукции и т.д.
- данные о потреблении дополнительных услуг, помимо электроэнергии: газа, воды и т.д.

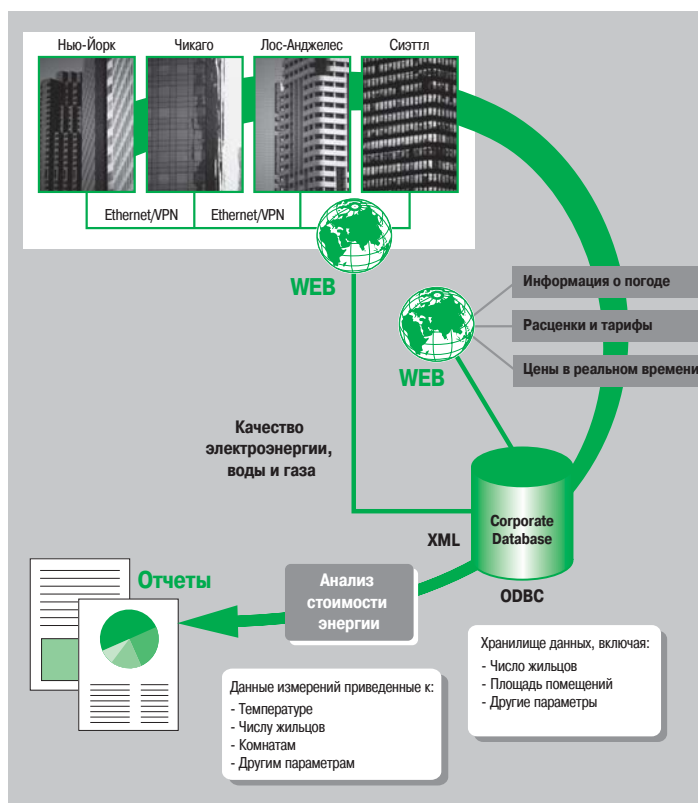


Рис. К29. Пример типового решения

4.9 Таблица решений по энергосбережению

	Энергосбережение	Оптимизация стоимости	Повышение надежности и срока службы
Частотные преобразователи	***	*	*
Высокоэффективные двигатели и трансформаторы	***		
Источники питания двигателей среднего напряжения	***		
Коррекция коэффициента мощности	*	***	
Подавление высокочастотных помех	*	**	*
Конфигурация цепей			***
Резервные генераторы		**	***
Источники бесперебойного питания (см. стр. N11)			***
Пусковые устройства	*	*	***
Координация защиты			***
Щиты управления двигателями		**	**
Интеллектуальная система телеметрии и телемеханики (уровень 1)	**	*	
Специализированная система телеметрии и телемеханики (уровень 2)	***	**	*
Универсальная система телеметрии и телемеханики (уровень 3)	*	**	***

Рис. К31. Таблица решений по энергосбережению

K30

IPMVP (International Performance Measurement & Verification Protocol – международный протокол по контролю и верификации экономии финансовых средств) – методика оценки сбережения энергии. Информация этой главы взята из справочника IPMVP, т. 1, выпущенного EVO ([www.evo-world.com](http://www.evo-world.com))

## 5.1 Введение в IPMVP и EVO

В настоящее время как никогда проявляется интерес к технологиям энергосбережения как в производственной, так и в бытовой сфере. Следует отметить, что самым большим препятствием к широкому внедрению энергосберегающих технологий является невозможность оценки материальной выгоды. Чем большие вложения требует проект, тем большую отдачу он должен обеспечить. По этой причине были разработаны методики расчета экономического эффекта от внедрения современных энергосберегающих технологий.

Именно по этой причине организация по оценке эффективности (EVO) выпустила справочник IMPV – международный протокол по контролю и верификации экономии финансовых средств – методику, описывающую общую практику измерения, расчета и анализа сбережения материальных средств для конечных пользователей.

Первое издание IPMVP было выпущено в марте 1996 г., а второе – в 2004 г. К настоящему времени EVO выпустила уже 3 тома IPMVP:

- Том 1: Принципы определения сбережения энергии и воды
- Том 2: Задачи создания комфорта внутри помещений
- Том 3: Прикладные задачи

Первый том IPMVP используется Schneider Electric для оценки эффективности энергосберегающих мероприятий. Этот справочник предлагает методы с различными уровнями стоимости и точности для расчета экономического эффекта при внедрении энергосберегающих технологий как для отдельного проекта, так и целого комплекса.

Также в справочнике IPMVP определяется методика энергетического аудита (M&V Plan), определяющая действия, необходимые для определения экономического эффекта от модернизации производства.

## 5.2 Принципы и методики оценки сбережения энергии

### Принципы оценки энергосбережения

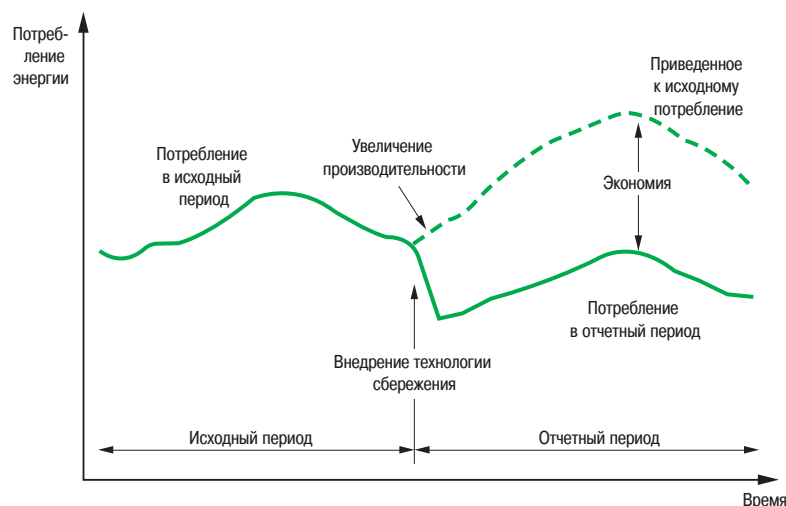


Рис. К31. Принцип определения исходного периода

Перед внедрением энергоэффективной технологии, необходимо определить временной интервал для расчета отношения потребления энергии к условиям производства (количеству выпущенных изделий и т.п.). Данный период времени называют исходным интервалом. В течение исходного интервала производятся измерения потребляемой энергии или, что более просто, используются данные из счета за электроэнергию. После внедрения энергоэффективной технологии производится расчет возможного энергопотребления предприятия, если бы не было модернизации производства. Для этого используются данные, полученные в исходном периоде времени. Разница между реальным и расчетным энергопотреблением в последующий временной период, равный исходному, называемый отчетным, и составляет экономию энергии от внедрения новой технологии.

Экономия = (Приведенное потребление в базовый период – потребление в отчетный период)  
Или

**Экономия = Потребление в базовый период – потребление в отчетный период ± поправка на изменение условий производства**



5.3 Шесть условий, необходимых для расчета экономии энергии

Когда проводится энергетический аудит согласно методике IPMVP, должны быть выполнены шесть условий:

- Точность: Данные измерений должны быть настолько точны, насколько позволяет бюджет аудита. Стоимость аудита должна быть незначительной по сравнению с выгодой от экономии.
- Законченность: Отчет об энергосбережении должен включать в себя все выгоды от модернизации.
- Консервативность: Если какие-либо параметры сложно измерить или оценить, необходимо использовать наиболее невыгодное значение
- Однообразность: Отчеты по энергосбережению должны быть однообразными:
  - Для различных мероприятий по энергосбережению
  - Независимо от выполнившего их специалиста для аудита одного объекта
  - Для различных периодов времени аудита одного объекта
  - Для аудита энергоэффективности и анализа новых источников питания
- Существенность: При определении экономии необходимо измерять наиболее существенные параметры, влияющие на производственный цикл, в то время как менее важные параметры могут быть оценены с допущениями.
- Прозрачность: Все произведенные измерения и расчеты должны быть подробно описаны.

5.4 Варианты оценки энергосбережения

	Вариант А	Вариант В	Вариант С	Вариант D
Применение	Объект модернизации: Измерение ключевых параметров	Объект модернизации: Измерение всех параметров	Здание целиком	Расчетные данные
Описание	Экономия определяется за счет полевых измерений ключевого параметра (-ов) расхода непосредственно на объекте, где проводились мероприятия по энергосбережению. Параметры, которые не попали в программу измерений, оцениваются примерно	Экономия определяется за счет измерения расхода энергии объектом, на котором проводились мероприятия по энергосбережению.	Экономия определяется путем измерения потребления энергии зданием или его частью. Применяется непрерывное измерение потребления энергии в течение всего отчетного периода	Экономия определяется расчетным путем для здания или его части. Проверяется адекватность расчетных показателей путем сравнения их с реальными данными.
Расчет сбережения	Инженерный расчет потребления энергии в исходный и отчетный периоды времени исходя из следующих данных: -Кратковременные или постоянные замеры ключевых параметров расхода -Оценочные параметры	Кратковременные или постоянные измерения расхода энергии в исходный и отчетный периоды времени	Анализ данных расхода энергии в исходный и отчетный периоды времени. Требуются дополнительные расчеты с использованием интерполяции или регрессионного анализа	Расчет потребления энергии, проверенный по часовому или месячному счету за электроэнергию.
Когда использовать этот вариант	С одной стороны, данный вариант дает результат с погрешностью, связанной с приблизительной оценкой некоторых параметров, с другой стороны, этот вариант значительно дешевле варианта В.	Вариант В дороже варианта А, т.к. измеряются все параметры, но, при необходимости получения точного результата, необходимо применение именно этого варианта	Если на предприятии внедряется сразу несколько программ энергосбережения для разного оборудования, применение данного варианта расчета позволяет сократить затраты и объем работ.	Вариант D применяется только в том случае, если отсутствуют данные расхода энергии за исходный период. Пример: производство, где до проведения энергосберегающих мероприятий отсутствовал счетчик электрической энергии, а проведение измерений исходного потребления требует чрезмерных дополнительных материальных затрат и времени

K32

## Алгоритм выбора варианта оценки экономии энергии

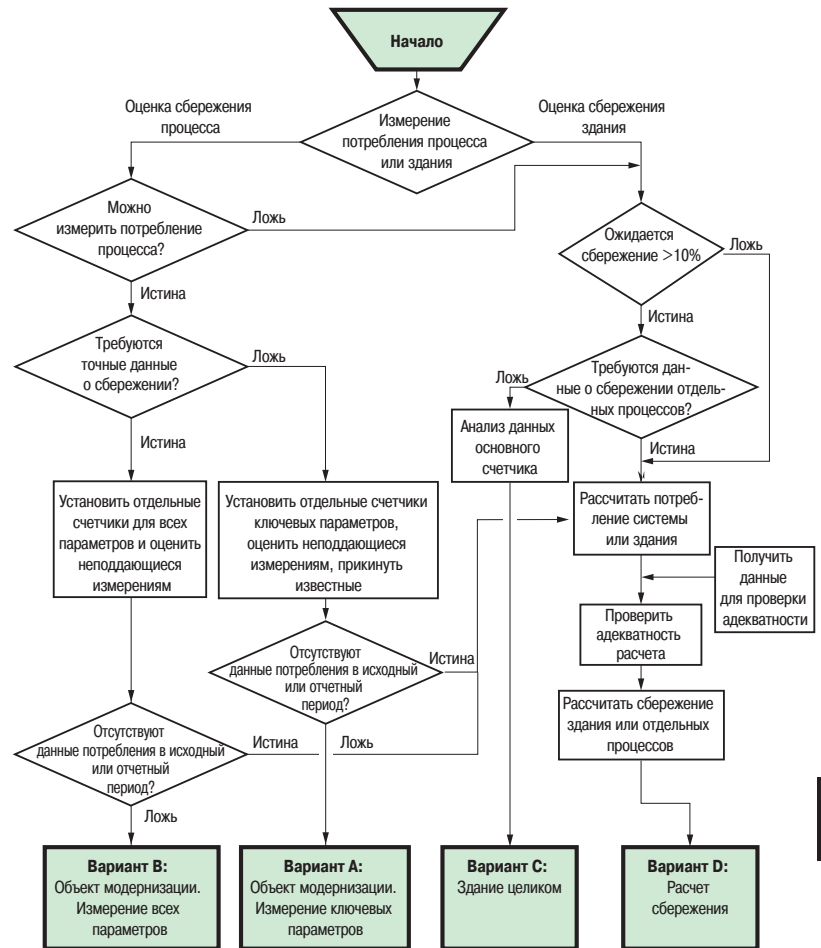


Рис. К32. Алгоритм выбора варианта оценки сбережения энергии

## 5.5 Основные пункты отчета по энергетическому аудиту

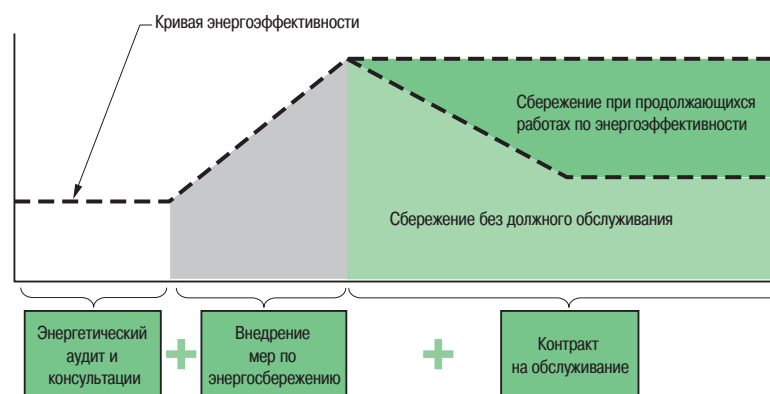
- Цели проекта энергосбережения
- Выбор варианта оценки сбережения и объем необходимых измерений
- Исходный период: продолжительность и условия
- Отчетный период: продолжительность и условия
- Зависимость потребления энергии от условий производства
- Анализ потребления: выражения, алгоритмы и принимаемые допущения
- Цены на электроэнергию
- Спецификация используемого метрологического оборудования
- Ответственный за инструментальные измерения персонал
- Ожидаемая точность расчета
- Стоимость энергетического аудита для оценки сбережения
- Результаты измерений
- Лицензия на проведение энергоаудита

## Порядок нашей работы по энергоаудиту



## 6 От окупаемости проекта к постоянным дивидендам

После того как проведен энергетический аудит и внедрены энергосберегающие технологии с известным сроком окупаемости, важно не останавливаться, а продолжать обслуживание оборудование для дальнейшей экономии. Если не продолжать работы, энергоэффективность со временем может упасть до показателей, незначительно отличающихся от начальных.



Постоянное повышение энергоэффективности требует наличия и грамотного использования системы мониторинга электрической сети. Такая система используется для постоянного анализа энергопотребления организации, а также выработки рекомендаций по улучшению распределения электроэнергии. Для того чтобы обеспечить наибольшую выгоду от использования системы мониторинга и наиболее рационально использовать предоставляемые ей данные, в промышленности проводят нижеперечисленные регламентные сервисные работы. Schneider Electric, при необходимости, может их провести по отдельной договоренности.

K34

### 6.1 Техническое обслуживание системы мониторинга

Параметры систем мониторинга и контроля энергосистем без должного технического обслуживания со временем ухудшаются по целому ряду причин. Необходимость обслуживания обуславливается следующими факторами:

- Может произойти обрыв связи с периферийными устройствами, приводящий к потере данных
- В процессе использования программного обеспечения необходима установка обновлений и сервисных пакетов для устранения выявленных ошибок программирования, обеспечения поддержки современной аппаратной базы и т.д.
- Необслуживаемые в течение долго времени базы данных могут значительно увеличиться в объеме, иметь неоптимальную структуру, что приводит к снижению быстродействия, и, иногда, повреждению данных.
- Система энергоснабжения со временем может измениться, таким образом, система мониторинга больше не будет ей соответствовать.
- Периодически выпускаются обновления программного обеспечения ПЗУ используемых устройств для устранения обнаруженных ошибок или обеспечения дополнительной функциональности.

#### Удаленное обслуживание

Поддержка может быть осуществлена по телефону, электронной почте, виртуальной частной сети или иному каналу связи между центром поддержки и сервером клиента. Обычно службой поддержки предоставляются следующие услуги:

- Бесплатная телефонная горячая линия для помощи в устранении неисправностей
- Закрепленный за каждой организацией персональный менеджер
- Бесплатное обновление программного обеспечения в течение срока обслуживания
- Периодическая удаленная проверка системы, обслуживание и подготовка отчетов по результатам
- Удаленное обновление программного обеспечения
- Круглосуточная телефонная служба поддержки

## 6 От окупаемости проекта к постоянным дивидендам

### Техническое обслуживание по месту установки

Ежемесячно, ежеквартально, раз в полгода или год (в зависимости от договоренности) проводится техническое обслуживание системы мониторинга по месту ее установки. Обычно проводятся следующие процедуры:

- Обновление программного обеспечения PowerLogic
- Обновление программного обеспечения ПЗУ измерительных устройств PowerLogic
- Проверка аппаратной части измерительных устройств
- Настройка графического интерфейса на пользовательских устройствах
- Настройка тревог и записи данных на пользовательских устройствах
- Внесение изменения в систему мониторинга в случае изменения конфигурации электрической сети

### 6.2 Информационные сервисы

Контракты на оперативную поддержку подразумевают проведение постоянного анализа энергопотребления и выработку рекомендаций по энергосбережению

#### Серверы, установленные на территории Schneider Electric

В этом случае данные параметров функционирования электрической сети организации отправляются на сервер, обслуживаемый Schneider Electric. Доступ к информации осуществляется при помощи web-браузера. Наиболее часто пользователям требуется следующая информация:

- Потребление электроэнергии
- Объем выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу
- Анализ температуры воздуха
- Приведенные показатели эффективности
- Регрессивный анализ
- Накопительный анализ (CUSUM)

#### Серверы, установленные на территории заказчика

В данном варианте сервер располагается на территории пользователя, на одной или нескольких площадках. В зависимости от требований могут использоваться различные программные средства. В этом случае, по сравнению с использованием серверов, обслуживаемых Schneider Electric, пользователь может дополнительно получить следующие возможности:

- Адекватный энергетический аудит с возможностью выработки рекомендаций по оптимизации энергосистемы
- Прямой контакт с консультантом по энергоснабжению
- Регулярный анализ данных, составление отчетов и выработка рекомендаций по модернизации (ежемесячно, ежеквартально, раз в полгода или год в зависимости от требований заказчика)
- Объединение данных с нескольких площадок
- Графики энергопотребления
- Отчет по качеству электроэнергии

K35



## Раздел L

# Компенсация реактивной мощности и фильтрация гармоник

	Содержание	
<b>1</b>	<b>Реактивная мощность и коэффициент мощности</b>	<b>L2</b>
	1.1 Природа реактивной мощности	L2
	1.2 Установки и приборы, требующие реактивной мощности	L2
	1.3 Коэффициент мощности	L3
	1.4 Практические значения коэффициента мощности	L4
<b>2</b>	<b>Зачем повышать коэффициент мощности?</b>	<b>L5</b>
	2.1 Снижение стоимости электроэнергии	L5
	2.2 Техническая/экономическая оптимизация	L5
<b>3</b>	<b>Методы повышения коэффициента мощности</b>	<b>L7</b>
	3.1 Теоретические принципы	L7
	3.2 Выбор оборудования	L7
	3.3 Выбор между нерегулируемой или автоматически регулируемой КБ	L9
<b>4</b>	<b>Выбор места установки конденсаторов</b>	<b>L10</b>
	4.1 Централизованная компенсация	L10
	4.2 Групповая компенсация	L10
	4.3 Индивидуальная компенсация	L11
<b>5</b>	<b>Выбор оптимального уровня компенсации</b>	<b>L12</b>
	5.1 Общий метод	L12
	5.2 Упрощенный метод	L12
	5.3 Метод, основанный на учете штрафных тарифов	L14
	5.4 Метод, основанный на снижении заявленного максимума мощности (кВА)	L14
<b>6</b>	<b>Компенсация на зажимах трансформатора</b>	<b>L15</b>
	6.1 Компенсация для повышения пропускной способности	L15
	6.2 Компенсация реактивной мощности, поглощаемой трансформатором	L16
<b>7</b>	<b>Компенсация реактивной мощности асинхронных двигателей</b>	<b>L18</b>
	7.1 Расположение КБ и уставки защиты	L18
	7.2 Методы предотвращения самовозбуждения асинхронного двигателя	L19
<b>8</b>	<b>Работа установки до и после компенсации реактивной мощности</b>	<b>L20</b>
<b>9</b>	<b>Влияние гармоник</b>	<b>L21</b>
	9.1 Проблемы, связанные с гармоническими составляющими напряжения	L21
	9.2 Возможные решения	L21
	9.3 Выбор оптимального решения	L23
<b>10</b>	<b>Конденсаторные батареи</b>	<b>L24</b>
	10.1 Емкостные элементы	L24
	10.2 Выбор устройств защиты и управления и соединительных кабелей	L25

**L1**

# 1 Реактивная мощность и коэффициент мощности

Системы переменного тока обеспечивают две формы энергии:

- активную энергию, измеряемую в киловатт-часах (кВтч), которая преобразуется в механическую работу, тепло, свет и т.д.;
- реактивную энергию, которая принимает две формы:
  - реактивная энергия, требуемая для индуктивных цепей (трансформаторы, двигатели и т.д.);
  - реактивная энергия, генерируемая емкостными цепями (кабелями, силовыми конденсаторами и т.д.).

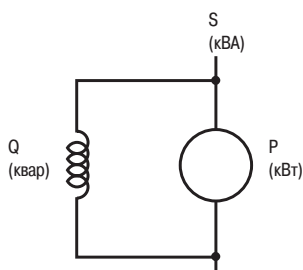


Рис. L1: Электродвигатель требует активной (P) и реактивной (Q) мощности от энергосистемы

## 1.1 Природа реактивной мощности

Все индукционные (т.е., электромагнитные) машины и устройства, работающие в составе систем переменного тока, преобразуют электрическую энергию от генераторов энергосистемы в механическую работу и тепло. Такая энергия измеряется счетчиками киловатт-часов и называется активной или ваттной энергией. Для осуществления такого преобразования необходимо образование магнитных полей в машинах, и эти поля связаны с другой формой энергии, обеспечиваемой энергосистемой, - реактивной или безваттной энергией.

Причина этого состоит в том, что индукционная цепь циклически поглощает энергию из системы (на создание магнитных полей) и отдает эту энергию обратно в систему (в течение спада магнитных полей) дважды за каждый цикл мощности-частоты.

Точно такое же явление происходит при наличии параллельно включенных емкостных элементов в энергосистеме, таких как кабели или блоки силовых конденсаторов и т.д. В этом случае энергия запасается электростатически (заряд конденсатора). Циклическая зарядка и разрядка емкостной цепи оказывает на генераторы системы такое же влияние, как описанное выше для индукционной цепи, но ток на емкостной цепи имеет фазу, противоположную фазе тока индукционной цепи. На этом принцип компенсации реактивной мощности.

Следует отметить, что хотя реактивная мощность не забирает энергии из системы, она вызывает потери энергии в системах передачи и распределения энергии из-за нагрева проводников.

В реальных энергосистемах реактивные составляющие токов нагрузок неизменно индуктивны, а модули полного сопротивления систем передачи и распределения преимущественно индуктивно реактивны. Индуктивный ток через индуктивное реактивное сопротивление - наихудший возможный режим падения напряжения (т.е. прямая противофаза напряжению системы).

По этим причинам:

- потери энергии при передаче;
- потери напряжения.

Органы, регулирующие энергоснабжение, требуют ограничения индуктивного тока в максимальной возможной степени.

Емкостные токи имеют обратный эффект на уровни напряжения и вызывают повышение напряжения в энергосистемах.

Как правило, мощность (кВт), связанная с «активной» энергией, обозначается буквой P.

Реактивная мощность (квар) обозначается буквой Q. Индуктивно-реактивная мощность условно принимается положительной (+Q), а емкостно-реактивная - отрицательной (-Q).

В п.1.3 описывается взаимосвязь P, Q и S.

S - полная мощность, кВА.

Рис. L1 показывает полную мощность (кВА) как векторную сумму активной (кВт) и реактивной (квар) мощности.

## 1.2 Установки и приборы, требующие реактивной мощности

Всем установкам и приборам переменного тока, включающим электромагнитные устройства или зависящим от магнитносвязанных обмоток, требуется, в той или иной степени, реактивный ток для создания магнитного потока.

Общеприменимыми единицами оборудования этого класса являются трансформаторы и реакторы, двигатели и разрядные лампы (т.е. балластные сопротивления) (см. рис. L2).

Соотношение реактивной (квар) и активной (кВт) мощности при полностью нагруженной единице оборудования зависит от характеристик такой единицы:

- 65-75% для асинхронных двигателей;
- 5-10% для трансформаторов.

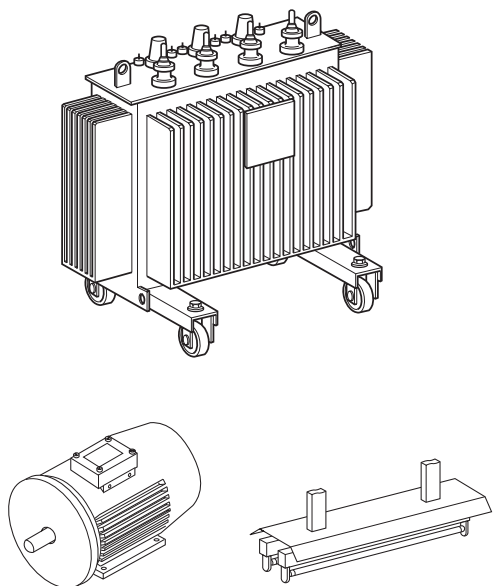


Рис. L2: Потребители реактивной мощности

# 1 Реактивная мощность и коэффициент мощности

Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) есть отношение кВт к кВА. Чем ближе коэффициент мощности приближается к своему максимальному значению 1, тем больше польза для потребителя и поставщика.

$PF = P \text{ (кВт)} / S \text{ (кВА)}$ , где:

$P$  = активная мощность;

$S$  = полная мощность.

## 1.3 Коэффициент мощности

### Определение коэффициента мощности

Коэффициент мощности нагрузки, которая может являться электроприемником (ЭП) или совокупностью таких ЭП (например, вся система), задается отношением  $P/S$ , т.е. число кВт, деленное на число кВА в заданный момент времени.

Значение коэффициента мощности изменяется в диапазоне  $0 \div 1$ .

Если токи и напряжения являются идеальными синусоидальными сигналами, коэффициент мощности равен  $\cos \varphi$ .

Коэффициент мощности около единицы означает, что реактивная мощность мала в сравнении с активной, а низкое значение коэффициента указывает на противоположное.

### Векторная диаграмма мощности

■ Активная мощность  $P$  (кВт):

□ однофазная (1 фаза и нейтраль):  $P = V \times I \times \cos \varphi$ ;

□ однофазная (фаза-фаза):  $P = U \times I \times \cos \varphi$ ;

□ трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль):  $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$ .

■ Реактивная мощность  $Q$  (квар):

□ однофазная (1 фаза и нейтраль):  $Q = V \times I \times \sin \varphi$ ;

□ однофазная (фаза-фаза):  $Q = U \times I \times \sin \varphi$ ;

□ трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль):  $Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \sin \varphi$ .

■ Полная мощность  $S$  (кВА):

□ однофазная (1 фаза и нейтраль):  $S = V \times I$ ;

□ однофазная (фаза-фаза):  $S = U \times I$ ;

□ трехфазная (3 провода или 3 провода + нейтраль):  $S = \sqrt{3} \times U \times I$ ,

где:

$V$  - линейное напряжение;

$U$  - фазное напряжение;

$I$  - ток;

$\varphi$  - угол между векторами напряжения и тока;

□ для симметричных или почти симметричных нагрузок четырехпроводных систем.

### Векторы тока и напряжения и вывод векторной диаграммы мощности

Векторная диаграмма мощности – полезный инструмент, выводимый непосредственно из истинной диаграммы вращающихся векторов токов и напряжений следующим образом:

Напряжения энергосистемы принимаются в качестве исходных величин, и рассматривается только одна фаза, исходя из предположения о симметричной трехфазной нагрузке.

Исходное напряжение фазы ( $V$ ) совпадает с горизонтальной осью, а ток ( $I$ ) этой фазы сдвинут (отстает) (практически для всех нагрузок энергосистемы) относительно напряжения на угол  $\varphi$ .

Составляющая тока  $I$ , совпадающая по фазе с напряжением  $V$ , является реактивной составляющей тока  $I$  и равна  $I \cdot \cos \varphi$ , значение  $V \cdot I \cdot \cos \varphi$  равно активной мощности (кВт) в цепи, если  $V$  выражается в кВ.

Составляющая тока  $I$  с отставанием 90 градусов от напряжения  $V$  является безваттной составляющей тока  $I$  и равна  $I \cdot \sin \varphi$ , а значение  $V \cdot I \cdot \sin \varphi$  равно реактивной мощности (квар), если напряжение  $V$  выражается в кВ.

Результат умножения  $I$  на  $V$  в кВ ( $V \cdot I$ ) равен полной мощности (кВА) для цепи.

Получается простая формула  $S^2 = P^2 + Q^2$

Следовательно, умноженные на 3, указанные выше значения кВт, квар и кВА на фазу могут удобно представлять взаимосвязь кВА, кВт, квар и коэффициента мощности для общей трехфазной нагрузки, как показано на **рис. L3**.

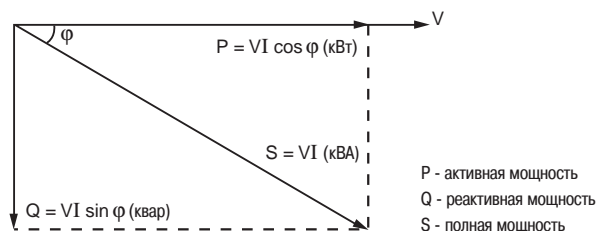


Рис. L3: Диаграмма мощности

L3



Пример расчета мощности (см. рис. L4)

Тип цепи	Полная мощн. S (кВА)	Активная мощн. P (кВт)	Реакт. мощн. Q (квар)
Однофазная (фаза и нейтраль)	$S = VI$	$P = VI \cos \varphi$	$Q = VI \sin \varphi$
Однофазная (фаза-фаза)	$S = UI$	$P = UI \cos \varphi$	$Q = UI \sin \varphi$
Пример 5 кВт нагрузки $\cos \varphi = 0.5$	10 кВА	5 кВт	8.7 квар
Трехфаз. (3 провода или 3 провода + нейтраль)	$S = \sqrt{3} UI$	$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$
Пример Двигатель $P_n = 51$ кВт $\cos \varphi = 0.86$ $\rho = 0.91$ (КПД двигателя)	65 кВА	56 кВт	33 квар

Рис. L4: Пример расчета активной и реактивной мощности

1.4 Практические значения коэффициента мощности

Расчет для трехфазной нагрузки, рассмотренной ранее:

Pn = мощность на валу = 51 кВт

P = потребляемая активная мощность

$$P = \frac{P_n}{\rho} = \frac{51}{0.91} = 56 \text{ кВт}$$

S = полная мощность

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{56}{0.86} = 65 \text{ кВА}$$

Таким образом, используя диаграмму рис. L5 или карманный калькулятор, значение tg φ, соответствующее cos φ 0,86, равно 0,59

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi = 56 \times 0.59 = 33 \text{ квар (см. рис. L15)}$$

или

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{65^2 - 56^2} = 33 \text{ квар}$$

Средние значения коэффициента мощности для наиболее распространенного оборудования (см. рис. L6)

Оборудование	cos φ	tg φ
■ Стандартный асинхронный двигатель при нагрузке 0%	0.17	5.80
■ Стандартный асинхронный двигатель 25%	0.55	1.52
■ Стандартный асинхронный двигатель 50%	0.73	0.94
■ Стандартный асинхронный двигатель 75%	0.80	0.75
■ Стандартный асинхронный двигатель 100%	0.85	0.62
■ Лампы накаливания	1.0	0
■ Флуоресцентные лампы (без компенсации)	0.5	1.73
■ Флуоресцентные лампы (с компенсацией)	0.93	0.39
■ Газоразрядные лампы	0.4 - 0.6	2.29 - 1.33
■ Печи сопротивления	1.0	0
■ Печи индукционного нагрева (с компенсацией)	0.85	0.62
■ Диэлектрические электропечи	0.85	0.62
■ Резистивные паяльные аппараты	0.8 - 0.9	0.75 - 0.48
■ Стационарные сварочные аппараты для дуговой сварки	0.5	1.73
■ Мотор-генераторная силовая установка дуговой сварки	0.7 - 0.9	1.02 - 0.48
■ Установка «трансформатор-выпрямитель» дуговой сварки	0.7 - 0.8	1.02 - 0.75
■ Электродуговая печь	0.8	0.75

Рис. L6: Значения cos φ и tg φ для наиболее распространенного оборудования

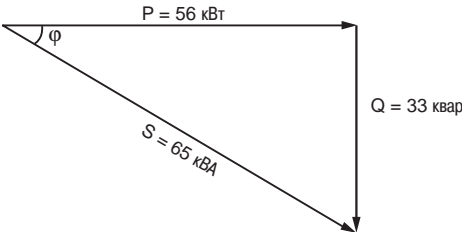


Рис. L5: Треугольник мощностей

## 2 Зачем повышать коэффициент мощности?

Повышение коэффициента мощности обеспечивает несколько технических и экономических преимуществ, особенно снижение счетов за электроэнергию.

### 2.1 Снижение стоимости электроэнергии

Оптимальное регулирование потребления реактивной мощности дает следующие экономические преимущества.

Приводимая информация основана на фактической структуре тарифных ставок, общепринятой в Европе и направленной на стимулирование потребителей минимизировать потребление реактивной мощности.

Установка конденсаторов для повышения коэффициента мощности позволяет потребителям снижать затраты на электроэнергию за счет поддержания уровня потребления реактивной мощности ниже значения, согласованного (по договору) с поставщиком электроэнергии. В рамках рассматриваемой тарифной структуры счет за потребленную реактивную энергию выставляется по критерию  $\tan \varphi$ . Как указано выше:

$$\tan \varphi = \frac{Q \text{ (кварч)}}{P \text{ (кВтч)}}$$

Электроснабжающая организация предоставляет реактивную энергию бесплатно:

- До точки, в которой ее потребление составляет менее 40% от потребления активной энергии ( $\tan \varphi = 0,4$ ) в течение максимального периода 16 часов в день (с 06-00 до 22-00 ч) в период наибольшей нагрузки (часто зимой).

- Без ограничения в периоды низкой нагрузки зимой, весной и летом.

В течение периодов ограничения счет за реактивную энергию, потребленную свыше 40% активной энергии ( $\tan \varphi > 0,4$ ), выставляются ежемесячно по текущим ставкам. Таким образом, количество реактивной энергии  $W_{\text{реакт}}$ , оплачиваемой потребителем в такие периоды, составляет: кварч (к оплате) =  $W \text{ кВтч} (\tan \varphi - 0,4)$ , где  $W \text{ кВтч}$  – активная энергия, потребленная в периоды ограничения, кВтч  $\tan \varphi$  – общая реактивная энергия за период ограничения и  $0,4W \text{ кВтч}$  – количество реактивной энергии, поставленной бесплатно за период ограничения.

$\tan \varphi = 0,4$  соответствует коэффициенту мощности 0,93. Таким образом, если в периоды ограничения коэффициент мощности никогда не упадет ниже 0,93, потребитель ничего не будет платить за потребленную реактивную мощность.

Однако, получая такие преимущества пониженных затрат на электроэнергию, потребитель должен учитывать стоимость приобретения, установки и обслуживания конденсаторов для повышения коэффициента мощности, а также автоматических регуляторов (в случае ступенчатой компенсации) вместе с дополнительными кВтч, потребляемыми диэлектриками.

Учитывая такие затраты на конденсаторы, может оказаться более экономически выгодным обеспечивать только частичную компенсацию, т.е. оплата некоторой потребляемой реактивной энергии может обходиться дешевле, чем 100%-я компенсация.

Вопрос повышения коэффициента мощности – это, прежде всего, вопрос оптимизации (за исключением очень простых случаев).

Повышение коэффициента мощности позволяет уменьшить номинальные значения мощности трансформаторов, распределительных устройств, кабелей, а также сократить потери мощности и ограничить потери напряжения.

### 2.2 Техническая/экономическая оптимизация

Высокий коэффициент мощности позволяет оптимизировать все компоненты системы, то есть избежать завышения номиналов определенного оборудования. Для получения оптимальных результатов необходимо устанавливать компенсирующие устройства как можно ближе к потребителю реактивной (индуктивной) энергии.

#### Уменьшения сечений кабелей

**Рис. L7:** требуемое увеличение сечений кабелей при снижении коэффициента мощности с единицы до 0,4.

	1	1.25	1.67	2.5
Множитель для площади поперечного сечения жил(ы) кабеля	1	1.25	1.67	2.5
$\cos \varphi$	1	0.8	0.6	0.4

**Рис. L7:** Множитель для сечения кабеля в зависимости от  $\cos \varphi$

## 2 Зачем повышать коэффициент мощности?

### Снижение потерь (Р, кВт) в проводниках

Потери в кабелях пропорциональны квадрату тока и измеряются счетчиком киловатт-часов установки. Например, снижение общего тока в проводнике на 10% приводит к снижению потерь почти на 20%.

### Снижение потерь напряжения

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности снижают или даже полностью устраняют (индуктивный) реактивный ток в вышележащих проводниках, тем самым, снижая или устраняя потери напряжения.

**Примечание:** избыточная компенсация приводит к повышению напряжения на конденсаторах.

### Повышение пропускной способности

Повышение коэффициента мощности нагрузки, питаемой от трансформатора, приводит к снижению тока через трансформатор, что позволяет добавлять нагрузку. На практике может оказаться дешевле повысить коэффициент мощности (1), чем заменить трансформатор на больший номинал.

Этот вопрос рассматривается в разделе 6.

# 3 Методы повышения коэффициента мощности

Повышение коэффициента мощности требует блока конденсаторов, служащего в качестве источника реактивной мощности. Устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности.

## 3.1 Теоретические принципы

Индуктивная нагрузка, имеющая низкий коэффициент мощности, требует от генераторов и систем передачи/распределения пропускать реактивный ток (с отставанием от напряжения системы на 90 градусов) с сопутствующим потерями активной мощности и повышенными потерями напряжения, как указывается в п. 1.1. Если блок шунтирующих конденсаторов добавить к нагрузке, его (емкостной) реактивный ток будет проходить по тому же пути через энергосистему, как и реактивный ток нагрузки. Поскольку (как указывается в п. 1.1) такой емкостной ток  $I_C$  (который опережает напряжение системы на 90 градусов) прямо противофазен реактивному току нагрузки ( $I_L$ ), две составляющие, протекающие по одному пути, будут компенсировать друг друга. При этом, если мощность конденсаторной батареи (КБ) значительна и  $I_C = I_L$ , то реактивный ток из системы будет равен нулю.

На рис. L8 (a) и (b), показаны реактивные составляющие тока, где:

R – элементы, потребляющие активную мощность нагрузки;

L – элементы, потребляющие реактивную (индуктивную) мощность нагрузки;

C – элементы, генерирующие реактивную (емкостную) мощность (конденсаторы).

Как видно из диаграммы (b) рис. L9, блок конденсаторов C подает весь реактивный ток нагрузки.

По этой причине конденсаторы иногда называются «генераторами реактивной мощности - VAR». На схеме (c) на рис. L8 приведены реактивные и активные токи при  $I_C = I_L$  и показано, что нагрузка (при полной компенсации) представляется энергосистеме как имеющая коэффициент мощности 1.

Как правило, полная компенсация нагрузки не является экономически целесообразной.

На рис. L9 приведены треугольники мощностей (п. 1.3, рис. L3), для демонстрации принципа компенсации путем снижения большой реактивной мощности Q до меньшего значения Q' посредством КБ мощностью Qc. При этом величина полной мощности S снижается до S'.

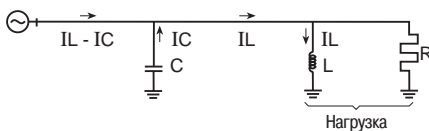
### Пример:

Двигатель потребляет 100 кВт при коэффициенте мощности 0,75 ( $\lg \varphi = 0,88$ ). Для повышения коэффициента мощности до 0,93 ( $\lg \varphi = 0,4$ ), реактивная мощность конденсаторов должна составлять:  $Q_c = 100 (0,88 - 0,4) = 48$  квар.

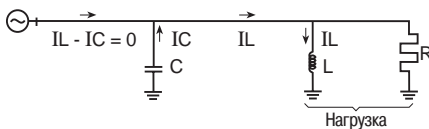
Выбор уровня компенсации и расчет номинальных параметров КБ зависит от конкретной нагрузки. Факторы, подлежащие учету, разъясняются в разделе 5 для общего случая и в разделах 6 и 7 для трансформаторов и двигателей.

**Примечание:** перед тем, как реализовать проект компенсации, следует принять ряд мер для повышения коэффициента мощности без применения КБ. В частности, следует избегать завышения номинальных значений мощности двигателей, также как и работы двигателей в режиме холостого хода. В последнем случае реактивная мощность, потребляемая двигателем, приводит к крайне низкому коэффициенту мощности (до 0,17). Это вызвано малой активной мощностью кВт, потребляемой двигателем в ненагруженном состоянии.

a) Проходят только реактивные составляющие тока



b) При  $I_C = I_L$  вся реактивная мощность подается от блока конденсаторов



c) Показаны все токи,  $I_C = I_L$

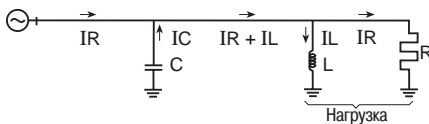


Рис. L8: Особенности компенсации коэффициента мощности

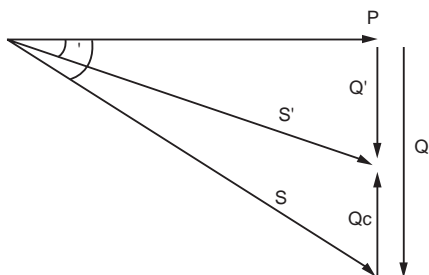


Рис. L9: Диаграмма, показывающая принцип компенсации  $Q_c = P (\lg \varphi - \lg \varphi')$

## 3.2 Выбор оборудования

### Компенсация на низком напряжении

При низком напряжении компенсация обеспечивается посредством:

■ нерегулируемой КБ;

■ многосекционной КБ, позволяющей осуществлять автоматическое регулирование ее мощности при изменении нагрузки.

**Примечание:** если установленная реактивная мощность компенсации превышает 800 квар и нагрузка является постоянной и устойчивой, как правило, экономически выгодно устанавливать КБ на стороне высокого напряжения.

*При подходящих условиях компенсация может осуществляться с помощью КБ постоянной мощности.*

### **Нерегулируемые КБ** (см. **рис. L10**)

Такая КБ состоит из одного или более конденсаторов и обеспечивает постоянный уровень компенсации. Управление может быть:

- ручным: посредством выключателя или выключателя нагрузки;
- полуавтоматическим: посредством контактора;
- прямым подключением к нагрузке и коммутацией вместе с ней.

Такие конденсаторы применяются:

- на зажимах индуктивных устройств (двигателей и трансформаторов);
- на сборных шинах, питающих ряд небольших двигателей и индуктивное оборудование, для которого индивидуальная компенсация стоит слишком дорого;
- в случаях, где уровень нагрузки достаточно постоянен.



**Рис. L10:** Пример нерегулируемых КБ

*Как правило, компенсация осуществляется с помощью автоматически регулируемой КБ.*

### **Автоматические регулируемые КБ** (см. **рис. L11**)

Этот тип оборудования обеспечивает автоматическое управление компенсацией реактивной мощности и поддержание выбранного уровня коэффициента мощности в узких пределах. Такое оборудование применяется на нагрузках с относительно большими изменениями активной и/или реактивной мощности, например:

- на сборных шинах главного распределительного щита;
- на зажимах высоконагруженного кабеля.



**Рис. L11:** Пример автоматически регулируемой КБ

## 3 Методы повышения коэффициента мощности

Автоматическое регулирование мощности КБ дает возможность быстрой адаптации уровня компенсации к уровню нагрузки.

### Принципы и причины применения автоматической компенсации

Блок конденсаторов разделяется на ряд секций, каждая из которых управляется контактором. Контактор подключает его секцию параллельно с другими уже работающими секциями. Поэтому, емкость батареи может увеличиваться или уменьшаться ступенчато путем включения и отключения контакторов управления.

Управляющее реле контролирует коэффициент мощности силовой цепи и служит для включения или выключения соответствующих контакторов для поддержания постоянного коэффициента мощности системы (в пределах зоны нечувствительности, зависящей от мощности одной ступени). Трансформатор тока для управляющего реле должен располагаться в фазе входного кабеля, питающего контролируемые цепи (см. **рис. L12**).

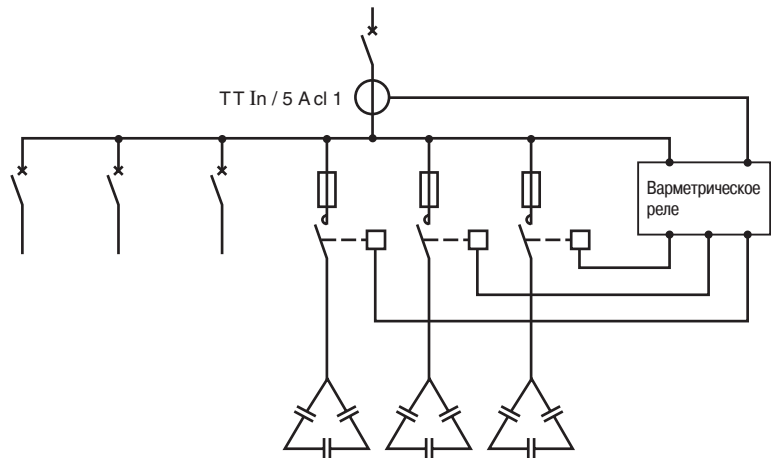
КБ Varset Fast (см. рис. L12) является устройством автоматической компенсации коэффициента мощности, включающим статические контакторы (тиристоры) вместо стандартных контакторов.

Статические контакторы особенно подходят для определенных нагрузок, включающих оборудование с быстрым циклом и/или высокой чувствительностью к возмущению, возникающим при переходных процессах.

Преимущества статических контакторов:

- мгновенная реакция на любое изменение коэффициента мощности (время реакции – 2 с или 40 мс в зависимости от регулятора);
- неограниченное число операций (срабатываний);
- устранение переходных процессов в сети при включении конденсаторов;
- бесшумная работа.

Тщательная подгонка компенсации под уровень, требуемый нагрузкой, позволяет предотвращать перенапряжения при низкой нагрузке, т.е. предотвращение режима перенапряжения и возможности повреждения оборудования. Перенапряжения из-за чрезмерной реактивной компенсации зависят, отчасти, от значения полного сопротивления источника.



**Рис. L12:** Принцип управления автоматической компенсацией

### 3.3 Выбор между нерегулируемой или автоматически регулируемой КБ

#### Общепринятые правила

Если номинальная реактивная мощность (квар) не превышает 15% номинальной мощности силового трансформатора, может применяться постоянная компенсация. Свыше 15% рекомендуется устанавливать автоматически управляемый блок (батарею) конденсаторов. Местоположение конденсаторов низкого напряжения в установке определяет режим компенсации, которая может быть централизованной (одно устройство для всей нагрузки), групповой, индивидуальной (на каждой нагрузке - отдельное устройство) или некоторой комбинацией последних двух. В принципе, оптимальная компенсация обеспечивается в точке потребления на уровне, требуемом в данный момент.

На практике, выбор определяется техническими и экономическими факторами.

## 4 Выбор места установки конденсаторов

Централизованная компенсация может применяться как при постоянной, так и при изменяющейся нагрузке.

### 4.1 Централизованная компенсация (см. рис. L13)

#### Принцип

Блок (батарея) конденсаторов подсоединяется к сборным шинам главного низковольтного распределительного щита.

#### Преимущества

Централизованная компенсация обеспечивает:

- снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности;
- снижение требуемой полной мощности (кВА), на которой, как правило, основана постоянная плата за электроэнергию;
- снижение нагрузки силового трансформатора, который становится способным принять дополнительную нагрузку при необходимости.

#### Недостатки

- Реактивный ток продолжает протекать по всем проводникам кабелей от главного низковольтного распределительного щита.
- По этой причине централизованный режим компенсации не обеспечивает возможность уменьшения сечения таких кабелей и снижения потерь в них.

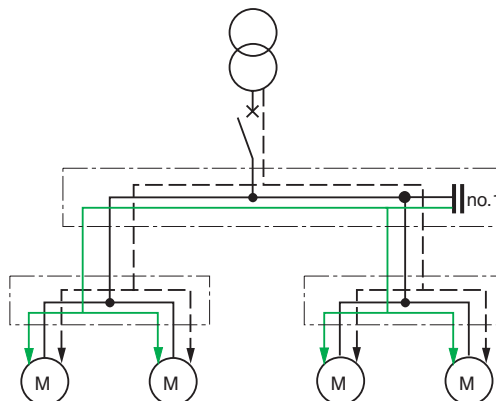


Рис. L13: Централизованная компенсация

Посекционная компенсация рекомендуется в случае большой системы и в том случае, когда графики нагрузки ( $P = f(t)$ ) различны для разных частей установки.

### 4.2 Групповая компенсация (см. рис. L14)

#### Принцип

Блоки конденсаторов подсоединяются к сборным шинам каждого локального распределительного щита, как показано на рис. L14.

Значительная часть системы выигрывает от такой схемы, в частности, разгружаются питающие кабели от главного распределительного щита к каждому локальному распределительному щиту, на котором осуществляется компенсация.

#### Преимущества

Групповая компенсация обеспечивает:

- снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности;
- снижение требуемой полной мощности (кВА), на которой, как правило, основана постоянная плата за электроэнергию;
- снижение нагрузки силового трансформатора, который становится способным принять дополнительную нагрузку при необходимости;
- возможность уменьшения сечений кабелей, питающих локальные распределительные щиты, или использования таких кабелей без уменьшения сечений для обеспечения дополнительной пропускной способности на случай повышения нагрузки;
- снижение потерь в кабелях.

#### Недостатки

- Реактивный ток продолжает протекать по всем проводникам кабелей от местных низковольтных распределителей.
- По этой причине посекционная компенсация не обеспечивает возможность уменьшения сечений этих кабелей и снижения потерь в них.
- При больших изменениях нагрузки всегда существует риск избыточной компенсации и сопутствующих перенапряжений.

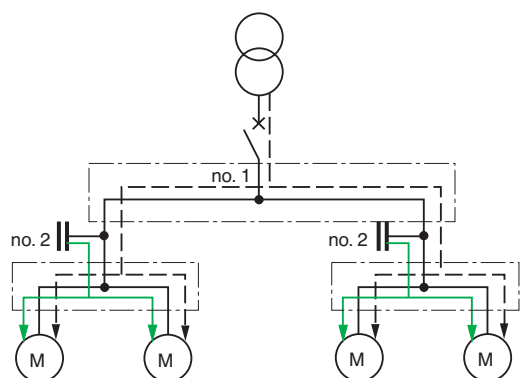


Рис. L14: Посекционная компенсация

## 4 Выбор места установки конденсаторов

Применение индивидуальной компенсации следует рассматривать при значительной мощности ЭП в сравнении с мощностью системы.

### 4.3 Индивидуальная компенсация

#### Принцип

Конденсаторы подсоединяются непосредственно к зажимам индуктивной цепи (например, двигателям, см. п.7). Возможность применения индивидуальной компенсации должна рассматриваться при значительной мощности ЭП в сравнении с заявленной полной мощностью (кВА).

Номинальная реактивная мощность (квар) КБ составляет порядка 25% номинальной мощности (кВт) двигателя. Дополнительная компенсация в центре питания (трансформатор) обеспечивает дополнительное преимущество.

#### Преимущества

Индивидуальная компенсация обеспечивает:

- снижение платы за избыточное потребление реактивной мощности;
- снижение требуемой полной мощности (кВА);
- уменьшение сечений всех кабелей, снижение потерь в кабелях.

**Примечание.** Устанавливаются реактивные токи по всем кабелям от главного распределительного щита до КБ.



## 5 Выбор оптимального уровня компенсации

### 5.1 Общий метод

#### Составление ведомости потребления реактивной мощности на стадии проектирования

Такая ведомость составляется аналогично (и одновременно) с ведомостью потребляемой активной мощности, как описывается в разделе В. После составления таких ведомостей определяются величины потребляемой активной и реактивной мощности на каждом уровне установки (как правило, в точках основных и промежуточных распределительных цепей).

#### Технико-экономическая оптимизация для существующей установки

Оптимальная мощность конденсаторов для компенсации коэффициента мощности для существующей установки может определяться на основе следующих основных факторов:

- счета за электроэнергию до установки конденсаторов;
- счета за электроэнергию, ожидаемые после установки конденсаторов;
- затраты:
  - затраты на приобретение конденсаторов и устройств управления (контакты, реле, распределительные щиты и т.д.);
  - затраты на установку и техобслуживание;
  - затраты, связанные с потерями из-за нагрева конденсаторов, в сравнении с пониженными потерями в кабелях, трансформаторе и т.д. после установки конденсаторов.

Несколько упрощенных методов, применяемых в отношении стандартных тарифов (общепринятых в Европе), приводятся в п.5.3 и п.5.4.

### 5.2 Упрощенный метод

#### Общий принцип

Ориентировочный расчет применим, как правило, для большинства практических случаев и может быть основан на предположении о коэффициенте мощности 0,8 (отстающем) до компенсации. Метод повышения коэффициента мощности до значения, достаточного для предотвращения штрафных тарифов (они зависят от местных структур тарифных ставок, но здесь оно полагается равным 0,93) и снижения потерь мощности и напряжения в установке, рассматривается на основе данных, приводимых на **рис. L15** на следующей странице.

Как видно из приводимой таблицы, повышение коэффициента мощности с 0,8 до 0,93 потребует 0,355 квар на кВт нагрузки. Мощность блока конденсаторов на сборных шинах главного распределительного щита системы составляет:

$$Q \text{ (квар)} = 0,355 \times P \text{ (кВт)}.$$

Данный упрощенный метод позволяет быстро определить требуемый тип конденсаторов для компенсации реактивной мощности (централизованные, групповые или индивидуальные).

#### Пример

Требуется повысить коэффициент мощности установки 666 кВА с 0,75 до 0,928. Требуемая активная мощность составляет  $666 \times 0,75 = 500$  кВт.

На рис. L17, на пересечении строки « $\cos \varphi = 0,75$ » (до компенсации) и столбца « $\cos \varphi = 0,93$ » (после компенсации) находим значение 0,487 квар компенсации на кВт нагрузки.

Следовательно, для нагрузки 500 кВт требуемая мощность емкостей компенсации составляет  $500 \times 0,487 = 244$  квар.

**Примечание:** данный метод применим при любом уровне напряжения, т.е. не зависит от напряжения.

## 5 Выбор оптимального уровня компенсации

До компенсации		Номинальное значение (квар) блока конденсаторов, устанавливаемого на кВт нагрузки, для повышения cos φ (коэффициент мощности) или tg φ до заданного значения													
		tg φ	0.75	0.59	0.48	0.46	0.43	0.40	0.36	0.33	0.29	0.25	0.20	0.14	0.0
		cos φ	0.80	0.86	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
2.29	0.40		1.557	1.691	1.805	1.832	1.861	1.895	1.924	1.959	1.998	2.037	2.085	2.146	2.288
2.22	0.41		1.474	1.625	1.742	1.769	1.798	1.831	1.840	1.896	1.935	1.973	2.021	2.082	2.225
2.16	0.42		1.413	1.561	1.681	1.709	1.738	1.771	1.800	1.836	1.874	1.913	1.961	2.022	2.164
2.10	0.43		1.356	1.499	1.624	1.651	1.680	1.713	1.742	1.778	1.816	1.855	1.903	1.964	2.107
2.04	0.44		1.290	1.441	1.558	1.585	1.614	1.647	1.677	1.712	1.751	1.790	1.837	1.899	2.041
1.98	0.45		1.230	1.384	1.501	1.532	1.561	1.592	1.628	1.659	1.695	1.737	1.784	1.846	1.988
1.93	0.46		1.179	1.330	1.446	1.473	1.502	1.533	1.567	1.600	1.636	1.677	1.725	1.786	1.929
1.88	0.47		1.130	1.278	1.397	1.425	1.454	1.485	1.519	1.532	1.588	1.629	1.677	1.758	1.881
1.83	0.48		1.076	1.228	1.343	1.370	1.400	1.430	1.464	1.497	1.534	1.575	1.623	1.684	1.826
1.78	0.49		1.030	1.179	1.297	1.326	1.355	1.386	1.420	1.453	1.489	1.530	1.578	1.639	1.782
1.73	0.50		0.982	1.232	1.248	1.276	1.303	1.337	1.369	1.403	1.441	1.481	1.529	1.590	1.732
1.69	0.51		0.936	1.087	1.202	1.230	1.257	1.291	1.323	1.357	1.395	1.435	1.483	1.544	1.686
1.64	0.52		0.894	1.043	1.160	1.188	1.215	1.249	1.281	1.315	1.353	1.393	1.441	1.502	1.644
1.60	0.53		0.850	1.000	1.116	1.144	1.171	1.205	1.237	1.271	1.309	1.349	1.397	1.458	1.600
1.56	0.54		0.809	0.959	1.075	1.103	1.130	1.164	1.196	1.230	1.268	1.308	1.356	1.417	1.559
1.52	0.55		0.769	0.918	1.035	1.063	1.090	1.124	1.156	1.190	1.228	1.268	1.316	1.377	1.519
1.48	0.56		0.730	0.879	0.996	1.024	1.051	1.085	1.117	1.151	1.189	1.229	1.277	1.338	1.480
1.44	0.57		0.692	0.841	0.958	0.986	1.013	1.047	1.079	1.113	1.151	1.191	1.239	1.300	1.442
1.40	0.58		0.665	0.805	0.921	0.949	0.976	1.010	1.042	1.076	1.114	1.154	1.202	1.263	1.405
1.37	0.59		0.618	0.768	0.884	0.912	0.939	0.973	1.005	1.039	1.077	1.117	1.165	1.226	1.368
1.33	0.60		0.584	0.733	0.849	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.131	1.192	1.334
1.30	0.61		0.549	0.699	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299
1.27	0.62		0.515	0.665	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265
1.23	0.63		0.483	0.633	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233
1.20	0.64		0.450	0.601	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200
1.17	0.65		0.419	0.569	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.007	1.169
1.14	0.66		0.388	0.538	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
1.11	0.67		0.358	0.508	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
1.08	0.68		0.329	0.478	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
1.05	0.69		0.299	0.449	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049
1.02	0.70		0.270	0.420	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020
0.99	0.71		0.242	0.392	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.701	0.741	0.783	0.850	0.992
0.96	0.72		0.213	0.364	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.94	0.73		0.186	0.336	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.91	0.74		0.159	0.309	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909
0.88	0.75		0.132	0.282	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882
0.86	0.76		0.105	0.255	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.83	0.77		0.079	0.229	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829
0.80	0.78		0.053	0.202	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.78	0.79		0.026	0.176	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776
0.75	0.80			0.150	0.266	0.294	0.321	0.355	0.387	0.421	0.459	0.499	0.541	0.608	0.750
0.72	0.81			0.124	0.240	0.268	0.295	0.329	0.361	0.395	0.433	0.473	0.515	0.582	0.724
0.70	0.82			0.098	0.214	0.242	0.269	0.303	0.335	0.369	0.407	0.447	0.489	0.556	0.698
0.67	0.83			0.072	0.188	0.216	0.243	0.277	0.309	0.343	0.381	0.421	0.463	0.530	0.672
0.65	0.84			0.046	0.162	0.190	0.217	0.251	0.283	0.317	0.355	0.395	0.437	0.504	0.645
0.62	0.85			0.020	0.136	0.164	0.191	0.225	0.257	0.291	0.329	0.369	0.417	0.478	0.620
0.59	0.86				0.109	0.140	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.343	0.390	0.450	0.593
0.57	0.87				0.083	0.114	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.317	0.364	0.424	0.567
0.54	0.88				0.054	0.085	0.112	0.143	0.175	0.209	0.246	0.288	0.335	0.395	0.538
0.51	0.89				0.028	0.059	0.086	0.117	0.149	0.183	0.230	0.262	0.309	0.369	0.512
0.48	0.90					0.031	0.058	0.089	0.121	0.155	0.192	0.234	0.281	0.341	0.484

	Значение, выбранное для примера в п.5.2
	Значение, выбранное для примера в п.5.4

Рис. L15: Реактивная мощность конденсаторов (квар), устанавливаемая на кВт нагрузки, для повышения коэффициента мощности

L13

При определенных (общепринятых) структурах тарифных ставок изучение счетов за период года с наибольшей нагрузкой позволяет определить уровень квар компенсации, требуемый для предотвращения излишней платы за реактивную энергию (квар/ч). Период окупаемости конденсаторов для повышения коэффициента мощности и сопутствующего оборудования составляет, как правило, 18 месяцев.

## 5.3 Метод, основанный на учете штрафных тарифов

Следующий метод позволяет рассчитать мощность предлагаемого блока (батареи) конденсаторов на основе данных по счетам за электроэнергию в тех случаях, когда структура тарифных ставок соответствует (или аналогична) описываемой в п.2.1 данного раздела.

Метод определяет минимальную компенсацию, требуемую для предотвращения штрафов за потребление избыточной реактивной энергии (квар·ч).

Метод заключается в следующем:

■ Подборка счетов за электроэнергию за 5 холодных месяцев (во Франции это период с ноября по март, включительно).

**Примечание:** в странах с тропическим климатом на летние месяцы может приходиться наибольшая нагрузка и максимальное потребление (из-за использования кондиционеров воздуха), и это необходимо учитывать при определении периодов повышенных расходов. В данном примере рассматривается холодный период года во Франции.

■ Просмотр в счетах строк «потребленная реактивная энергия» и «квар·ч к оплате». Выбор счета с максимальной платой за реактивную энергию (квар·ч) (после проверки того, что это не было вызвано некоторой исключительной ситуацией).

Например: 15966 квар·ч в январе.

■ Оценка общего времени рабочей нагрузки установки в течение этого месяца. Например, 220 часов (22 дня x 10 ч). Должны учитываться часы в течение наибольшей нагрузки и максимальных (пиковых) нагрузок энергосистемы. Такие данные содержатся в тарифной документации. Как правило, продолжительность периода максимальной нагрузки энергосистемы составляет 16 часов каждого дня (06.00 - 22.00 или 07.00 - 23.00 в зависимости от региона). Вне этих периодов плата за реактивную энергию невелика.

■ Необходимое значение компенсации в квар = квар·ч к оплате/число часов работы(1) = Qc

Как правило, мощность устанавливаемой КБ выбирается немного больше расчетного значения.

Некоторые изготовители прилагают к конденсаторам инструкции, предназначенные специально для такого рода расчетов согласно конкретным тарифам. Сопроводительная документация содержит рекомендации по оборудованию и схемам управления, а также информацию по ограничениям, налагаемым гармоническими напряжениями энергосистемы. Такие напряжения требуют конденсаторов с повышенными номинальными данными (теплоотдача, напряжение и ток) или фильтров для подавления гармоник.

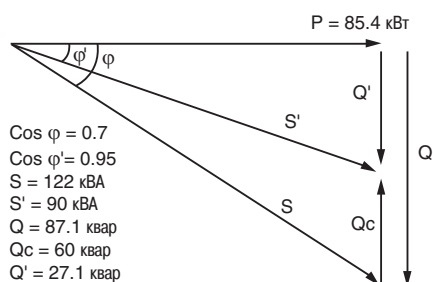
## 5.4 Метод, основанный на снижении заявленного (договорного) максимума мощности (кВА)

Очевидна выгода от снижения заявленной максимальной мощности (кВА) для потребителей, тарифы для которых основаны на постоянной плате за заявленные кВА, плюс доплата за потребленные кВтч. Диаграмма на **рис. L16** показывает, что по мере повышения коэффициента мощности уменьшается значение кВА при заданном значении кВт (P). Повышение коэффициента мощности нацелено (кроме других ранее указанных преимуществ) на снижение заявленного максимума и предотвращение его превышения (предотвращение платы по повышенной ставке за кВА в периоды максимального потребления и/или отключения электроснабжения, если имеется ограничитель). **Рис. L15** показывает значение квар компенсации на кВт нагрузки, требуемое для повышения значения коэффициента мощности.

**Пример:**

Супермаркет имеет максимальную нагрузку 122 кВА при коэффициенте мощности 0,7 (отставание), активная мощность составляет 85,4 кВт. Договор с таким потребителем основан на поэтапных увеличениях гарантированной мощности (шаг 6 кВА до 108 кВА и шаг 12 кВА выше этого значения, как это принято для многих типов двухставочных тарифов). В данном случае счет потребителю выставляется на основе 108 + 12 + 12 = 132 кВА. Согласно рис. L15, установка КБ 60 квар позволит повысить коэффициент мощности с 0,7 до 0,95 (0,691 x 85,4 = 59 квар). Заявленный (договорной) максимум кВА составит

$$\frac{85,4}{0,95} = 90 \text{ кВА, т.е., улучшение 30\%}.$$



**Рис. L16:** Снижение заявленного (договорного) максимума кВА за счет повышения коэффициента мощности

(1) В оплачиваемый период в течение часов оплачиваемой реактивной мощности в рассматриваемом выше случае:

$$Q_c = \frac{15,996 \text{ квар·ч}}{220 \text{ ч}} = 73 \text{ квар·ч}$$

## 6 Компенсация на зажимах трансформатора

Установка КБ может устранять необходимость замены трансформатора в случае увеличения нагрузки

### 6.1 Компенсация для повышения пропускной способности

Шаги, аналогичные принимаемым для снижения заявленного (договорного) максимума кВА путем повышения коэффициента мощности, как обсуждается в п.5.4, позволяют значительно увеличить пропускную способность трансформатора по активной мощности.

В некоторых случаях данный метод позволяет избежать замены трансформатора на трансформатор большей мощности для обслуживания возросшей нагрузки. Рис. L17 показывает мощность (кВт) полностью нагруженных трансформаторов при различных коэффициентах мощности нагрузки, увеличение которых приводит к увеличению пропускаемой активной мощности.

Пример: (см. рис. L18)

tg φ	cos φ	Номинальное значение мощности трансформаторов (кВА)											
		100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.00	1	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
0.20	0.98	98	157	245	309	392	490	617	784	980	1225	1568	1960
0.29	0.96	96	154	240	302	384	480	605	768	960	1200	1536	1920
0.36	0.94	94	150	235	296	376	470	592	752	940	1175	1504	1880
0.43	0.92	92	147	230	290	368	460	580	736	920	1150	1472	1840
0.48	0.90	90	144	225	284	360	450	567	720	900	1125	1440	1800
0.54	0.88	88	141	220	277	352	440	554	704	880	1100	1408	1760
0.59	0.86	86	138	215	271	344	430	541	688	860	1075	1376	1720
0.65	0.84	84	134	210	265	336	420	529	672	840	1050	1344	1680
0.70	0.82	82	131	205	258	328	410	517	656	820	1025	1312	1640
0.75	0.80	80	128	200	252	320	400	504	640	800	1000	1280	1600
0.80	0.78	78	125	195	246	312	390	491	624	780	975	1248	1560
0.86	0.76	76	122	190	239	304	380	479	608	760	950	1216	1520
0.91	0.74	74	118	185	233	296	370	466	592	740	925	1184	1480
0.96	0.72	72	115	180	227	288	360	454	576	720	900	1152	1440
1.02	0.70	70	112	175	220	280	350	441	560	700	875	1120	1400

Рис. L17: Активная мощность (кВт) полностью нагруженных трансформаторов при питании нагрузок с различными значениями коэффициента мощности

Установка питается от трансформатора 630 кВА при нагрузке 450 кВт (P1) и средним коэффициентом мощности 0,8 (отстающим). Полная мощность  $S1 = \frac{450}{0.8} = 562$  кВА

Соответствующая реактивная мощность

$$Q1 = \sqrt{S1^2 - P1^2} = 337 \text{ квар}$$

Расчетное увеличение нагрузки P2 = 100 кВт при коэффициенте мощности 0,7 (отставание).

$$\text{Полная мощность } S2 = \frac{100}{0.7} = 143 \text{ кВА}$$

Соответствующая реактивная мощность

$$Q2 = \sqrt{S2^2 - P2^2} = 102 \text{ квар}$$

Каково минимальное значение емкостной мощности квар, подлежащей установке для предотвращения замены трансформатора?

Теперь общая активная мощность составляет:

$$P = P1 + P2 = 550 \text{ кВт}$$

Максимальная реактивная мощность трансформатора 630 кВА при подаче 550 кВт составляет:

$$Qm = \sqrt{S^2 - P^2} \quad Qm = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{ квар}$$

Общая требуемая реактивная мощность до компенсации:

$$Q1 + Q2 = 337 + 102 = 439 \text{ квар}$$

Таким образом, минимальное значение устанавливаемой КБ:

$$Q_{\text{квар}} = 439 - 307 = 132 \text{ квар}$$

Следует отметить, что данный расчет не учитывает пиковые нагрузки и их продолжительность.

Если обеспечить компенсацию до коэффициента мощности 1, то пропускную способность можно увеличить еще на 630 - 550 = 80 кВт, но для этого придется дополнительно установить еще 439 - 132 = 307 квар конденсаторов.

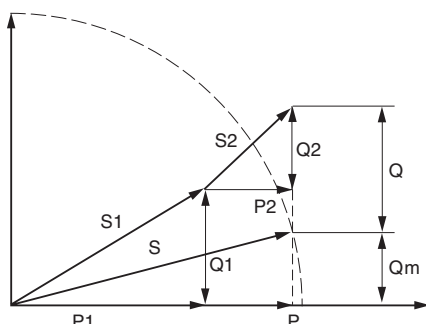


Рис. L18: Компенсация Q позволяет дополнительно питать нагрузку S2 без замены существующего трансформатора, мощность которого ограничивается значением S

При измерении на стороне высокого напряжения трансформатора потери реактивной мощности в трансформаторе могут (в зависимости от тарифа) требовать компенсации.

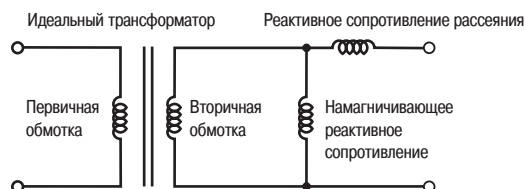


Рис. L19: Реактивные сопротивления трансформатора на фазу

Реактивная мощность, поглощаемая трансформатором, не может не приниматься во внимание, и может составлять около 5% от номинальной нагрузки. В трансформаторах реактивная мощность поглощается обоими реактивными сопротивлениями с параллельным (намагничивающие) и последовательным соединением (магнитный поток рассеивания). Полная компенсация может обеспечиваться параллельно подключенной КБ низкого напряжения

L16

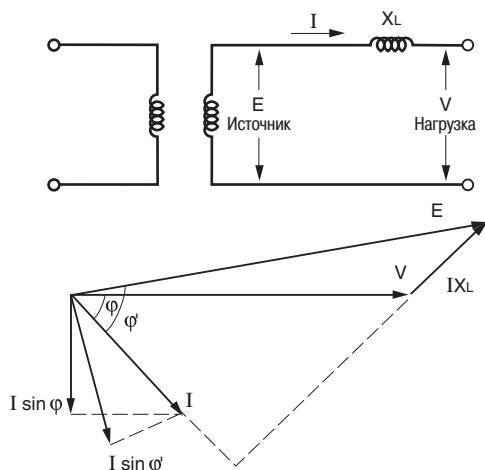


Рис. L20: Поглощение реактивной энергии последовательным индуктивным сопротивлением

## 6.2 Компенсация реактивной мощности, поглощаемой трансформатором

### Индуктивные реактивные сопротивления трансформатора

До сих пор в роли потребителей реактивной мощности рассматривались устройства с параллельным подключением к сети. Они потребляют наибольшее количество реактивной мощности. Однако, реактивные сопротивления с последовательным соединением, такие как индуктивные реактивные сопротивления силовых линий и реактивные сопротивления рассеяния обмоток трансформатора, также поглощают реактивную мощность.

При учете на стороне высокого напряжения трансформатора потери реактивной энергии в трансформаторе могут (в зависимости от тарифа) требовать компенсации. Поскольку рассматриваются только потери реактивной мощности, трансформатор может быть представлен с помощью элементарной схемы (рис. L19). Все значения реактивных сопротивлений приведены к вторичной обмотке трансформатора, на которой параллельное ответвление представляет путь намагничивающего тока. Намагничивающий ток остается практически постоянным (около 1,8% номинального тока) при изменении нагрузки от нуля до номинальной в нормальном режиме, т.е. при постоянном напряжении на первичной обмотке. Поэтому, на стороне высокого или низкого напряжения может устанавливаться постоянный (нерегулируемый) шунтирующий конденсатор для компенсации потерь реактивной мощности намагничивания.

### Потери реактивной мощности в последовательно включенном реактивном сопротивлении $X_L$ , обусловленном магнитным потоком рассеяния

Простая иллюстрация этого явления приводится на векторной диаграмме (рис. L20).

Реактивная составляющая тока через нагрузку  $= I \sin \phi$ , так что,  $Q_L = VI \sin \phi$ .

Реактивная составляющая тока от источника  $= I \sin \phi'$  так что,

$$Q_E = EI \sin \phi',$$

где  $V$  и  $E$  выражены в кВ.

Можно видеть, что  $E > V$  и  $\sin \phi' > \sin \phi$ .

Разница между  $EI \sin \phi'$  и  $VI \sin \phi$  дает значение квар на фазу (поглощение  $X_L$ ).

Можно показать, что такое значение квар равно  $I^2 X_L$  (аналог потерь активной мощности (кВт)  $I^2 R$  - потери в последовательно соединенных элементах).

Из формулы  $I^2 X_L$  легко вывести поглощаемое значение квар при любом значении нагрузки для заданного трансформатора.

Если используются значения в относительных единицах (вместо значений в процентах), можно выполнить прямое умножение  $I$  на  $X_L$ .

#### Пример:

Трансформатор 630 кВА с реактивной составляющей напряжения короткого замыкания 4% работает при полной нагрузке.

Каковы его нагрузочные потери реактивной мощности (квар)?

$$4\% = 0,04 \text{ о.е.}, \text{ т.е. } I_0 \text{ о.е.} = 1$$

$$\text{Потери} = I^2 X_L = 1^2 \times 0,04 \text{ о.е.},$$

$$\text{единица мощности} = 630 \text{ кВА}$$

Трехфазные нагрузочные потери реактивной мощности (квар)  $= 630 \times 0,04 = 25,2$  квар (или 4% от 630 кВА).

При половине нагрузки, т.е.  $I = 0,5$  о.е. потери составят:

$$0,5^2 \times 0,04 = 0,01 \text{ о.е. или в квар: } 630 \times 0,01 = 6,3 \text{ квар.}$$

Данный пример и векторная диаграмма (рис. L22) показывают, что:

- Коэффициент мощности на стороне первичной обмотки нагруженного трансформатора отличается (нормально ниже) от коэффициента на вторичной обмотке (из-за потерь реактивной мощности (квар)).
- Нагрузочные потери реактивной мощности (квар) при полной нагрузке равны реактивному сопротивлению трансформатора в о.е. умноженному на  $S_{ном}$  (нагрузочные потери реактивной мощности (квар), равные 4% номинальной мощности кВА трансформатора).
- Нагрузочные потери реактивной мощности (квар) изменяются согласно квадрату тока (или мощности кВА).

## 6 Компенсация на зажимах трансформатора

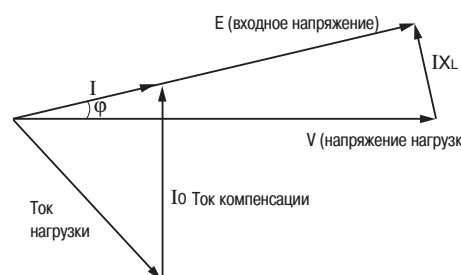
Для определения общих потерь реактивной мощности (квар) трансформатора необходимо добавить постоянные потери в цепи намагничивающего тока (приблизительно 1,8% номинального значения кВА трансформатора) к указанным нагрузочным потерям. **Рис. L21** показывает потери реактивной мощности (квар) при холостом ходе и при полной нагрузке для типового распределительного трансформатора. В принципе, последовательно включенные индуктивные сопротивления могут компенсироваться последовательно включенными нерегулируемыми конденсаторами (как в общем случае протяженных высоковольтных линий передачи). Однако, такая схема сложна для выполнения, тем более, что при уровнях напряжения, рассматриваемых в данном руководстве, всегда применима параллельная компенсация.

В случае учета на стороне высокого напряжения достаточно повысить коэффициент мощности до значения, при котором трансформатор плюс потребление реактивной мощности нагрузки ниже уровня, при котором взимается дополнительная плата за электроэнергию. Этот уровень зависит от тарифа, но часто соответствует значению  $\tan \varphi = 0,31$  ( $\cos \varphi = 0,955$ ).

Номинальная мощность (кВА)	Реактивная мощность (квар), подлежащая компенсации	
	Без нагрузки	Полная нагрузка
100	2.5	6.1
160	3.7	9.6
250	5.3	14.7
315	6.3	18.4
400	7.6	22.9
500	9.5	28.7
630	11.3	35.7
800	20	54.5
1000	23.9	72.4
1250	27.4	94.5
1600	31.9	126
2000	37.8	176

**Рис. L21:** Потери реактивной мощности для распределительных трансформаторов с первичными обмотками 20 кВ

Теоретически, потери реактивной мощности (квар) в трансформаторе могут быть полностью компенсированы путем регулирования блока конденсаторов таким образом, чтобы создать небольшой избыток реактивной мощности конденсаторов ( $Q_C$ ) по сравнению с реактивной мощностью нагрузки ( $Q_L$ ) ( $Q_C - Q_L > 0$ ). При этом коэффициент мощности на стороне НН ( $\cos \varphi$ ) увеличится и будет опережающим. В таком случае вся реактивная мощность потерь трансформатора поступает от КБ, а на стороне высокого напряжения трансформатора коэффициент мощности 1, как показано на **рис. L22**.



**Рис. L22:** Перекомпенсация нагрузки до полной компенсации потерь реактивной мощности в трансформаторе

С практической точки зрения, компенсация реактивной энергии в трансформаторе, осуществляется конденсаторами, главным образом предназначенными для повышения коэффициента мощности нагрузки (централизованно, по группам или индивидуально). В отличие от большинства других элементов, потребляющих реактивную мощность, потребление трансформатором (из-за реактивного сопротивления рассеяния) значительно изменяется при изменении уровня нагрузки, так что, если для трансформатора применяется индивидуальная компенсация, то средний уровень нагрузки должен приниматься в качестве гарантированного.

Однако, такое потребление реактивной мощности составляет, как правило, относительно небольшую часть общей реактивной мощности установки, и поэтому рассогласование компенсации с временным изменением нагрузки не представляет проблемы.

Рис. L21 показывает типовые значения потерь реактивной энергии для намагничивающей цепи (строка «Без нагрузки»), а также общие потери при полной нагрузке для стандартных распределительных трансформаторов, с первичным напряжением 20 кВ (с учетом нагрузочных потерь).



# 7 Повышение коэффициента мощности асинхронных двигателей

Индивидуальная компенсация для двигателя рекомендуется для двигателей большой мощности (кВА) по отношению к заявленной мощности установки

## 7.1 Расположение КБ и уставки защиты

### Общие замечания

Из-за малого потребления активной мощности коэффициент мощности двигателя крайне низкий при холостом ходе или при малой нагрузке. Реактивный ток двигателя остается практически постоянным при всех нагрузках, так что на ряд ненагруженных двигателей приходится потребление реактивной мощности, которое лишь негативно сказывается на установке по причинам, описанным в предыдущих разделах.

Поэтому, два хороших правила состоят в том, что ненагруженные двигатели следует выключать, а номинальные мощности двигателей не должны завышаться (поскольку это снизит их загрузку).

### Соединение

КБ должен подключаться непосредственно к зажимам двигателя.

### Специальные двигатели

Не рекомендуется применять компенсации для специальных двигателей (шаговых, реверсивных и т.д.).

### Влияние на уставки защиты

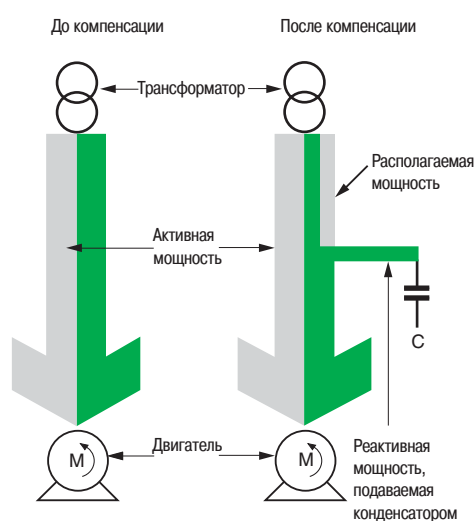
После применения компенсации для двигателя ток блока двигатель-конденсатор станет меньше, чем до компенсации, при том же режиме нагрузки двигателя. Это вызвано тем, что значительная часть реактивной составляющей тока двигателя подается от конденсатора, как показано на **рис. L23**.

Если максимальная токовая защита двигателя расположена до соединения двигателя и конденсатора (это всегда так в случае подсоединения конденсаторов к зажимам), уставки реле защиты должны уменьшаться на отношение:

$\cos \varphi$  до компенсации /  $\cos \varphi$  после компенсации

Для двигателей с компенсацией в соответствии со значениями квар, показанными на **рис. L24** (максимальные значения, рекомендуемые для предотвращения самовозбуждения стандартных асинхронных двигателей, как обсуждается в п.7.2), величины указанного выше отношения приведены для различных скоростей на **рис. L25**.

L18



**Рис. L23:** До компенсации трансформатор пропускает всю реактивную мощность, после компенсации конденсатор подает большую часть реактивной мощности

Трехфазные двигатели, 230/400 В					
Номинальная мощность		Устанавливаемая мощность (квар)			
		Скорость вращения (об/мин)			
кВт	л.с.	3000	1500	1000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7.5	10	11	12.5
37	50	9	11	12.5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

**Рис. L24:** Максимальное значение квар индивидуальной компенсации реактивной мощности без риска самовозбуждения двигателя

Обороты (об/мин)	Коэффициент уменьшения
750	0.88
1000	0.90
1500	0.91
3000	0.93

**Рис. L25:** Коэффициент уменьшения для максимально токовой защиты после компенсации

Если КБ подсоединяется к зажимам асинхронного двигателя, важно проверить, что его номинальное значение меньше значения, при котором возможно самовозбуждение.

## 7.2 Методы предотвращения самовозбуждения асинхронного двигателя

Двигатель с высокоинерционной нагрузкой будет продолжать вращаться (если специально не затормаживается) после отключения его питания.

«Магнитная инерция» цепи ротора означает создание ЭДС в обмотке статора на короткий период времени после выключения, которая уменьшится до нуля через 1 или 2 периода в случае двигателя без компенсации.

Однако, подключенные конденсаторы создают трехфазную реактивную нагрузку для такой затухающей ЭДС, которая вызывает емкостные токи в обмотке статора. Такие токи в статоре создают вращающееся магнитное поле, которое действует точно по той же оси и в том же направлении, что и затухающее электромагнитное поле.

Как следствие, поток ротора увеличивается, токи статора увеличиваются, и напряжение на зажимах двигателя повышается иногда до опасно высокого уровня. Это явление известно как самовозбуждение и является одной из причин того, почему генераторы переменного тока, как правило, не работают при опережающих коэффициентах мощности, т.е. имеется тенденция к спонтанному (и неконтролируемому) самовозбуждению.

### Примечания:

1. Характеристики двигателя, приводимого в движение инерцией нагрузки, не являются строго идентичными его характеристикам холостого хода. Однако, данное предположение является достаточно точным с практической точки зрения.
2. В двигателе, действующем в качестве генератора, циркулирующие токи являются в основном реактивными, так что эффект торможения (замедления) двигателя вызван главным образом только нагрузкой, представленной его охлаждающим вентилятором.
3. Ток (угол отставания почти  $90^\circ$ ), потребляемый от источника питания ненагруженным двигателем в нормальных условиях, и ток (угол опережения почти  $90^\circ$ ), подаваемый на конденсаторы двигателем, выступающим в качестве генератора, имеют одинаковое фазовое соотношение с напряжением на зажимах. Именно поэтому две характеристики могут налагаться на один график.

Для предотвращения самовозбуждения, как описывается выше, номинальная мощность (квар) блока конденсаторов должна ограничиваться следующим максимальным значением:

$Q_c \leq 0.9 \times I_0 \times U_n \times \sqrt{3}$ , где  $I_0$  - ток холостого хода двигателя и  $U_n$  - межфазное номинальное напряжение двигателя (кВ). На **рис. L24** приводятся значения  $Q_c$ , соответствующие данному критерию.

### Пример:

Трехфазный двигатель, 75 кВт, 3000 об/мин, 400 В, может иметь блок конденсаторов не выше 17 квар согласно **рис. L24**. Табличные значения, как правило, слишком малы для соответствующей компенсации двигателя до нормально требуемого уровня  $\cos \phi$ . Однако, дополнительная компенсация может осуществляться, например, с помощью КБ централизованной компенсации, установленной на шинах ТП.

### Высокоинерционные двигатели и/или нагрузки

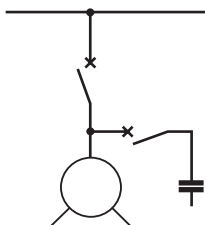
В любой установке с высокоинерционными нагрузками, приводимыми в действие двигателями, выключатели или контакторы, управляющие такими двигателями, должны быстро выключаться в случае полной потери электропитания.

Если не принять такой меры предосторожности, высока вероятность возникновения крайне высоких напряжений (из-за самовозбуждения), поскольку все другие КБ, работающие в сети, параллельно с конденсаторами высокоинерционных двигателей.

Поэтому схема защиты таких двигателей должна содержать реле отключения по максимальному напряжению вместе с реле контроля обратной мощности (двигатель подает питание на остальное оборудование до рассеяния полученной инерциальной энергии).

Если мощность конденсаторов, индивидуальной компенсации высокоинерционного двигателя, больше, чем рекомендованная на **рис. L24**, они должны управляться отдельно с помощью выключателя или контактора, который осуществляет выключение вместе с главным выключателем или контактором двигателя, как показано на **рис. L26**.

Включение главного контактора осуществляется после включения конденсаторов.

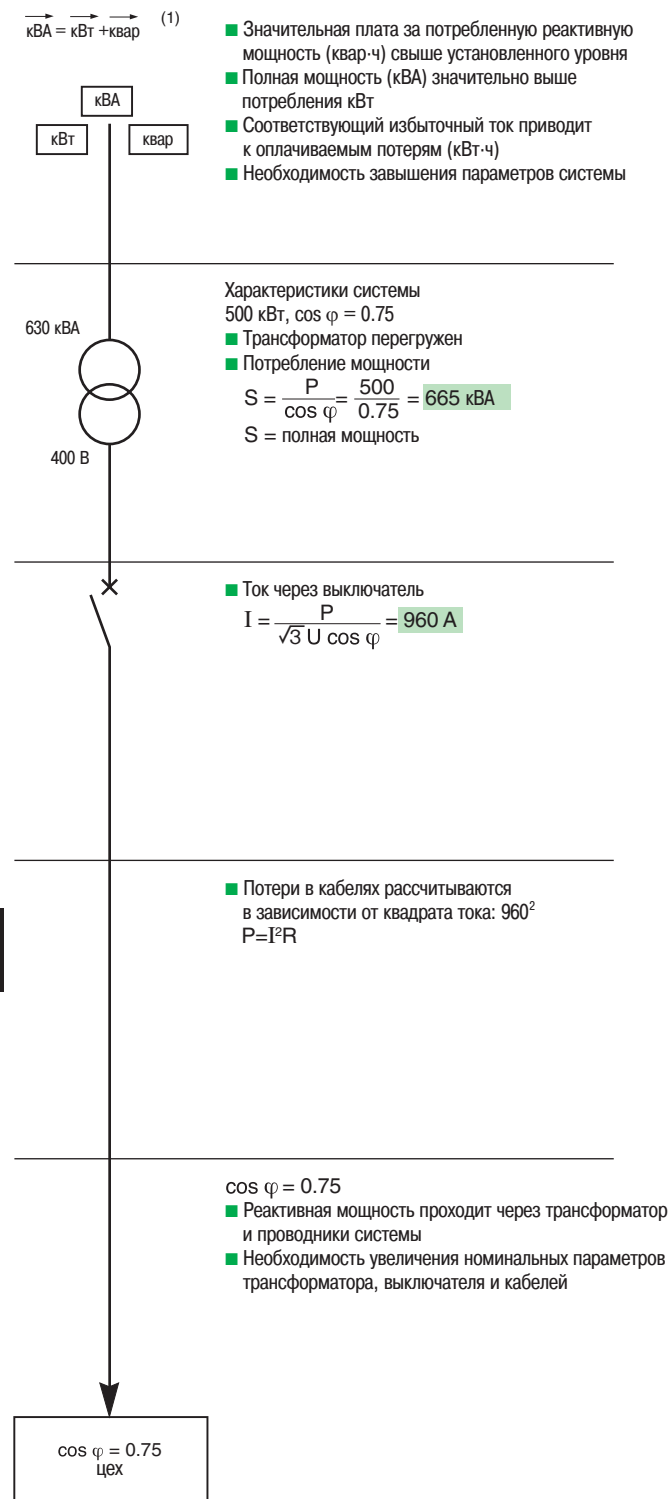


**Рис. L26:** Подсоединение блока конденсаторов к двигателю

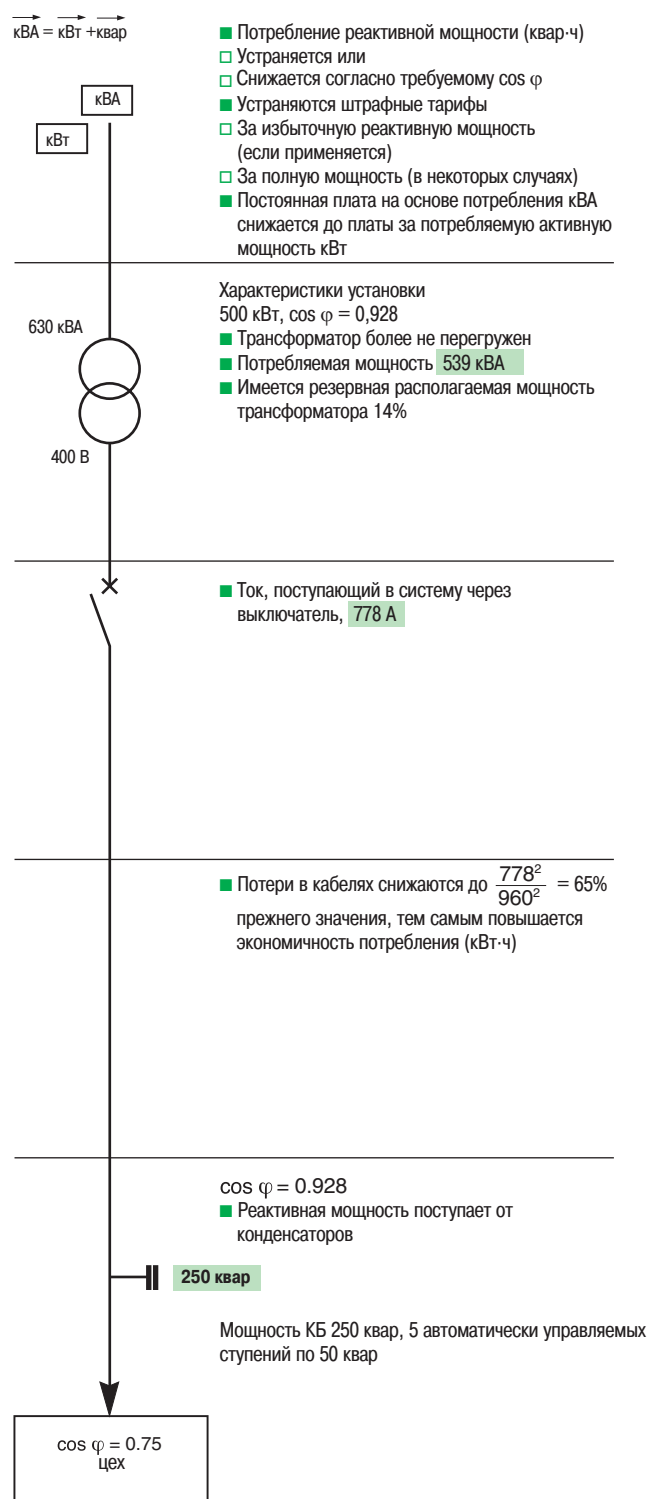


## 8 Работа установки до и после компенсации реактивной мощности

### Установка до компенсации реактивной мощности



### Установка после компенсации реактивной мощности



**Примечание:** фактически,  $\cos \varphi$  цеха остается равным 0,75, но  $\cos \varphi$  всей установки до блока конденсаторов на низковольтных терминалах трансформатора - 0,928. Как указывается в п.6.2,  $\cos \varphi$  на стороне высокого напряжения трансформатора немного ниже (2) из-за потерь реактивной мощности в трансформаторе.

Рис. L27: Техничко-экономическое сравнение установки до и после компенсации реактивной мощности

(1) Стрелки указывают векторные величины.  
(2) Тем более в случае до компенсации.

## 9 Влияние гармоник

### 9.1 Проблемы, связанные с гармоническими составляющими напряжения

Оборудование, включающее силовые электронные компоненты (частотное регулирование двигателей, тиристорные выпрямители и т.д.) значительно увеличивает проблемы, вызываемые гармоническими составляющими в системе электропитания.

Гармоники создают проблемы с момента зарождения промышленности и вызваны нелинейными сопротивлениями тиристорных, диодных, намагничивающих трансформаторов, реакторов, балластными сопротивлениями резонансных ламп и т.д.

Гармоники симметричных трехфазных систем являются, как правило, нечетными (третья, пятая, седьмая, девятая), и их величина уменьшается с увеличением порядкового номера. Несколько устройств могут быть использованы для снижения конкретных гармоник до пренебрежимо малых значений – полное устранение невозможно. В данном разделе рекомендуются практические средства снижения влияния гармоник, особенно для защиты КБ.

Конденсаторы особо чувствительны к гармоническим составляющим питающего напряжения в силу того, что емкостное реактивное сопротивление уменьшается при увеличении частоты. На практике это означает, что относительно малый процент гармонических напряжений может вызывать протекание значительного тока в цепи конденсаторов.

Присутствие гармоник вызывает искажение (нормально синусоидальной) формы волны напряжения или тока. Чем выше содержание гармоник, тем больше степень искажения.

Если собственная резонансная частота комбинации «КБ - реактивное сопротивление энергосистемы» близка к частоте конкретной гармоники, возникает частичный резонанс с повышенными значениями напряжения и тока при частоте гармоники. В данном случае повышенный ток вызовет перегрев конденсатора с постепенным ухудшением диэлектрика, которое в конечном итоге приводит его к выходу из строя.

Имеется несколько решений этих проблем с применением следующих средств:

- параллельно подсоединенные фильтр и/или реакторы для подавления гармоник;
- активные силовые фильтры;
- гибридные фильтры.

Влияние гармоник учитывается, главным образом, путем увеличения номинального напряжения конденсаторов и последовательного включения реакторов для подавления гармоник.

### 9.2 Возможные решения

#### Пассивный фильтр (см. рис. L28)

##### Противодействие гармоникам

Присутствие гармоник в питающем напряжении приводит к ненормально высоким уровням тока через конденсаторы. Поправка на это делается при расчете с учетом среднеквадратичного значения тока, которое в 1,3 раза больше номинального тока. Все последовательные элементы, такие как соединения, плавкие предохранители, переключатели, связанные с конденсаторами, рассчитываются с аналогичным увеличением (в 1,3-1,5 раза больше номинального значения).

Искажение гармониками формы волны напряжения часто выражается в появлении «пигов» и увеличении амплитуды нормальной синусоидальной волны. Такая возможность вместе с другими условиями перенапряжения, которые могут возникать при противодействии резонансным эффектам, как описывается ниже, учитываются путем увеличения уровня изоляции выше уровня изоляции «стандартных» конденсаторов. Во многих случаях эти две меры достаточны для обеспечения удовлетворительной работы.

##### Противодействие резонансным эффектам

Конденсаторы являются линейными реактивными устройствами и, как следствие, не генерируют гармоник. Однако, установка конденсаторов в энергосистеме (в которой сопротивления являются преимущественно индуктивными) может приводить к суммарному или частичному резонансу на одной из гармонических частот.

Порядок гармоники  $h_0$  наименьшей резонансной частоты между индуктивностью системы и КБ определяется по формуле:

$$h_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

где

$S_{sc}$  - мощность КЗ системы (кВА) в точке присоединения КБ;

$Q$  - номинальная мощность КБ в квар;

$h_0$  - порядок гармоники, наименьшей резонансной частоты  $f_0$ , т.е.  $\frac{f_0}{50}$  для системы 50 Гц или  $\frac{f_0}{60}$  для системы 60 Гц.

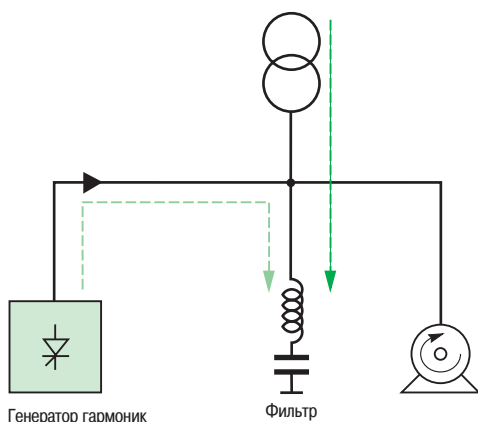


Рис. L28: Принцип работы пассивного фильтра

L21

Например,  $h_o = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$  может дать значение 2,93, которое показывает, что

наименьшая частота резонанса комбинации «конденсатор/индуктивность системы» близка к частоте гармоники третьего порядка.

Из соотношения  $h_o = \frac{f_o}{50}$  следует, что  $f_o = 50 h_o = 50 \times 2,93 = 146,5$  Гц.

Чем ближе собственная частота резонанса приближается к частоте одной из гармоник, присутствующей в системе, тем больше нежелательный эффект. В вышеприведенном примере с большой вероятностью возникнут условия резонанса с гармонической составляющей третьего порядка искаженной волны.

В таких случаях необходимо принять меры для исключения резонанса с какой-либо присутствующей гармоникой. Это достигается путем последовательного с конденсатором катушки индуктивности.

В системах 50 Гц такие реакторы часто подбираются на доведение собственной частоты резонанса блока конденсатор - реактор, до 190 Гц. Реакторы настраиваются на 228 Гц для системы 60 Гц. Такие частоты соответствуют значению  $h_o = 3,8$ , т.е. приблизительно посередине между гармониками третьего и пятого порядка.

В такой схеме присутствие реактора увеличивает ток основной частоты (50 или 60 Гц) на небольшую величину (7-8%), а также напряжение на конденсаторе в том же соотношении.

Поэтому в сети 400 В применяют конденсаторы с номинальным напряжением 440 В.

### Активный фильтр (см. рис. L29)

Активные фильтры основаны на использовании силовой электроники. Как правило, они устанавливаются параллельно с нелинейной нагрузкой.

Активные фильтры анализируют гармоники, вводимые нагрузкой, и затем подают ток такой же гармоники на нагрузку с соответствующей фазой. В результате гармонические токи полностью нейтрализуются. Это означает, что они не могут больше проходить вверх к источнику питания и больше не выдаются источником.

Основное преимущество активных фильтров состоит в том, что они гарантируют эффективную компенсацию гармоник даже при изменении установки. Они исключительно просты в использовании в силу следующих характеристик:

- автоматическая настройка конфигурации под гармонические нагрузки независимо от порядка гармоник;
- устранение рисков перегрузки;
- совместимость с электрогенераторами;
- подключение в любой точке электрической сети;
- несколько фильтров могут использоваться в одной и той же установке для повышения эффективности устранения гармоник (например, в случае установки новой машины).

Кроме того, активные фильтры могут также обеспечить компенсацию реактивной мощности.

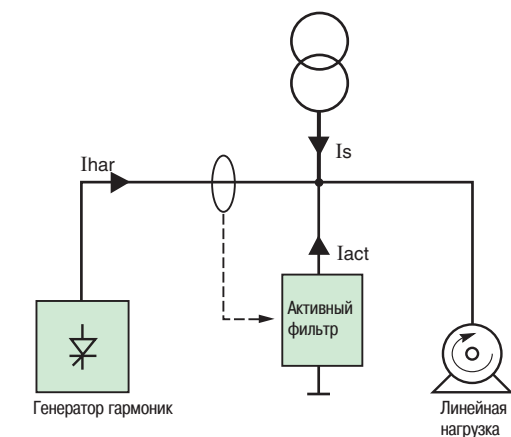


Рис. L29: Принцип работы активного фильтра

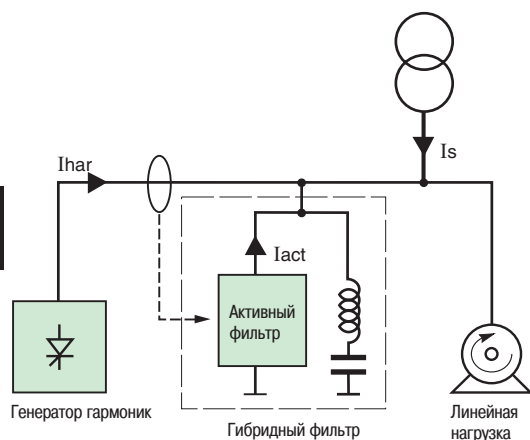


Рис. L30: Принцип работы гибридного фильтра

## Гибридный фильтр (см. рис. L30)

Данный тип фильтра объединяет преимущества пассивного и активного фильтров. Одна частота может отфильтровываться пассивным фильтром, а все другие частоты – активным фильтром.

## 9.3 Выбор оптимального решения

**Рис. L31** ниже показывает критерии, которые могут учитываться при выборе наиболее пригодной технологии в зависимости от области применения.

	Пассив. фильтр	Активный фильтр	Гибрид. фильтр
Область применения	Промышл.	Третьего порядка	Промышленность
при общей мощности нелинейных нагрузок (ПЧ, ИБП, выпрямитель)	Свыше 200 кВА	Менее 200 кВА	Свыше 200 кВА
Компенсация реактивной мощности		Нет	
Подавление гармонических искажений в напряжении для чувствительных нагрузок			
Подавление гармонических искажений в токе для предотвращения перегрузки кабелей			
Обеспечение строгих пределов устранения гармоник	Нет		

**Рис. L31:** Выбор наиболее пригодной технологии в зависимости от области применения

Для пассивного фильтра выбор делается на основе следующих параметров:

- $G_h$  - сумма номинальных значений кВА всех устройств, генерирующих гармоники (статические преобразователи, инвертеры, регуляторы скорости), питаемых от шин, к которым подключена КБ. Если номинальные мощности некоторых из таких устройств указываются только в кВт, принимается средний коэффициент мощности 0,7 для получения номинальных значений кВА.
- $S_{sc}$  - мощность трехфазного короткого замыкания в кВА на зажимах блока конденсаторов.
- $S_n$  - сумма номинальных мощностей кВА всех питающих трансформаторов.

Если ряд трансформаторов работает в параллельном режиме, вывод одного или нескольких из них приводит к значительному изменению значений  $S_{sc}$  и  $S_n$ . На основе этих параметров выбор конденсатора, обеспечивающего допустимый уровень работы при гармонических напряжениях и токах системы, может производиться с помощью **рис. L32**.

L23

- Общее правило, применимое для трансформатора с любой номинальной мощностью:

$G_h \leq \frac{S_{sc}}{120}$	$\frac{S_{sc}}{120} \leq G_h \leq \frac{S_{sc}}{70}$	$G_h > \frac{S_{sc}}{70}$	
Стандартные конденсаторы	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10% (кроме блоков 230 В)	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10%, + реактор для подавления гармоник	
■ Упрощенное правило при номинальном значении трансформатора(ов) $S_n \leq 2$ МВА:			
$G_h \leq 0.15 S_n$	$0.15 S_n < G_h \leq 0.25 S_n$	$0.25 S_n < G_h \leq 0.60 S_n$	$G_h > 0.60 S_n$
Стандартные конденсаторы	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10% (кроме блоков 230 В)	Номинальное напряжение конденсатора, увеличенное на 10%, + реактор для подавления гармоник	Фильтр

**Рис. L32:** Выбор решений по ограничению гармоник, воздействующих на низковольтную КБ, подключенную к шинам ТП

10.1 Емкостные элементы

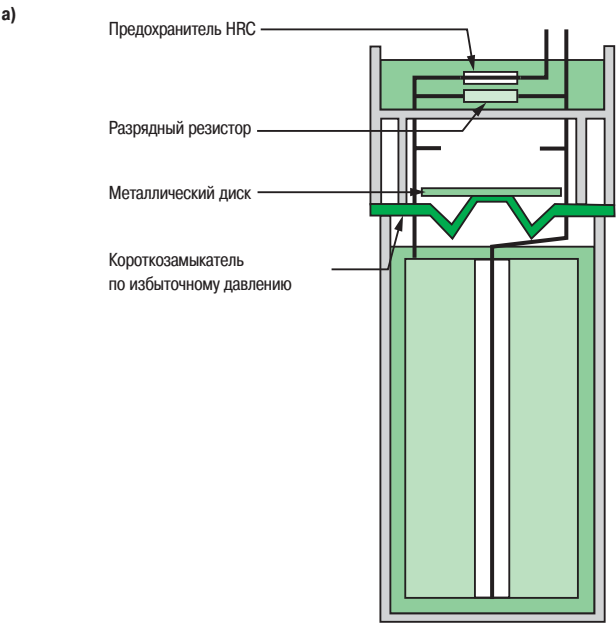
Технология

Конденсаторы являются сухими элементами (т.е. не пропитаны жидким диэлектриком), представляющими собой катушку двухслойной ленты из металлизированной самовосстанавливающейся полипропиленовой пленки. Они защищены высокоэффективной системой короткозамыкателя, срабатывающий при повышении давления, используемый с плавким предохранителем с высокой отключающей способностью), которая отключает конденсатор при внутреннем повреждении.

Схема защиты работает следующим образом:

- короткое замыкание через диэлектрик приводит к перегоранию плавкого предохранителя;
- иногда возникают уровни тока выше нормального, но недостаточные для перегорания предохранителя, например, из-за микроскопических пробоев в диэлектрической пленке. Такие «повреждения» часто ликвидируются из-за местного нагрева, вызванного током утечки («самовосстанавливающиеся» элементы);
- если ток утечки сохраняется, повреждение может развиваться в короткое замыкание и плавкий предохранитель перегорит;
- газ, образующийся при испарении слоя металла в месте повреждения, постепенно повышает давление в пластиковом контейнере, что приводит к срабатыванию чувствительного к давлению устройства, которое закорачивает элемент, что приводит к перегоранию предохранителя.

Корпус конденсатора изготавливается из изоляционного материала, что обеспечивает его двойной изоляцией и устраняет необходимость заземления (см. [рис. L33](#)).



b)

Электрические характеристики		
Стандарты		Стандарты МЭК 60439-1, NFC 54-104, VDE 0560 CSA, испытания UL
Рабочий диапазон	Номинальное напряжение	400 В
	Номинальная частота	50 Гц
Допустимое отклонение емкости		- 5%, + 10%
Диапазон температур (до 65 квар)	Максимальная температура	55 °C
	Средняя температура за 24 ч	45 °C
	Среднегодовая температура	35 °C
	Минимальная температура	- 25 °C
Уровень изоляции		Выдерживаемое напряжение, 50 Гц, 1 мин: 6 кВ Выдерживаемое импульс. напряжение 1.2/50: 25 кВ
Допустимая перегрузка по току	Стандартный диапазон	Диапазон Н
	30%	50%
Допустимая перегрузка по напряжению		10% 20%

Рис. L33: Емкостный элемент, (a) поперечное сечение, (b) электрические характеристики

## 10.2 Выбор устройств защиты и управления и соединительных кабелей

Выбор соединительных кабелей и устройств защиты зависит от токовой нагрузки.

Для конденсаторов ток зависит от следующих параметров:

- приложенное напряжение и его гармоники;
- величина емкости.

Номинальный ток батареи конденсаторов мощности Q (квар) и номинальным напряжением Un (кВ) определяется по формуле:

$$I_n = \frac{Q}{U_n \sqrt{3}}$$

Допустимый диапазон приложенного напряжения основной частоты плюс гармонические составляющие вместе с производственными допусками на фактическую емкость (относительно номинального значения) могут приводить к повышению тока до 50% выше его расчетного значения. Приблизительно 30% такого повышения вызваны возможным повышением напряжения, а 15% - производственными допусками, так что

$$1,3 \times 1,15 = 1,5 I_n$$

Все компоненты конденсатора, проводящие ток, должны быть рассчитаны на «наихудший режим» работы при температуре окружающей среды 50 °С (максимум). При более высоких температурах (выше 50 °С) в корпусах и т.д., необходимо учесть уменьшение номинальных характеристик этих компонентов.

### Защита

Выключатель выбирается так, чтобы обеспечить защиту от перегрузок при уставках по току равных:

- $1,36 \times I_n$  для типа Classic <sup>(1)</sup>;
- $1,50 \times I_n$  для типа Comfort <sup>(1)</sup>;
- $1,12 \times I_n$  для типа Harmony <sup>(1)</sup> (настройка на 2,7 f) <sup>(2)</sup>;
- $1,19 \times I_n$  для типа Harmony <sup>(1)</sup> (настройка на 3,8 f) <sup>(2)</sup>;
- $1,31 \times I_n$  для типа Harmony <sup>(1)</sup> (настройка на 4,3 f) <sup>(2)</sup>.

Уставка защиты от КЗ должна быть нечувствительна к броску тока. Уставка составляет  $10 \times I_n$  для типов Classic, Comfort и Harmony.

#### Пример 1

50 квар – 400 В – 50 Гц – тип Classic

$$I_n = \frac{50.000}{(400 \times 1.732)} = 72 \text{ A}$$

Уставка защиты от перегрузок:  $1,36 \times 72 = 98 \text{ A}$

Уставка защиты от КЗ:  $10 \times I_n = 720 \text{ A}$

#### Пример 2

50 квар – 400 В – 50 Гц – тип Harmony (настройка на 4,3 f)

$$I_n = 72 \text{ A}$$

Уставка защиты от перегрузок:  $1,31 \times 72 = 94 \text{ A}$

Уставка защиты от КЗ:  $10 \times I_n = 720 \text{ A}$

### Соединительные кабели

На **рис. L34** приводятся минимальные значения площади поперечного сечения соединительного кабеля для конденсаторов Rectiphase.

### Кабели управления

Минимальная площадь поперечного сечения таких кабелей – 1,5 мм<sup>2</sup> для 230 В.

Для стороны вторичной обмотки трансформатора, рекомендуемая площадь поперечного сечения ≥ 2,5 мм<sup>2</sup>.

(1) Classic, Comfort, Harmony - обозначения КБ Schneider Electric.

(2) КБ Harmony укомплектованы токоограничивающими реакторами.

Мощность блока (квар)		Сечение медного кабеля (мм²)	Сечение алюминиевого кабеля (мм²)
230 В	400 В		
5	10	2.5	16
10	20	4	16
15	30	6	16
20	40	10	16
25	50	16	25
30	60	25	35
40	80	35	50
50	100	50	70
60	120	70	95
70	140	95	120
90-100	180	120	185
	200	150	240
120	240	185	2 x 95
150	250	240	2 x 120
	300	2 x 95	2 x 150
180-210	360	2 x 120	2 x 185
245	420	2 x 150	2 x 240
280	480	2 x 185	2 x 300
315	540	2 x 240	3 x 185
350	600	2 x 300	3 x 240
385	660	3 x 150	3 x 240
420	720	3 x 185	3 x 300

Рис. L34: Сечение кабелей, соединяющих блоки конденсаторов средней и большой мощности <sup>(1)</sup>

Переходные напряжения

Переходные напряжения высокой частоты сопровождают переходные токи высокой частоты. Максимальный пик переходного напряжения никогда (при отсутствии гармоник установившегося режима) не превышает удвоенного максимального значения номинального напряжения при включении незаряженного конденсатора в работу.

Однако, если конденсатор уже заряжен в момент включения выключателя, переходное напряжение может достигать максимального значения, приблизительно в 3 раза превышающего номинальное амплитудное значение.

Этот максимальный режим возникает при следующих условиях:

- существующее напряжение на конденсаторе равно амплитудному значению номинального напряжения;
- контакты переключателя замыкаются в момент амплитудного питающего напряжения;
- полярность питающего напряжения противоположна полярности заряженного конденсатора.

В такой ситуации переходный ток принимает свое максимальное возможное значение, а именно, вдвое больше своего максимума при включении предварительно незаряженного конденсатора, как указывается выше.

Для любых других значений напряжения и полярности на предварительно заряженном конденсаторе, переходные пики напряжения и тока будут меньше, чем указанные выше. В случае пикового номинального напряжения на конденсаторе, имеющего ту же полярность, что и питающее напряжение, и включения переключателя в момент пика питающего напряжения, не будет переходного напряжения или тока.

В случае автоматического переключения секций КБ, необходимо обеспечить, чтобы включаемая секция конденсаторов была полностью разряжена.

Время разрядки может уменьшаться, при необходимости, с помощью разрядных резисторов с пониженным значением сопротивления.

(1) Минимальное поперечное сечение, недопустимое для любых факторов коррекции (режима установки, температуры и т.д.). Расчет сделан для однофазных кабелей, проложенных открыто при температуре окружающей среды 30 °C.

# Глава М

## Управление гармониками

Содержание		
1	Проблема: зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?	M2
2	Стандарты	M3
3	Общие положения	M4
4	Основные виды воздействий гармоник на электроустановки	M6
	4.1 Резонанс	M6
	4.2 Увеличенные потери	M6
	4.3 Перегрузки оборудования	M7
	4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки	M9
	4.5 Экономические последствия	M10
5	Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения	M11
	5.1 Коэффициент мощности	M11
	5.2 Крест-фактор	M11
	5.3 Параметры мощности и гармоники	M11
	5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение	M12
	5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)	M12
	5.6 Использование различных показателей	M13
6	Измерение показателей	M14
	6.1 Устройства, используемые для измерения показателей	M14
	6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных сетей	M14
	6.3 Тщательный контроль гармоник	M15
7	Устройства обнаружения	M16
8	Способы ослабления гармоник	M17
	8.1 Основные рекомендации	M17
	8.2 Фильтрация гармоник	M18
	8.3 Метод	M20
	8.4 Модели фильтров	M20

**M1**



# 1 Проблема: зачем нужно обнаруживать и устранять гармоники?

## Возмущения, вызываемые гармониками

Гармоники, протекающие по распределительным сетям, вызывают снижение качества электрической энергии, что может иметь ряд негативных последствий:

- перегрузки в распределительных сетях из-за увеличения действующего значения тока;
- перегрузки в нулевых (нейтральных) проводниках из-за суммирования токов высших гармоник, кратных трем, которые генерируются однофазными нелинейными нагрузками;
- перегрузки, вибрация и преждевременное старение генераторов, трансформаторов и электродвигателей, а также повышенный шум трансформаторов;
- перегрузки и преждевременное старение конденсаторов для повышения коэффициента мощности;
- искажение формы питающего напряжения, которое может повлиять на «чувствительные» нагрузки;
- помехи в сетях связи и телефонных линиях.

## Экономические последствия гармонических возмущений

Гармоники имеют значительные экономические последствия:

- преждевременное старение оборудования означает необходимость его замены раньше запланированного срока, если в нем с самого начала не был предусмотрен запас мощности;
- перегрузки в распределительной сети могут привести к более высоким уровням потребления энергии и увеличению потерь;
- искажение формы кривой тока, способное вызывать ложное срабатывание автоматических выключателей, что может приводить к остановке производственного процесса.

## Наращение степени серьезности последствий

Всего десять лет назад гармоники еще не считались реальной проблемой, поскольку их влияние на распределительные сети было в целом незначительным. Однако массовое внедрение силовой электроники в различные виды оборудования привело к тому, что наличие гармоник стало серьезно сказываться во всех секторах экономической деятельности.

Кроме того, оборудование, порождающее такие гармоники, часто является критически важным для компании или организации.

## Какие гармоники нужно измерять и устранять?

Чаще всего в трехфазных распределительных сетях встречаются гармоники нечётного порядка. С увеличением частоты амплитуды гармоник обычно снижаются. Гармоники выше 50-го порядка имеют незначительную амплитуду, и дальнейшие измерения не имеют смысла. Достаточно точные результаты измерений получаются при измерении гармоник до 30-го порядка.

Энергоснабжающие компании контролируют содержание 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник в питающих сетях. В целом, достаточным является устранение гармоник низших порядков (до 13-го). При более тщательном контроле учитываются гармоники до 25-й включительно.

## 2 Стандарты

Вопросы гармонических искажений в электрических сетях регламентируются различными стандартами и нормами:

- стандартами обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) распределительных сетей;
- нормативными требованиями к оборудованию, порождающему гармоники;
- рекомендациями энергоснабжающих компаний, применимыми к электроустановкам.

В настоящее время действует тройная система стандартов и норм, направленная на быстрое ослабление влияния гармоник и основанная на перечисленных ниже документах.

### Стандарты, регламентирующие ЭМС распределительных сетей и изделий

Эти стандарты устанавливают необходимую совместимость распределительных сетей и электрооборудование:

- гармоники, порождаемые каким-либо устройством, не должны создавать в распределительной сети возмущения выше определенного уровня;
- каждое устройство должно сохранять работоспособность при наличии в питающей сети возмущений определенного уровня;
- стандарт МЭК 61000-2-2 для низковольтных систем энергоснабжения общего применения;
- стандарт МЭК 61000-2-4 для промышленных электроустановок низкого и высокого напряжения.

### Стандарты, регламентирующие качество электрической энергии, обеспечиваемой распределительными сетями

- стандарт EN 50160 устанавливает характеристики электроэнергии, подаваемой распределительными сетями общего назначения;
- стандарт IEEE 519 представляет общий подход энергоснабжающих компаний и потребителей к ограничению влияния нелинейных нагрузок. Энергоснабжающие компании стимулируют принятие превентивных мер, призванных повысить качество электроэнергии, снизить рост температуры и уменьшить влияние на коэффициенты мощности. Они намерены в будущем штрафовать потребителей, являющихся основными источниками гармоник в питающей сети.

### Стандарты, устанавливающие требования к оборудованию

- стандарт МЭК 61000-3-2 или EN 61000-3-2 для низковольтного оборудования с номинальным током менее 16 А;
- стандарт МЭК 61000-3-12 или EN 61000-3-4 для низковольтного оборудования с номинальным током более 16 и менее 75 А.

### Максимально допустимые уровни гармоник

Проведенные международные исследования позволили собрать данные и оценить типичное содержание гармоник в распределительных электрических сетях. В таблице на **рис. М1** представлены уровни, которые, по мнению большинства энергоснабжающих компаний, не должны превышать.

Нечетные гармоники, не кратные трем				Нечетные гармоники, кратные трем				Четные гармоники			
Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН	Порядок гармоники, h	НН	СН	СВН
5	6	6	2	3	5	2.5	1.5	2	2	1.5	1.5
7	5	5	2	9	1.5	1.5	1	4	1	1	1
11	3.5	3.5	1.5	15	0.3	0.3	0.3	6	0.5	0.5	0.5
13	3	3	1.5	21	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.2	0.2
17	2	2	1	> 21	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.2	0.2
19	1.5	1.5	1					12	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1	0.7					> 12	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1	0.7								
> 25	0.2 + 25/h	0.2 + 25/h	0.1 + 25/h								

Рис. М1. Максимально допустимые уровни гармоник

М3

Присутствие гармоник говорит об искаженной форме тока или напряжения. Искажение же формы тока или напряжения означает наличие возмущений в распределительной сети и ухудшение качества поставляемой электроэнергии.

Источниками гармоник токов являются нелинейные нагрузки, подсоединенные к распределительной сети. Протекание гармоник токов по сети, имеющей некоторое полное сопротивление, приводит к появлению гармоник напряжений и соответственно к искажению формы питающего напряжения.

### Происхождение гармоник

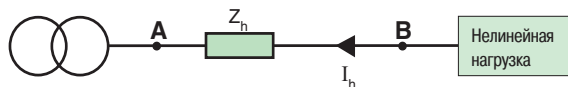
Устройства и системы, порождающие гармоники, имеются во всех секторах экономики, т.е. в промышленности, коммерческом секторе и жилищном хозяйстве. Гармоники порождаются нелинейными нагрузками, т.е. нагрузками, потребляющими ток с формой волны, отличающейся от формы волны питающего напряжения.

Примеры нелинейных нагрузок:

- промышленное оборудование (сварочные машины, электродуговые печи, индукционные печи и выпрямители);
- приводы с регулируемой скоростью для асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока;
- источники бесперебойного питания;
- офисное оборудование (компьютеры, фотокопировальные машины, факсимильные аппараты и др.);
- бытовые электроприборы (телевизоры, микроволновые печи, люминесцентные лампы);
- некоторые устройства с магнитным насыщением (трансформаторы).

### Возмущения, создаваемые нелинейными нагрузками: гармоники тока и напряжения

Нелинейные нагрузки потребляют токи гармоник, которые поступают в распределительную сеть. Гармоники напряжения вызываются протеканием токов гармоник по сопротивлениям питающих цепей (по трансформатору и распределительной сети для случаев аналогичных тому, который показан на **рис. M2**).



**Рис. M2.** Однолинейная схема, показывающая сопротивление питающей цепи для гармоники  $h$ -го порядка

Реактивное сопротивление проводника возрастает с увеличением частоты тока, протекающего по этому проводнику. Поэтому для каждой гармоники тока ( $h$ -ого порядка) в цепи питания существует некоторое полное сопротивление  $Z_h$ .

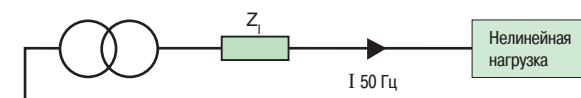
Когда по сопротивлению  $Z_h$  протекает ток гармоники  $h$ -го порядка, то, по закону Ома, он создает напряжение гармоники  $U_h = Z_h \times I_h$ . В результате этого форма напряжения в точке В искажается и отличается от синусоидальной. Все нагрузки, питающиеся через точку В, получают напряжение искаженной формы.

Для тока данной гармоники, это искажение пропорционально сопротивлению распределительной сети.

### Протекание несинусоидальных токов в распределительных сетях

Можно считать, что нелинейные нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания.

На **рис. M3** и **L4** показана схема электроустановки, «загрязненной» гармониками. В схеме, изображенной на **рис. M3**, протекает ток частотой 50 Гц, а на **рис. M4** – ток частотой гармоники  $h$ -ого порядка.



**Рис. M3.** Схема электроустановки, питающей нелинейную нагрузку, в которой протекает только ток основной частоты 50 Гц

### 3 Общие положения

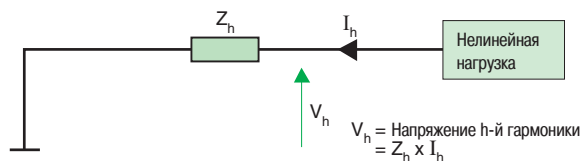
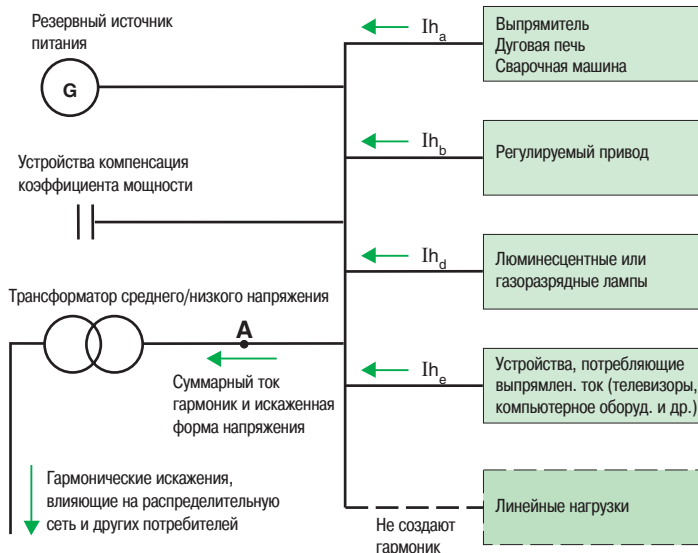


Рис. М4. Схема той же электроустановки, в которой протекает только ток h-й гармоники

При питании нелинейной нагрузки возникает ток частотой 50 Гц (как показано на рис. М3), к которому добавляются токи  $I_h$  (рис. М4), соответствующие каждой h-й гармонике.

По-прежнему считая, что нагрузки генерируют токи высших гармоник в распределительную сеть в направлении источника питания, можно построить схему протекания токов разных гармоник в этой сети (рис. М5).



**Примечание:** хотя на данной схеме определенные нагрузки генерируют токи гармоник в распределительную сеть, другие нагрузки могут поглощать такие токи.

Рис. М5. Протекание токов гармоник в распределительной сети

Основные экономические последствия гармоник для электроустановок:

- повышенный расход энергии;
- преждевременное старение оборудования;
- производственные убытки.

M5

## 4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки

### 4.1 Резонанс

Одновременное использование емкостных и индуктивных устройств в распределительных сетях приводит к параллельному или последовательному резонансу, который проявляется соответственно в очень больших и очень малых значениях полного сопротивления. Изменения сопротивления вызывают изменения тока и напряжения в распределительной сети. В данном разделе будет рассматриваться только параллельный резонанс, как наиболее распространенный.

Рассмотрим следующую упрощенную электрическую схему (рис. М6) электроустановки, состоящей из:

- питающего трансформатора;
- линейных нагрузок;
- нелинейных нагрузок, потребляющих токи высших гармоник;
- конденсаторов для повышения коэффициента мощности.

Ниже представлена эквивалентная схема для гармонического анализа (рис. М7). Если пренебречь активным сопротивлением R, то полное сопротивление Z определяется по формуле:

$$Z = \frac{jLs\omega}{1 - LsC\omega^2}$$

где:

Ls - индуктивность питающей сети (вышерасположенный участок сети + трансформатор + линия);

C - емкость конденсаторов для повышения коэффициента мощности;

R - активное сопротивление линейных нагрузок;

Ih - ток гармоник.

Резонанс наступает тогда, когда знаменатель  $1 - LsC\omega^2$  стремится к нулю. Соответствующая частота называется резонансной частотой цепи. При этой частоте полное сопротивление достигает максимума, и возникают напряжения гармоник большой величины, приводящие к значительным искажениям формы питающего напряжения. Искажение формы напряжения сопровождается протеканием в цепи Ls+C токов гармоник, превышающих токи, потребляемые нагрузками.

В результате такая распределительная сеть и конденсаторы для повышения коэффициента мощности подвергаются воздействию больших токов гармоник и перегрузкам. Чтобы избежать резонанса, последовательно с такими конденсаторами можно установить дроссели для защиты от гармоник.

М6

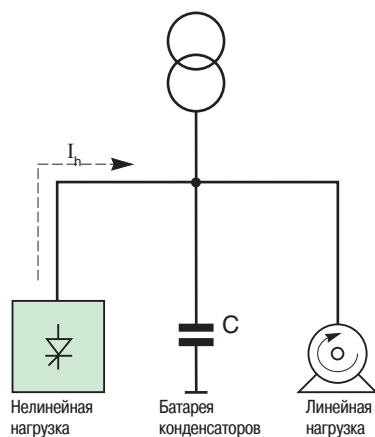


Рис. М6. Схема электроустановки

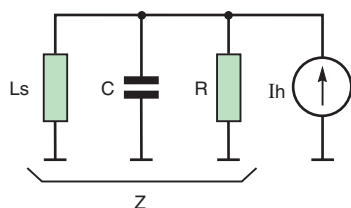


Рис. М7. Эквивалентная схема электроустановки, показанной на рис. М6

### 4.2 Увеличенные потери

#### Потери в проводниках

Активная мощность, переданная нагрузке, зависит от составляющей ( $I_1$ ) тока основной сетевой частоты.

Когда ток, потребляемый нагрузкой, содержит гармоники, действующее значение тока Irms превышает ток основной гармоники I1.

Суммарный коэффициент гармонических искажений тока THD определяется выражением:

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

$$\text{отсюда: } I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

На рис. М8 показаны графики изменения следующих двух параметров в зависимости от суммарного коэффициента гармонических искажений:

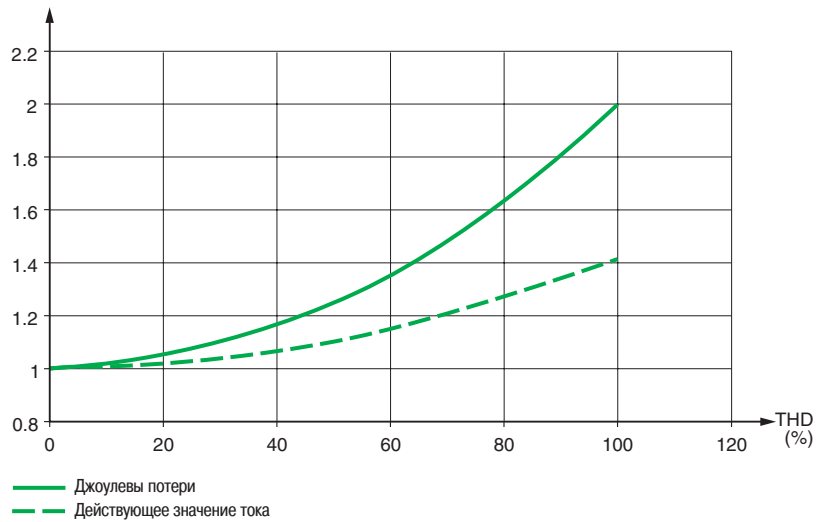
- действующего значения тока Irms для нагрузки, потребляющей некоторый основной ток;
- джоулевых потерь (на нагрев) без учета поверхностного эффекта (точкой отсчета для обоих параметров является 1, соответствующая случаю отсутствия гармоник).

Токи гармоник вызывают увеличение джоулевых потерь во всех проводниках, в которых они протекают, и дополнительное повышение температуры в трансформаторах, устройствах, кабелях.

#### Потери в асинхронных машинах

Напряжения гармоники h-го порядка, поступающие к асинхронным машинам, генерируют в роторе токи с частотами выше 50 Гц, являющиеся причиной дополнительных потерь.

## 4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки



**Рис. М8.** Увеличение действующего значения тока и джоулевых потерь в зависимости от суммарного коэффициента искажений

### Порядки величин

- питающее напряжение фактически прямоугольной формы вызывает **20-процентный** рост потерь;
- питающее напряжение, содержащее гармоники  $u_5 = 8\%$  (от основного напряжения  $U_1$ ),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$ , и  $u_{13} = 1\%$ , т.е. с суммарным коэффициентом искажений  $THDu = 10\%$  или, в соответствии с ГОСТ 13109-97,  $K_u = 10\%$ , приводит к дополнительным потерям в 6%.

### Потери в трансформаторах

Токи гармоник, протекающие в трансформаторах, вызывают увеличение потерь в «меди» вследствие эффекта Джоуля и в «железе» из-за вихревых токов. Напряжения гармоник являются причиной потерь в «железе» вследствие гистерезиса.

Обычно считается, что потери в обмотках возрастают пропорционально квадрату  $THDi$ , а потери в сердечнике — пропорционально  $THDu$ .

В трансформаторах коммутационных электросетей, в которых уровни искажений ограничены, рост потерь составляет 10-15%.

### Потери в конденсаторах

Напряжения гармоник, приложенные к конденсаторам, приводят к появлению токов, пропорциональных частотам этих гармоник. Эти токи вызывают дополнительные потери.

#### Пример

Питающее напряжение содержит следующие гармоники:

Основное напряжение  $U_1$ , гармонические напряжения  $u_5 = 8\%$  (от  $U_1$ ),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$ ,  $u_{13} = 1\%$ , т.е. суммарный коэффициент искажений  $THDu = 10\%$ . Ток увеличивается в 1,19 раз, а джоулевы потери — в  $1.19^2$ , т.е. в 1,4 раза.

## 4.3 Перегрузки оборудования

### Генераторы

Номинальные характеристики (параметры) генераторов, питающих нелинейные нагрузки, должны быть снижены из-за дополнительных потерь, обусловленных протеканием токов высших гармоник. Уровень снижения рабочих параметров генератора, 30% общей нагрузки которого приходится на нелинейные нагрузки, составляет около 10%. В связи с этим необходимо использовать генератор повышенной мощности.

### Источники бесперебойного питания (ИБП)

Ток, потребляемый компьютерными системами, имеет очень большой крест-фактор (отношение величины амплитуды тока к его действующему значению). Поэтому источник бесперебойного питания, параметры которого выбирались с учетом только действующего значения тока, может не обеспечить необходимую амплитуду тока и оказаться перегруженным.

М7

## Трансформаторы

■ Кривая, показанная ниже (рис. М9), отображает типичное требуемое снижение нагрузки трансформатора, питающего электронные приборы.

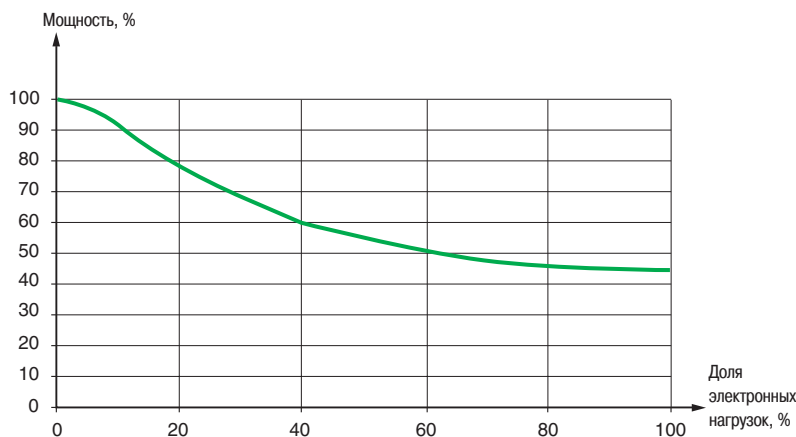


Рис. М9. Допустимая нагрузка трансформатора, питающего электронные приборы

### Пример

Если 40% мощности нагрузки трансформатора приходится на электронные приборы, то его нельзя нагружать более 60% от номинала.

■ Стандарт УТЕ С15-112 устанавливает зависимость коэффициента снижения мощности трансформаторов от токов гармоник.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \left( \sum_{h=2}^{40} h^{1.6} T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Типовые значения:

- ток прямоугольной формы (амплитуда гармоник -  $1/h^1$ ):  $k = 0.86$ ;
- ток преобразователя частоты (THD = 50%):  $k = 0.80$ .

## Асинхронные машины

Стандарт МЭК 60892 вводит понятие взвешенного коэффициента гармоник HVF (коэффициента гармоник напряжений), формула и максимальное значение которого приведены ниже.

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h}{h^2}} \leq 0.02$$

### Пример

Питающее напряжение имеет основное напряжение  $U_1$  и гармонические напряжения  $u_3 = 2\%$  (от  $U_1$ ),  $u_5 = 3\%$ ,  $u_7 = 1\%$ . Суммарный коэффициент искажений THDu = 3,7%, а HVF = 0,018. Это значение HVF очень близко к максимальному значению, при превышении которого необходимо проводить занижение номинальных характеристик рассматриваемой машины. В практическом смысле, при питании асинхронной машины THDu не должен превышать 10%.

## Конденсаторы

В соответствии со стандартом МЭК 60831-1, действующее значение тока, протекающего через конденсаторы, не должно превышать номинальный ток более чем в 1,3 раза.

Возвращаясь к приведенному выше примеру, напряжения гармоник составляют:  $u_5 = 8\%$  (от основного напряжения  $U_1$ ),  $u_7 = 5\%$ ,  $u_{11} = 3\%$  и  $u_{13} = 1\%$ , т.е. суммарный коэффициент искажений

THDu равен 10%, и при номинальном напряжении  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.19$ . При напряжении, превышающем номинальное напряжение на 10%, достигается предельное значение тока  $\frac{I_{rms}}{I_1} = 1.3$  и необходимо использовать конденсаторы с повышенными характеристиками.

(1) Фактически, эта форма тока близкая к прямоугольной. Это характерно для всех выпрямителей тока (трехфазных выпрямителей, индукционных печей).

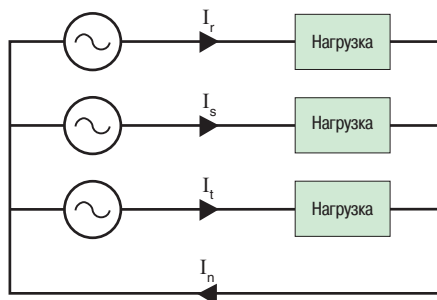
## 4 Основные виды воздействий гармоник на электроустановки

### Нейтральные проводники

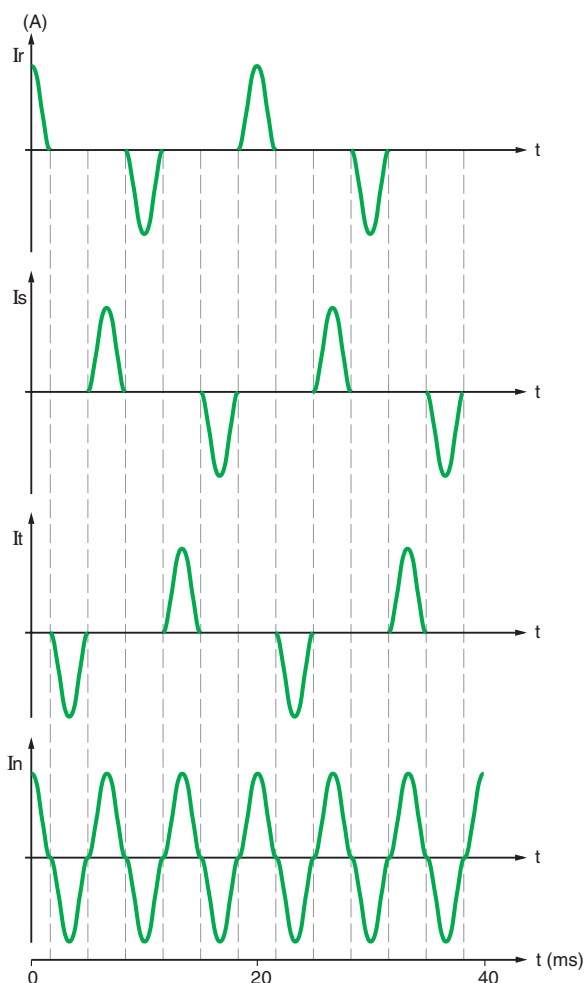
Рассмотрим систему, состоящую из симметричного трехфазного источника питания и трех одинаковых однофазных нагрузок, подключенных между каждой из фаз и нейтралью (**рис. М10**).

На **рис. М11** показаны примерные формы токов, протекающих в этих фазах, и результирующий ток в нулевом проводнике.

В этом примере ток в нулевом проводнике имеет действующее значение, которое превышает действующее значение тока в фазном проводнике в  $\sqrt{3}$  раза. Поэтому нулевой проводник должен иметь увеличенное сечение.



**Рис. М10.** Протекание токов в фазных и нулевом проводниках трехфазной электросети



**Рис. М11.** Примеры токов, протекающих в фазных и нулевом проводниках, в трехфазной электросети (нелинейная нагрузка) ( $I_n = I_r + I_s + I_t$ )

### 4.4 Возмущения, влияющие на чувствительные нагрузки

#### Влияние искажения формы питающего напряжения

Искажение формы питающего напряжения может сказаться на работе чувствительного оборудования:

- устройств регулирования (температуры);
- компьютерного оборудования;
- устройств управления и контроля (защитных реле);

#### Искажение телефонных сигналов

Гармоники создают помехи в слаботочных цепях. Уровень искажений зависит от длины параллельно идущих силовых и контрольных кабелей, расстояния между этими кабелями и частоты гармоник.



### 4.5 Экономические последствия

#### Потери энергии

Гармоники вызывают дополнительные потери энергии в проводниках и оборудовании (эффект Джоуля).

#### Повышенные затраты на электроэнергию

Наличие токов гармоник может потребовать увеличения потребляемой мощности и, следовательно, более высоких затрат.

Кроме того, энергоснабжающие компании намерены взимать повышенные тарифы с потребителей, которые выдают большое количество гармоник.

#### Необходимость использования оборудования с повышенными номинальными характеристиками

- Снижение мощности источников питания (генераторов, трансформаторов и источников бесперебойного питания) вследствие наличия гармонических искажений означает необходимость использования устройств с более высокими номинальными характеристиками.
- Сечение проводников должно выбираться с учетом протекания токов гармоник. Кроме того, из-за поверхностного эффекта сопротивление этих проводников возрастает с частотой. Чтобы избежать чрезмерных тепловых потерь, необходимо использовать проводники большего сечения.
- Протекание гармоник в нулевом проводнике означает, что его сечение тоже должно быть увеличено.

#### Уменьшение срока службы оборудования

Когда уровень искажений питающего напряжения приближается к 10%, срок службы оборудования значительно снижается. Это снижение было оценено на уровне:

- 32,5% для однофазных машин;
- 18% для трехфазных машин;
- 5% для трансформаторов.

Для того чтобы сроки службы оборудования соответствовали номинальной нагрузке, должно использоваться оборудование с завышенными параметрами (номинальная мощность, сечение проводников и т.д.).

#### Ложное срабатывание автоматических выключателей и отключение электроустановки

Автоматические выключатели, используемые в электроустановке, подвергаются воздействию пиков тока, создаваемых гармониками.

Эти пики токов вызывают их ложное срабатывание, что приводит к производственным потерям и затратам времени на повторный запуск электроустановки.

#### Примеры

Учитывая экономические последствия для перечисленных ниже электроустановок, оказалось необходимым установить фильтры подавления гармоник.

##### Вычислительный центр страховой компании

Было подсчитано, что стоимость часа простоя, вызванного ложным срабатыванием автоматического выключателя в этом центре, составляет 100000 евро.

##### Фармацевтическая лаборатория

Гармоники привели к выходу из строя генераторной установки и прерыванию продолжительных испытаний нового лекарственного средства. Соответствующие убытки были оценены в 17 миллионов евро.

##### Металлургический завод

Комплекс индукционных печей вызвал перегрузку и разрушение в течение одного года трех трансформаторов мощностью от 1500 до 2500 кВА. Стоимость нарушений производственного процесса была оценена в 20000 евро в час.

##### Фабрика, производящая садовую мебель

Выход из строя регулируемых приводов приводил к остановкам производства, оцененным в 10000 евро в час.

# 5 Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения

Для количественного измерения и оценки гармонических искажений форм токов и напряжений используются несколько показателей, в частности:

- коэффициент мощности;
- крест-фактор;
- мощность нелинейных искажений;
- гармонический спектр;
- величины гармонических искажений.

Эти показатели следует использовать при определении любого необходимого корректирующего действия.

## 5.1 Коэффициент мощности

### Определение

Коэффициент мощности (PF) представляет собой соотношение между активной мощностью (P) и полной мощностью (S).

$$PF = \frac{P}{S}$$

Его часто путают с параметром:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

где

P<sub>1</sub> - активная мощность тока основной частоты;

S<sub>1</sub> - полная мощность тока основной частоты.

Параметр cos φ относится только к основной сетевой частоте и поэтому отличается от коэффициента мощности PF, который учитывает наличие в электроустановке гармоник.

### Интерпретация коэффициента мощности

Первым признаком наличия в электроустановке значительного количества гармоник является то, что замеренный коэффициент мощности PF отличается от замеренной величины cos φ.

## 5.2 Крест-фактор

### Определение

Крест-фактор – это отношение величины амплитуды тока или напряжения (I<sub>m</sub> или U<sub>m</sub>) к его действующему значению.

- Для синусоидального сигнала пик-фактор равен  $\sqrt{2}$ .
- Для несинусоидального сигнала пик-фактор может быть или больше или меньше  $\sqrt{2}$ .

В последнем случае такие значения пик-фактора свидетельствуют об отличии формы кривой напряжения от синусоидальной, т.е. о наличии искажений.

### Интерпретация крест-фактора

Для тока, потребляемого нелинейными нагрузками, величина крест-фактора значительно превышает  $\sqrt{2}$ . Обычно она составляет от 1,5 до 2, но в критических случаях может даже достигать 5. Большая величина крест-фактора свидетельствует о наличии больших гармонических токов, способных вызывать ложные срабатывания защитных устройств.

## 5.3 Параметры мощности и гармоники

### Активная мощность

Активная мощность (P) сигнала, содержащего гармоники, является суммой активных мощностей отдельных гармоник тока и напряжения одного и того же порядка.

### Реактивная мощность

Реактивная мощность определяется исключительно для основной частоты, т.е.

$$Q = U_1 \times I_1 \times \sin \varphi_1$$

### Мощность искажений

При наличии гармоник мощность искажений D определяется как  $D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2}$ , где S - полная мощность.

## 5.4 Гармонический спектр и гармоническое искажение

### Принцип

Каждый тип устройства, порождающего гармоники, потребляет ток гармоники определенной формы (определенной амплитуды и фазового сдвига).

Эти параметры, особенно амплитуда каждой гармоники, имеют существенное значение для анализа.

### Искажение, вносимое отдельной гармоникой (или гармоническое искажение h-го порядка)

Искажение, вносимое отдельной гармоникой, определяется процентным соотношением амплитуд гармоник h-го порядка и сигнала основной частоты (коэффициент n-й гармоники (см. ГОСТ 13109-97)).

$$u_h(\%) = 100 \frac{U_h}{U_1}$$

или

$$i_h(\%) = 100 \frac{I_h}{I_1}$$

### Гармонический спектр

Отображая амплитуду каждой гармоники в функции ее частоты, можно получить график, называемый спектром гармоник.

На **рис. М12** представлен пример спектра гармоник прямоугольного сигнала.

### Действующее значение

Действующее значение тока и напряжения может быть рассчитано в функции действующего значения гармоник разных порядков.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

и

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$$

М12

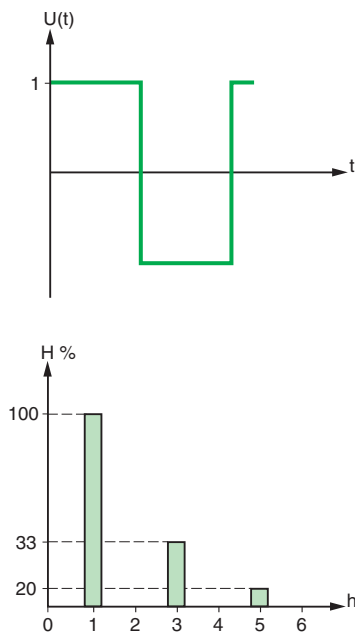


Рис. М12. Спектр гармоник прямоугольного сигнала напряжения  $U(t)$

## 5.5 Суммарный коэффициент гармонических искажений (THD)

Термин «суммарный коэффициент гармонических искажений» THD (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)) широко применяется при определении уровня содержания гармоник в знакопеременных сигналах.

### Определение THD

Для сигнала  $y$  коэффициент THD определяется как:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1}$$

Это согласуется с определением, приведенным в стандарте МЭК 61000-2-2.

Отметим, что это значение может превышать 1.

Согласно указанному стандарту, параметр  $h$  можно ограничить числом 50. Коэффициент THD позволяет одним числом выразить степень искажений, влияющих на ток или напряжение в любом месте электроустановки.

Обычно THD выражается в процентах.

### Суммарный коэффициент искажений по току или напряжению

Для гармоник тока эта формула имеет вид:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

## 5 Основные показатели гармонических искажений и принципы их измерения

Ниже представлена эквивалентная формула, которая является более наглядной и удобной в применении, если известно полное действующее значение:

$$\text{THD}_i = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Для гармоник напряжения формула имеет вид:

$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1}$$

### Связь между коэффициентом мощности и THD (рис. M13)

Коэффициент THD, отражающий одним значением степень искажения формы тока или напряжения, является важным показателем. Спектр отображает отдельные гармоники, влияющие на искаженный сигнал (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (см. ГОСТ 13109-97)).

$$P \approx P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$\text{Следовательно: } PF = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_{\text{rms}}}$$

$$\text{так как: } \frac{I_1}{I_{\text{rms}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

$$\text{отсюда: } PF \approx \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

На рис. M13 представлен график зависимости  $\frac{PF}{\cos \varphi}$  от  $\text{THD}_i$ .

## 5.6 Использование различных показателей

Показатель  $\text{THD}_u$  характеризует искажение формы кривой напряжения.

Ниже приведены несколько значений  $\text{THD}_u$  и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке:

- $\text{THD}_u < 5\%$  - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования;
- $5-8\%$  - значительное загрязнение сети гармониками, возможны некоторые сбои в работе;
- $> 8\%$  - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих или фильтрокомпенсирующих (ФКУ) устройств.

Показатель  $\text{THD}_i$  характеризует искажение формы кривой тока.

Устройство, вносящее гармонические возмущения, обнаруживается посредством замеров  $\text{THD}_i$  на входах и выходах различных цепей и соответственно отслеживания путей протекания гармоник.

Ниже приведены несколько значений  $\text{THD}_i$  и соответствующие им явления, происходящие в электроустановке:

- $\text{THD}_i < 10\%$  - нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе оборудования;
- $10-50\%$  - значительное загрязнение сети гармониками с опасностью повышения температуры и обусловленной этим необходимостью перехода на кабели большего сечения и более мощные источники питания;
- $> 50\%$  - большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования. Требуется проведение тщательного анализа и установка компенсирующих или фильтрокомпенсирующих (ФКУ) устройств.

### Коэффициент мощности

Используется для того, чтобы оценить: насколько необходимо повысить мощность источника питания рассматриваемой электроустановки.

### Крест-фактор

Используется для оценки способности генератора (или источника бесперебойного питания) обеспечивать мгновенные токи большой величины. Например, компьютерное оборудование потребляет ток с сильно искаженной формой волны, для которого крест-фактор может достигать значений 3-5.

### Спектр (разложение сигнала на отдельные гармоники)

Дает другое представление электрических сигналов и может использоваться для оценки степени их искажения.

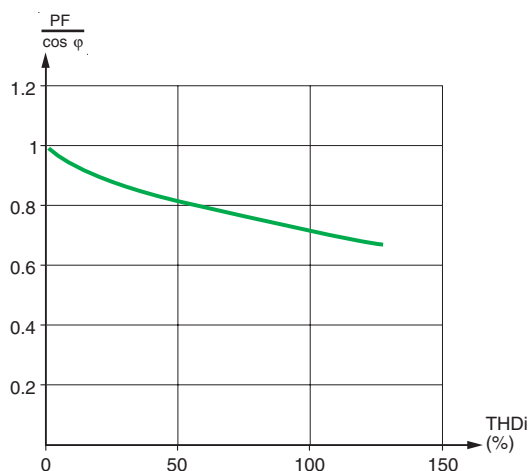


Рис. M13. Изменение  $\frac{PF}{\cos \varphi}$  в функции  $\text{THD}_i$  для случая, когда  $\text{THD}_u = 0$

M13

## 6.1 Устройства, используемые для измерения показателей

### Выбор устройств

Традиционные методы контроля и измерений предусматривают использование:

- Осциллографов

Первые признаки искажений сигнала можно получить, просматривая сигналы тока или напряжения на осциллографе.

Отклонение формы волны от синусоидальной отчетливо указывает на наличие гармоник. На осциллограммах тока и напряжения появляются пики.

Заметим, однако, что данный метод не позволяет точно измерить гармонические составляющие.

- Аналоговых спектроанализаторов

Они представляют собой комбинацию полосовых фильтров и вольтметра действующих значений, обеспечивают среднее качество измерений и не могут измерять сдвиг фаз.

Только последние модели цифровых анализаторов позволяют достаточно точно определить значения всех указанных выше показателей.

### Функции цифровых анализаторов

Микропроцессоры цифровых анализаторов:

- вычисляют характеристики гармоник (коэффициент мощности, крест-фактор, мощность искажений, THD);

- выполняют различные дополнительные функции (коррекцию, статистическое обнаружение, управление процессом измерений, отображение, обмен данными и др.);

- в многоканальных анализаторах обеспечивают разложение в спектр токов и напряжений в реальном времени.

### Работа анализатора и обработка данных

Аналоговые сигналы преобразуются в последовательность числовых значений.

На основе этих данных алгоритм быстрого преобразования Фурье рассчитывает амплитуды и фазы гармоник в большом количестве временных окон.

При расчете THD большинство цифровых анализаторов измеряют гармоники до 20-го или 25-го порядка.

Обработка последовательных значений, рассчитанных с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (сглаживание, классификация и статистика) может быть проведена самим измерительным устройством или внешним программным обеспечением.

## 6.2 Процедуры гармонического анализа распределительных сетей

Необходимые измерения проводятся на действующей электроустановке:

- в качестве предупредительной меры с целью получения общего представления о состоянии распределительной сети (составления карты сети);

- в связи с принятием корректирующих мер:

- ☐ для определения причины, источника возмущений и выбора технических решений, необходимых для их устранения;

- ☐ для проверки правильности выбранного решения (после введения изменений в распределительную сеть и проверки снижения доли гармоник).

### Режим работы

Ток и напряжение исследуются:

- на источнике питания;

- на шинах главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения);

- в каждой отходящей цепи главного распределительного щита (или на шинах среднего напряжения).

Для измерений необходимо точно знать условия работы электроустановки и в частности состояние батарей конденсаторов (включены, не включены, количество отключенных ступеней).

### Цели анализа

- Определить необходимость снижения номинальных параметров установленного оборудования.

- Количественно определить параметры необходимых систем фильтрации и защиты от гармоник, которые должны быть установлены в исследуемой распределительной сети.

- Обеспечить возможность сравнения измеренных и допустимых значений параметров распределительной сети (максимальные значения гармонических искажений, допустимые значения, номинальные значения).

### Использование измерительных устройств

Измерительные устройства служат для индикации как мгновенных, так и установившихся параметров гармоник. Для анализа требуются значения параметров длительностью от нескольких секунд до нескольких минут в течение нескольких дней наблюдений.

Требуемые значения параметров включают в себя:

- амплитуды гармоник токов и напряжений;
- содержание каждой гармоники в токе и напряжении;
- суммарный коэффициент искажений (THD) форм тока и напряжения;
- сдвиг фаз между гармониками тока и напряжения для одного и того же порядка и сдвиг фаз гармоник по отношению к базовому сигналу, например, к напряжению основной частоты.

### 6.3 Тщательный контроль гармоник

Показатели гармоник могут быть измерены:

- с помощью устройств, постоянно установленных в распределительной сети;
- или экспертом, проведшим минимум полдня на площадке, на которой размещена электроустановка (что дает ограниченное представление о состоянии электроустановки).

#### Стационарные устройства предпочтительней

В силу ряда причин предпочтительнее устанавливать в распределительной сети стационарные измерительные устройства:

- Присутствие эксперта ограничено по времени. Только несколько измерений в разных точках электроустановки и на протяжении достаточно длительного периода (от недели до месяца) позволяют получить общее представление о работе электроустановки и учесть все ситуации, которые могут возникнуть, в частности:
  - колебания напряжения источника питания;
  - изменения в работе электроустановки;
  - добавление нового оборудования к электроустановке.
- Измерительные устройства, установленные в распределительной сети, обеспечивают получение необходимых данных и облегчают проведение диагностики экспертами, сокращая тем самым количество и продолжительность их посещений.
- Стационарные измерительные устройства выявляют любые новые возмущения, возникающие после установки нового оборудования, внедрения новых режимов работы или колебаний параметров питающей сети.

#### Преимущества использования встроенных устройств измерения и обнаружения

Устройства измерения и обнаружения, встроенные в электрическое распределительное оборудование:

- для общей оценки (предварительного анализа) состояния сети, избавляют от необходимости:
  - брать измерительное оборудование в аренду;
  - вызывать экспертов;
  - присоединять и отсоединять измерительное оборудование.

Для общей оценки состояния сети анализ главных низковольтных распределительных щитов может быть часто выполнен входным устройством и/или измерительными устройствами, установленными в каждой из отходящих цепей.

- для корректирующих мер имеются средства, позволяющие:
  - определить рабочие условия в момент аварийной ситуации;
  - составить карту распределительной сети и оценить внедренное техническое решение.

Использование специального оборудования для решения изучаемой проблемы повышает качество диагностики.

Система PowerLogic (с устройствами Power Meter и Circuit Monitor) и устройство контроля Micrologic обладают всеми необходимыми функциями для обнаружения гармонических искажений.



Рис. М14. Устройство Circuit Monitor

М16



Рис. М15. Устройство контроля Micrologic H с функцией измерения гармоник для силовых автоматических выключателей серии Masterpact NT и NW

Измерения — первый этап в установлении контроля загрязнений питающей сети гармониками. В зависимости от условий эксплуатации каждой электроустановки необходимое решение обеспечивается различными типами измерительного оборудования.

### Устройства контроля мощности

#### Система PowerLogic с устройствами Power Meter и Circuit Monitor

Эти изделия обеспечивают возможность высокоэффективных измерений в распределительных сетях низкого и среднего напряжения. Они представляют собой цифровые устройства, обладающие функциями контроля качества электроэнергии.

PowerLogic — комплексная модульная система, состоящая из Power Meter (PM) и Circuit Monitor (CM). Она позволяет удовлетворить широкий диапазон потребностей — от самых простых (Power Meter) до очень сложных (Circuit Monitor). Эти устройства могут применяться в новых или существующих электроустановках, в которых должен поддерживаться высокий уровень качества электроэнергии. Режим их работы может быть локальным и/или дистанционным.

В зависимости от места установки в распределительной сети, Power Meter обеспечивает начальную индикацию качества электроэнергии. Основные параметры, измеряемые устройством Power Meter:

- суммарный коэффициент гармоник тока и напряжения (THD);
- коэффициент мощности.

Устройство Circuit Monitor (рис. М14) выполняет детальный анализ качества электроэнергии, а также анализирует возмущения в распределительной сети. Основными функциями этого устройства являются следующие:

- измерения более 100 электрических параметров;
- хранение в памяти и привязка меток времени к минимальным и максимальным значениям каждого электрического параметра;
- функции сигнализации, инициируемые значениями электрических параметров;
- регистрация данных о событиях;
- регистрация отклонений параметров тока и напряжения;
- анализ гармоник;
- регистрация формы сигнала (контроль отклонений).

#### Micrologic — устройство контроля качества электроэнергии, встроенное в автоматический выключатель

В новых электроустановках устройство контроля Micrologic H (рис. М15), являющееся составной частью силовых автоматических выключателей серии Masterpact, особенно полезно для измерений на вводах электроустановок или на больших отходящих линиях.

Устройство контроля Micrologic H обеспечивает точный анализ качества электроэнергии и детальную диагностику происшествий в сети и предназначено для работы совместно с монитором распределительного щита или контроллером. Оно может:

- измерять ток, напряжение, активную и реактивную мощность;
- измерять суммарный коэффициент искажений тока и напряжения (THD);
- отображать амплитуду и фазу гармоник тока и напряжения до 51-й гармоники включительно;
- регистрировать форму волны сигнала (контроль отклонений).

Функции, выполняемые устройством контроля Micrologic H, эквивалентны тем, которые выполняются устройством Circuit Monitor.

### Работа устройств контроля качества электроэнергии

#### Программное обеспечение для дистанционной работы и анализа

В более общей структуре распределительной сети с функциями контроля, имеется возможность объединения различных контрольно-измерительных устройств с помощью сети передачи данных, что позволяет централизовать сбор данных и получить общее представление о возмущениях во всей распределительной электрической сети.

Затем, в зависимости от применения, оператор может провести измерения в реальном времени, рассчитать необходимые значения, провести запись форм сигналов, предусмотреть подачу предупредительных сигналов и др.

Устройства контроля качества электроэнергии передают имеющиеся данные по сетям Modbus, Digipact или Ethernet.

Важная цель этой системы — способствовать выявлению и планированию работ по техническому обслуживанию и ремонту. Она позволяет существенно сократить продолжительность обслуживания и стоимость временно установленных устройств для проведения измерений на электроустановке или выбора параметров оборудования (фильтров).

#### Программное обеспечение SMS

Программное обеспечение SMS — комплексное программное обеспечение, используемое для анализа распределительных сетей совместно с устройствами, входящими в систему PowerLogic. Оно устанавливается на персональном компьютере и может:

- отображать результаты измерений в реальном времени;
- отображать «исторические» диаграммы за определенный период;
- выбирать способ представления данных (таблицы, различные графики);
- проводить статистическую обработку данных (отображать гистограммы).

## 8 Способы ослабления гармоник

Существует три различных способа ослабления гармоник:

- модификация электроустановки;
- применение специальных устройств в системе электропитания;
- фильтрация.

### 8.1 Основные рекомендации

Чтобы ограничить распространение гармоник в распределительной сети, существуют различные решения, которые должны учитываться особенно при проектировании новой электроустановки.

#### Размещайте нелинейные нагрузки ближе к источнику питания

Гармонические искажения напряжения увеличиваются с уменьшением мощности короткого замыкания. Не учитывая всех экономических соображений, предпочтительно подсоединять нелинейные нагрузки как можно ближе к источнику питания (рис. M16).

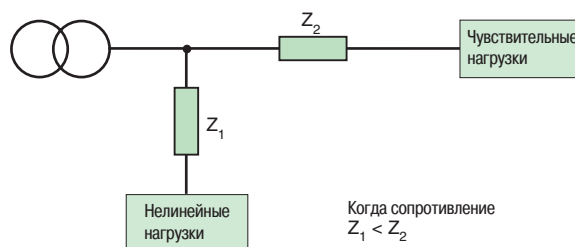


Рис. M16. Нелинейные нагрузки, подключенные как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

#### Группируйте нелинейные нагрузки

При разработке однолинейной схемы нелинейные устройства должны быть отделены от других (рис. M17). Эти две группы устройств должны питаться от отдельных систем шин.

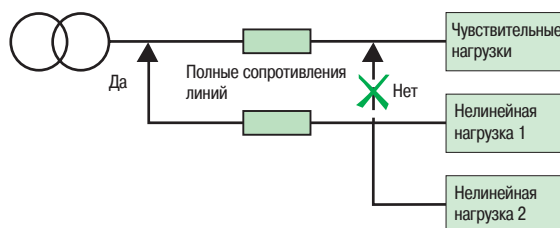


Рис. M17. Объединение в группу нелинейных нагрузок и их подсоединение как можно ближе к источнику питания (рекомендуемая схема)

#### Используйте отдельные источники питания

Для ограничения содержания гармоник в сети можно также использовать источник питания с отдельным трансформатором (рис. M18).

Недостаток этого способа заключается в повышении стоимости электроустановки.

M17



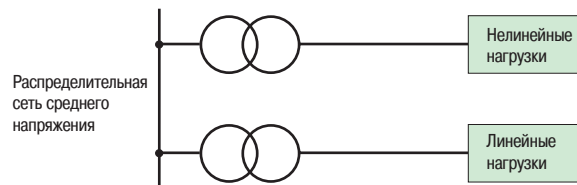


Рис. М18. Питание нелинейных нагрузок от отдельного трансформатора

### Трансформаторы со специальными соединениями обмоток

Различные соединения обмоток трансформатора позволяют устранить определенные гармоники, например:

- применение трехфазного трансформатора с двумя вторичными обмотками, одна из которых соединена в звезду, а другая в треугольник позволяет уменьшить пятую и седьмую гармоники в первичной обмотке (рис. М19);
- соединение типа треугольник-звезда подавляет третью гармонику.

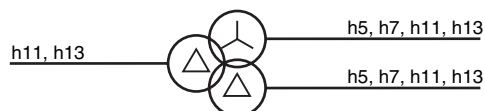


Рис. М19. Трансформатор с двумя вторичными обмотками подавляет распространение пятой и седьмой гармоник вверх по сети

### Устанавливайте линейные реакторы

При питании регулируемых приводов установка линейных реакторов позволяет сгладить форму тока. Увеличение полного сопротивления питающей сети ограничивает содержание гармоник тока.

Установка на батареях конденсаторов реакторов для подавления гармоник увеличивает полное сопротивление комбинации реактор-конденсатор для высших гармоник.

Это устраняет резонанс и защищает конденсаторы.

### Выбирайте подходящую систему заземления установки

#### Система TN-C

В системе TN-C по проводнику PEN протекают токи, вызванные неравномерной нагрузкой по фазам.

В установившемся режиме по проводнику PEN протекают токи гармоник. Поскольку он имеет определенное сопротивление, то незначительные изменения потенциала (несколько вольт) между устройствами могут привести к сбоям в работе электронного оборудования.

Поэтому система TN-C должна использоваться только для питания силовых цепей в головной части сети и не должна применяться для питания «чувствительных» ЭП.

#### Система TN-S

Данную систему рекомендуется применять при наличии в питающей сети гармоник. Нулевой проводник и защитный проводник (РЕ) полностью отделены друг от друга, и поэтому распределение потенциалов по сети является более равномерным.

## 8.2 Фильтрация гармоник

В случаях, когда описанные выше превентивные меры оказываются недостаточными, необходимо оборудовать электроустановку системами фильтрации.

Существуют три типа фильтров:

- пассивные;
- активные;
- гибридные.

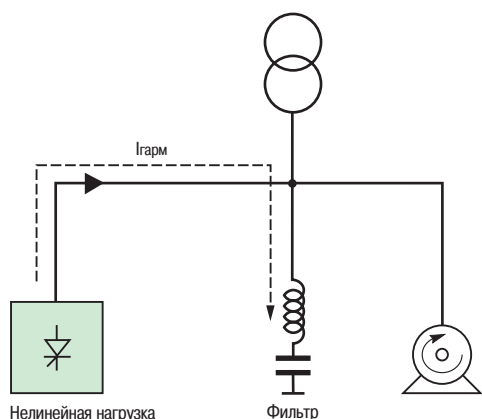


Рис. M20. Принцип действия пассивного фильтра

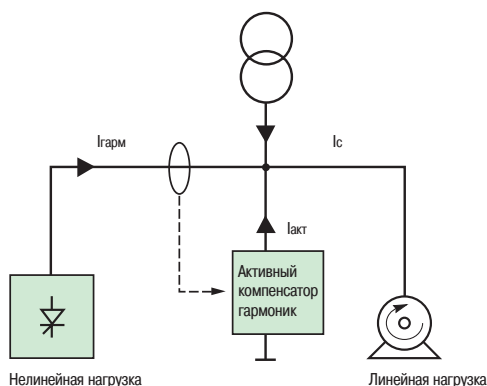


Рис. M21. Принцип действия активного фильтра

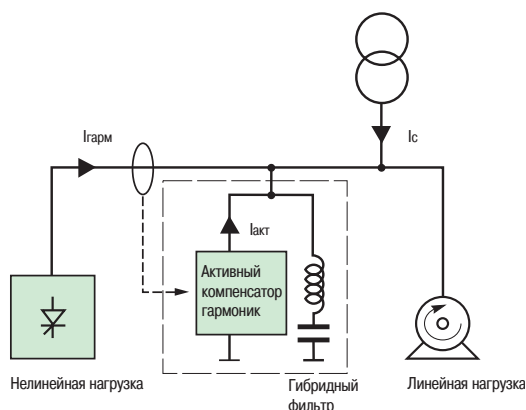


Рис. M22. Принцип действия гибридного фильтра

## Пассивные фильтры

### Типовые применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, выпрямители и др.);
- электроустановки, в которых необходима компенсация реактивной мощности;
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных нагрузок;
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

### Принцип действия

Параллельно нелинейной нагрузке устанавливается LC-контур, настроенный на частоту гармоники, которую необходимо подавить (рис. M20). Этот контур поглощает гармоники, предотвращая их попадание в распределительную сеть.

Обычно пассивный фильтр настраивается на частоту, близкую к частоте гармоники, которую необходимо подавить. Если требуется подавление нескольких гармоник, могут использоваться несколько параллельно соединенных фильтров.

## Активные фильтры (активные компенсаторы гармоник)

### Типовые применения

- коммерческие электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью менее 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.);
- электроустановки, в которых нужно снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок.

### Принцип действия

Эти системы силовой электроники устанавливаются последовательно или параллельно нелинейной нагрузке и компенсируют гармоники тока или напряжения, потребляемые этой нагрузкой.

На рис. M21 показан параллельно включенный активный компенсатор гармоник, компенсирующий гармоники тока ( $I_{\text{гarm}} = -I_{\text{акт}}$ ).

Активный компенсатор гармоник генерирует в распределительную сеть гармоники, потребляемые соответствующей нелинейной нагрузкой, но с противоположной фазой. В результате этого ток в сети  $I_c$  остается синусоидальным.

## Гибридные фильтры

### Типовые применения

- промышленные электроустановки с комплектом нелинейных нагрузок мощностью более 200 кВА (регулируемые приводы, источники бесперебойного питания, офисное оборудование и др.);
- электроустановки, требующие компенсации реактивной мощности;
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения напряжения с тем, чтобы не создавать возмущений для чувствительных ЭП;
- электроустановки, в которых необходимо снизить искажения тока с тем, чтобы избежать перегрузок;
- электроустановки, в которых должны соблюдаться жесткие ограничения на «выброс» гармоник в сеть.

### Принцип действия

Гибридный фильтр состоит из комбинации пассивных и активных фильтров (рис. M22). Он обладает преимуществами обоих типов фильтров и пригоден для применения в широком диапазоне мощностей и режимов работы электроустановки.

## Критерии выбора

### Пассивный фильтр

Обеспечивает компенсацию реактивной мощности и эффективную фильтрацию гармоник тока. Такие фильтры также снижают уровень гармоник напряжения в электроустановках, в которых форма напряжения питания отличается от синусоидальной. Если генерируемая фильтром реактивная мощность велика, то рекомендуется отключать установленный пассивный фильтр в те периоды времени, когда коэффициент загрузки установки является низким. Предварительные исследования возможности применения фильтра должны учитывать возможное наличие батареи конденсаторов для компенсации коэффициента мощности, которую, возможно, придется удалить.

### Активные компенсаторы гармоник

Обеспечивают подавление гармоник в широком диапазоне частот и могут работать с любым типом нагрузки.

С другой стороны, мощности данных устройств являются низкими.

### Гибридные фильтры

Объединяют в себе преимущества активных и пассивных фильтров.

Для устранения гармоник может быть предложен полный набор услуг:

- анализ схемы электроустановки;
- системы измерения и контроля;
- устройства фильтрации.

### 8.3 Метод

Наилучшее решение с учетом технических и экономических факторов основывается на результатах тщательного анализа.

#### Аудит систем энергоснабжения среднего и низкого напряжения на наличие гармоник

Если Вы воспользуетесь услугами эксперта, Вам гарантируется, что предложенное им решение даст эффективные результаты (т.е. достоверное значение максимального суммарного коэффициента гармонических искажений THDu).

Аудит распределительной электросети проводится инженером-специалистом, имеющим необходимую аппаратуру и программное обеспечение для анализа и моделирования.

Аудит включает в себя следующие этапы:

- измерение искажений кривых тока, линейного и фазного напряжения, возникающих из-за наличия в сети нелинейных нагрузок;
- компьютерное моделирование явлений в сети для выяснения причин и выбора наилучшего решения;
- полный отчет о результатах аудита, отражающий:
  - текущие уровни возмущений;
  - максимально допустимые уровни возмущений (в соответствии с МЭК 61000, МЭК 34 и др.);
- предложение, содержащее решения с гарантированными уровнями функционирования электроустановки;
- реализацию выбранного решения с использованием необходимых средств и ресурсов.

Весь процесс аудита описан в международном стандарте ISO 9002.

### 8.4 Модели фильтров

#### Пассивные фильтры

Пассивные фильтры состоят из индуктивно-емкостных LC-контуров, настроенных на конкретную частоту гармоник, которую необходимо подавить.

Для устранения ряда гармоник система может состоять из нескольких фильтров. Для трехфазных напряжений 400 В максимальные допустимые мощности могут достигать:

- 265 кВА/470 А для 5-й гармоник;
- 145 кВА/225 А для 7-й гармоник;
- 105 кВА/145 А для 11-й гармоник.

Пассивные фильтры могут быть созданы для всех уровней напряжений и токов.

#### Активные фильтры

- Активные компенсаторы гармоник SineWave:
  - пригодны для трехфазных напряжений 400 В, могут быть изготовлены на токи от 20 до 120 А;
  - компенсируют все гармоники от 2-ой до 25-ой. Компенсация может быть полной или касаться определенных гармоник;
  - ослабление уровня искажений: при номинальной мощности отношение THDi на нагрузке к THDi на вышерасположенном участке сети превышает 10;
  - выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, компенсация гармоник нулевой последовательности, система диагностики и технического обслуживания, параллельное подключение, дистанционное управление, интерфейс связи Ibus/RS485.
- Активные фильтры Accusine:
  - пригодны для трехфазных напряжений 400 и 480 В, могут быть изготовлены на токи от 30 до 50 А;
  - фильтруют все гармоники вплоть до 50-й;
  - выполняемые функции: коррекция коэффициента мощности, параллельное подключение, мгновенная реакция на изменения нагрузки.

#### Гибридные фильтры

Эти фильтры объединяют в себе преимущества пассивного фильтра и активного компенсатора гармоник SineWave.

## Содержание

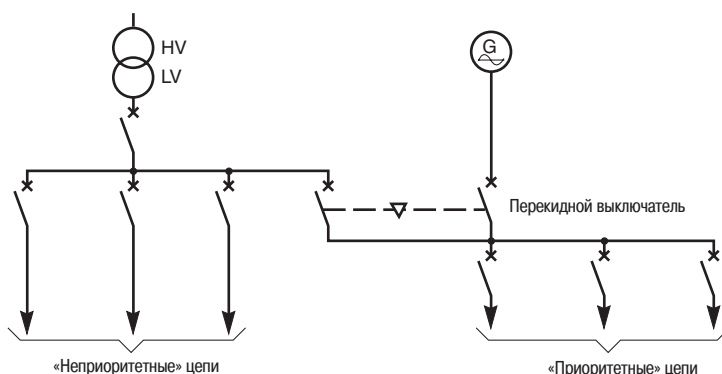
<b>1</b>	<b>Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей</b>	<b>N2</b>
	1.1 Защита генератора	N2
	1.2 Защита отходящих низковольтных сетей	N5
	1.3 Функции контроля	N5
	1.4 Параллельное подключение генераторной установки	N10
<b>2</b>	<b>Источники бесперебойного питания (ИБП)</b>	<b>N11</b>
	2.1 Готовность и качество электроэнергии	N11
	2.2 Типы статических ИБП	N12
	2.3 Аккумуляторные батареи	N15
	2.4 Схема заземления для объектов с ИБП	N16
	2.5 Выбор схем защиты	N18
	2.6 Установка, подсоединение и выбор кабелей	N20
	2.7 Дистанционное управление и мониторинг ИБП	N22
	2.8 Дополнительное оборудование	N22
<b>3</b>	<b>Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения</b>	<b>N24</b>
	3.1 Ток намагничивания трансформатора при включении	N24
	3.2 Защита цепей питания трансформатора низкого/низкого напряжения	N24
	3.3 Типовые электротехнические характеристики трансформаторов низкого/низкого напряжения 50 Гц	N25
	3.4 Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения с помощью выключателей Merlin Gerin	N25
<b>4</b>	<b>Осветительные сети</b>	<b>N27</b>
	4.1 Различные технологии изготовления ламп	N27
	4.2 Электротехнические характеристики ламп	N29
	4.3 Ограничения, связанные с осветительными устройствами, и рекомендации	N34
	4.4 Освещение общественных мест	N42
<b>5</b>	<b>Асинхронные двигатели</b>	<b>N45</b>
	5.1 Функции защиты в цепи двигателя	N45
	5.2 Стандарты	N47
	5.3 Области применения	N50
	5.4 Максимальные мощности двигателей, питающихся от низковольтной сети	N54
	5.5 Компенсация реактивной мощности	N54

# 1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей

Большинство промышленных и крупных коммерческих электроустановок включает некоторое количество важных электроприемников, питание которых должно обеспечиваться даже в случае потери питания от электросети:

- так как они связаны с системами безопасности (аварийное освещение, автоматическая система противопожарной защиты, дымоудаление, устройства сигнализации и т.д.);
- потому что они имеют отношение к приоритетным цепям, например, определенное оборудование, остановка которого приводит к производственным потерям или выходу из строя станков и т.д.

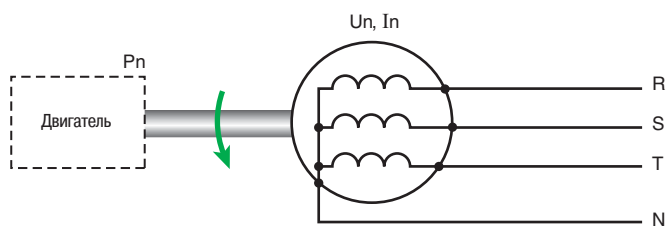
Одним из способов обеспечения питания так называемых «приоритетных» электроприемников в случае отказа других источников питания состоит в установке дизель-генераторной установки, подключаемой через перекидной выключатель к резервному распределительному щиту аварийного питания, от которого получают питание приоритетные электроприемники (см. **рис. N1**).



**Рис. N1:** Пример цепи, питаемой от трансформатора или генератора

## 1.1 Защита генератора

**Рис. N2** показывает электротехнические параметры генераторной установки.  $P_n$ ,  $U_n$  и  $I_n$  – мощность двигателя генератора, номинальное напряжение и номинальный ток генератора, соответственно.



**Рис. N2:** Блок-схема генераторной установки

### Защита от перегрузки

Должна анализироваться кривая допустимой перегрузки генератора (**рис. N3**). Нормы и требования области применения могут также обуславливать конкретный режим перегрузки. Например:

$I/I_n$	$t$
1.1	$> 1$ ч
1.5	12 с

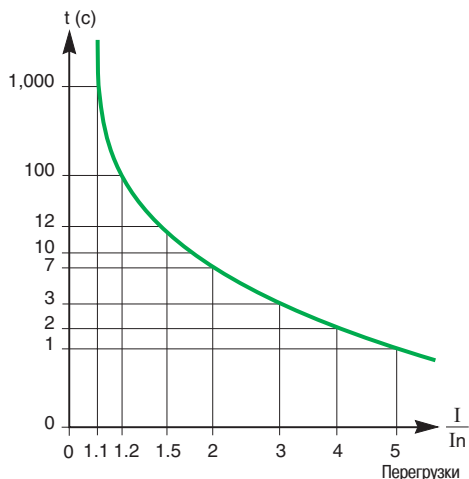
Уставки устройств защиты от перегрузки (или длительной выдержки времени) должны соответствовать этим требованиям.

#### Примечание по перегрузкам

■ По экономическим соображениям двигатель резервной установки должен быть точно рассчитан на номинальную мощность. При перегрузке по активной мощности дизельный двигатель будет глохнуть. Необходимо учитывать баланс по активной мощности.

■ Установка должна быть рассчитана на следующие режимы перегрузки:

- одночасовая перегрузка;
- одночасовая перегрузка 10% каждые 12 часов (рабочий режим).



**Рис. N3:** Пример кривой допустимой перегрузки  $t = f(I/I_n)$

# 1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей

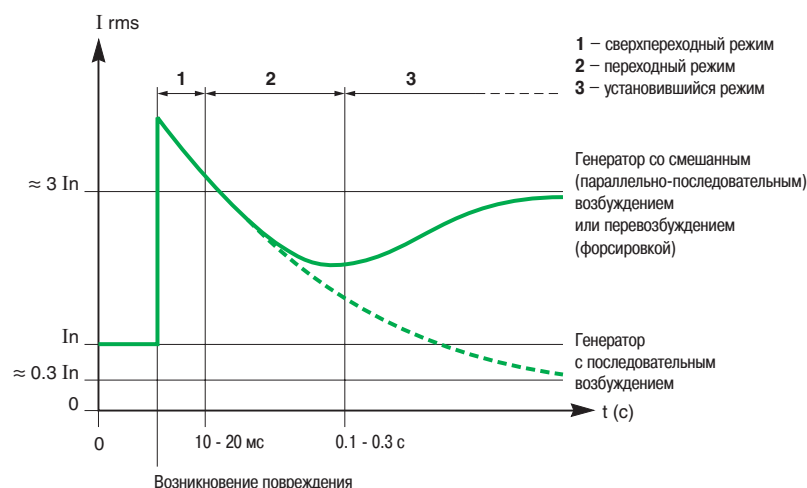
## Защита от тока короткого замыкания

### Расчет тока короткого замыкания

Ток короткого замыкания есть сумма:

- аperiodической составляющей тока;
- затухающего синусоидального тока.

Уравнение тока короткого замыкания показывает, что он рассчитывается в соответствии с тремя стадиями (см. **рис. N4**).



**Рис. N4:** Уровень тока короткого замыкания в течение 3 стадий

#### ■ Сверхпереходная стадия

При возникновении короткого замыкания на зажимах генератора ток сначала имеет относительно высокий уровень около 6-12  $I_n$  в течение первого цикла (10-20 мс).

Амплитуда тока короткого замыкания определяется тремя параметрами:

- сверхпереходное реактивное сопротивление генератора;
- уровень возбуждения перед повреждением;
- полное сопротивление поврежденной цепи.

Учитываемое полное сопротивление короткого замыкания генератора является сверхпереходным реактивным сопротивлением  $x''d$ , выражаемым как % от  $U_0$  (напряжение между фазой и нейтралью) (по  $x''d$  изготовителя). Типовое значение – 10÷15%.

Мы определяем сверхпереходное полное сопротивление короткого замыкания генератора следующим образом:

$$x''d \text{ (Ом)} = \frac{U_n^2 x''d}{100 S}, \text{ где } S = \sqrt{3} U_n I_n$$

#### ■ Переходная стадия

Переходная стадия происходит через 100-500 мс после короткого замыкания. Начиная со значения тока короткого замыкания сверхпереходного периода, ток уменьшается до значения 1,5÷2  $I_n$ .

Учитываемое полное сопротивление короткого замыкания для этого периода является переходным реактивным сопротивлением, выражаемым как % от  $U_0$  (по  $x'd$  изготовителя). Типовое значение – 20-30%.

#### ■ Установившаяся стадия

Она возникает через 500 мс.

При устойчивом повреждении выходное напряжение установки падает, и система регулирования возбуждения пытается повысить выходное напряжение. Результатом является стабилизированный установившийся ток короткого замыкания:

- Если возбуждение генератора не повышается в течение короткого замыкания (нет перевозбуждения), но поддерживается на уровне перед коротким замыканием, ток стабилизируется на значении, определяемом синхронным реактивным сопротивлением  $X_d$  генератора. Типовое значение  $x_d$  выше 200%. Как следствие, конечный ток меньше номинального тока генератора (как правило, около 0,5  $I_n$ ).

- Если в системе регулирования возбуждения предусмотрена форсировка поля возбуждения, или если система выполнена по, так называемой, параллельно последовательной схеме, то подъем напряжения возбуждения приводит к увеличению длительности переходного процесса (10 С). Ток КЗ, как правило, в 2-3 раза превышает номинальный ток генератора.

Расчет тока короткого замыкания

Как правило, изготовители указывают значения полного сопротивления и постоянные времени затухания, требуемые для анализа работы в переходном или установившемся режиме (см. [рис. N5](#)).

(кВА)	75	200	400	800	1,600	2,500
x"d	10.5	10.4	12.9	10.5	18.8	19.1
x'd	21	15.6	19.4	18	33.8	30.2
xd	280	291	358	280	404	292

Рис. N5: Пример таблицы полного сопротивления (в %)

Активные сопротивления всегда пренебрежимо малы в сравнении с реактивными сопротивлениями. Параметры анализа тока короткого замыкания:

- Значение тока короткого замыкания на зажимах генератора
- Величина тока короткого замыкания в переходном режиме:

$$I_{sc3} = \frac{U_n}{X'd} \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ (X'd, Ом)}$$

или

$$I_{sc3} = \frac{I_n}{x'd} 100 \text{ (x'd в \%, где}$$

Un – линейное напряжение генератора

**Примечание:** данное значение может быть сопоставлено с током короткого замыкания на зажимах трансформатора. Таким образом, при одной и той же мощности ток при коротком замыкании вблизи от генератора в 5-6 раз меньше, чем токи, которые могут возникать при питании от трансформатора. Значимость такой разницы увеличивается, учитывая тот факт, что мощность генераторной установки, как правило, меньше мощности трансформатора (см. [рис. N6](#)).

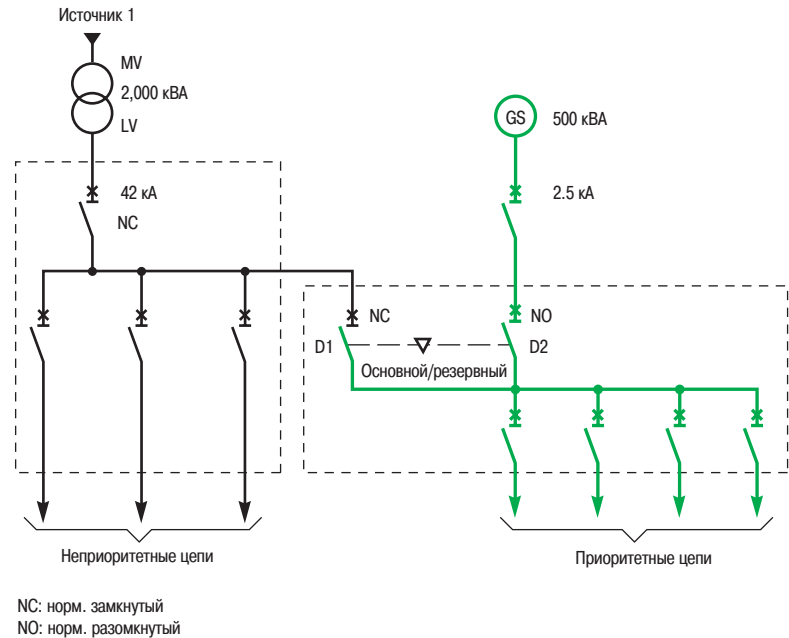


Рис. N6: Пример распределительного щита приоритетных нагрузок с питанием (при аварии) от резервной генераторной установки

При питании низковольтной цепи от основного источника 1 (2000 кВА) ток короткого замыкания составляет 42 кА на главной шине низковольтного щита. При питании низковольтной сети от резервного источника 2 (500 кВА) с переходным реактивным сопротивлением 30%, ток короткого замыкания составляет приibl. 2,5 кА (т.е., в 16 раз слабее, чем при основном источнике).

# 1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей

## 1.2 Защита отходящих низковольтных сетей

### Защита приоритетных цепей

#### Выбор аппаратуры по отключающей способности

Отключающая способность должна соответствовать характеристикам основного источника питания (понижающий трансформатор).

#### Выбор и настройка расцепителей с кратковременной выдержкой времени (селективная отсечка - STD)

##### ■ Промежуточные распределительные щиты

Номинальные значения устройств защиты промежуточных и конечных распределительных цепей всегда ниже номинального тока генераторной установки. Как следствие, за исключением специальных случаев, режим аналогичен питанию через трансформатор.

##### ■ Главный низковольтный распределительный щит

□ Как правило, параметры устройств защиты основной питающей линии аналогичны параметрам генераторной установки. Уставка STD должна соответствовать параметрам короткого замыкания генераторной установки (см. «Защита от токов короткого замыкания» выше).

□ Селективность устройств защиты на приоритетных питающих линиях должна обеспечиваться для работы генераторной установки (она может быть обязательной для линий, питающих системы безопасности). Необходимо сверить уставку STD устройств защиты основных питающих линий с уставкой устройств защиты промежуточных распределительных цепей (нормальная уставка для распределительных цепей -  $10 I_n$ ).

**Примечание:** при работе с питанием от генераторной установки использование низкочувствительных УЗО позволяет отключать токи однофазных КЗ и обеспечивает требуемую селективность.

### Безопасность людей

При системах заземления IT (второе замыкание) и TN защита людей от косвенного прикосновения обеспечивается выключателями с расцепителями с короткой выдержкой времени (STD). Их работа при повреждении должна гарантироваться при питании от основного источника (трансформатор) или от резервного источника (генераторная установка).

#### Расчет тока однофазного КЗ

Реактивное сопротивление нулевой последовательности выражается как % от  $U_0$  (по  $x'_0$  изготовителя).

Типовое значение – 8%.

Однофазный (фаза-нейтраль) ток короткого замыкания задается формулой:

$$I_f = \frac{U_n \sqrt{3}}{2 X'd + X'_0}$$

Ток однофазного замыкания на корпус при системе заземления TN немного выше тока трехфазного короткого замыкания. Например, в предыдущем примере он равен 3 кА.

## 1.3 Функции контроля

Рабочие параметры генераторной установки должны контролироваться при подсоединенных специальных нагрузках.

Рабочие характеристики генератора отличаются от рабочих характеристик трансформатора:

■ Номинальная активная мощность генератора выдается при коэффициенте мощности не менее 0,8.

■ При меньшем значении коэффициента мощности нагрузки максимальная активная мощность, выдаваемая генератором, снижается.

### Блок конденсаторов

Подключение конденсаторов к ненагруженному генератору может вызывать его самовозбуждение и, следовательно, увеличение напряжения.

Поэтому, конденсаторы, используемые для регулирования коэффициента мощности, должны отсоединяться. Такая операция может обеспечиваться путем подачи команды остановки на регулятор, управляющий переключением секций КБ, или посредством отключения питания конденсаторов.

### Повторный запуск двигателя

Генератор может кратковременно быть нагружен на ток в 3-5 раз больше своего номинального значения.

Двигатель потребляет около  $6 I_n$  в течение 2÷20 с пуска.



Если суммарная мощность двигателей, питающихся от генератора велика, то их одновременный запуск с высокими пусковыми токами может вызывать нарушения нормального режима работы: большие колебания напряжения из-за больших значений переходного и сверхпереходного реактивных сопротивлений генераторной установки (20-30%) с риском:

- незапуска двигателей;
- повышения температуры: пониженное напряжение приведет к увеличению времени пуска;
- отключения тепловой защитой.

Кроме того, нарушается работа сети и приводов из-за падения напряжения.

#### Пример (см. рис. N7)

Генератор питает ряд двигателей.

Характеристики КЗ генератора:  $S_n = 130$  кВА при коэффициенте мощности 0,8,  $I_n = 150$  А  $x'd = 20\%$  (например), следовательно,  $I_{sc} = 750$  А.

- $\Sigma P$  двигателей равна 45 кВт (45% мощности генератора).

Расчет падения напряжения при запуске:

$\Sigma$  двигателей = 45 кВт,  $I_m = 81$ А, следовательно, пусковой ток  $I_d = 480$ А в течение 2-20 с.

Падение напряжения на сборных шинах при одновременном запуске двигателей:

$$\frac{\Delta U}{U} = \left( \frac{I_d - I_n}{I_{sc} - I_n} \right) \text{ in } \%$$

$\Delta U = 55\%$ ,

что неприемлемо для двигателей (отказ при пуске).

- $\Sigma P$  двигателей равна 20 кВт (20% мощности генератора).

Расчет падения напряжения при пуске:

$\Sigma$  двигателей = 20 кВт,  $I_m = 35$ А, следовательно, пусковой ток  $I_d = 210$ А в течение 2-20 с.

Падение напряжения на сборных шинах:

$$\frac{\Delta U}{U} = \left( \frac{I_d - I_n}{I_{sc} - I_n} \right) \text{ in } \%$$

$\Delta U = 10\%$ ,

что приемлемо (в зависимости от типа нагрузок), хотя это и высокое значение.

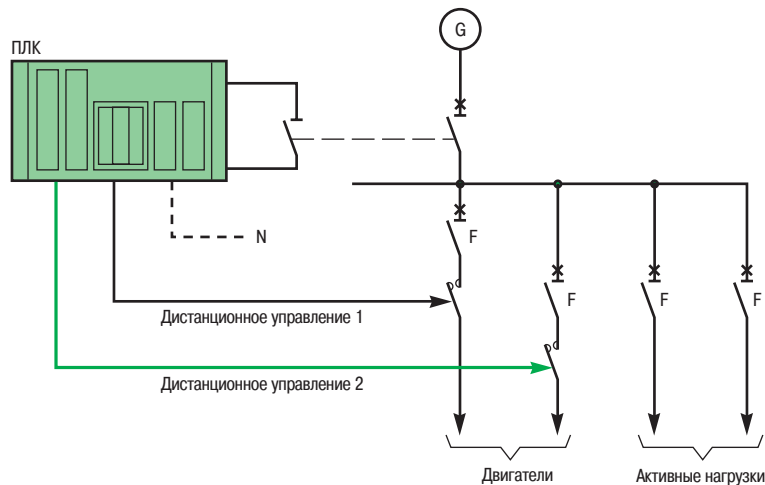


Рис. N7: Повторный запуск приоритетных двигателей ( $\Sigma P > 1/3 P_n$ )

#### Рекомендации по повторному запуску

- Если  $P_{\max}$  наибольшего двигателя  $> \frac{1}{3} P_n$ , на двигателе должно устанавливаться устройство плавного пуска.
- Если  $\Sigma P$  двигателей  $> \frac{1}{3} P_n$ , групповой повторный запуск двигателей должен управляться с помощью ПЛК.
- Если  $\Sigma P$  двигателей  $< \frac{1}{3} P_n$ , нет проблем с повторным запуском.

# 1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей

## Нелинейные нагрузки

Нелинейные нагрузки:

- Насыщенные магнитные цепи.
- Разрядные лампы, флуоресцентные лампы.
- Электронные преобразователи.
- Системы компьютерной обработки: ПК, компьютеры и т.д.

Такие нагрузки генерируют гармонические токи: при питании от генераторной установки это может приводить к большим искажениям напряжения из-за низкой мощности КЗ генератора.

## Источник бесперебойного питания (ИБП) (см. рис. N8)

Сочетание ИБП и генераторной установки – оптимальное решение для обеспечения качественного питания с длительным автономным питанием чувствительных нагрузок.

ИБП является нелинейной нагрузкой из-за наличия входного выпрямителя. При переключении источника питания автономная работа ИБП на батарее должна обеспечивать питание нагрузки на время пуска генераторной установки.

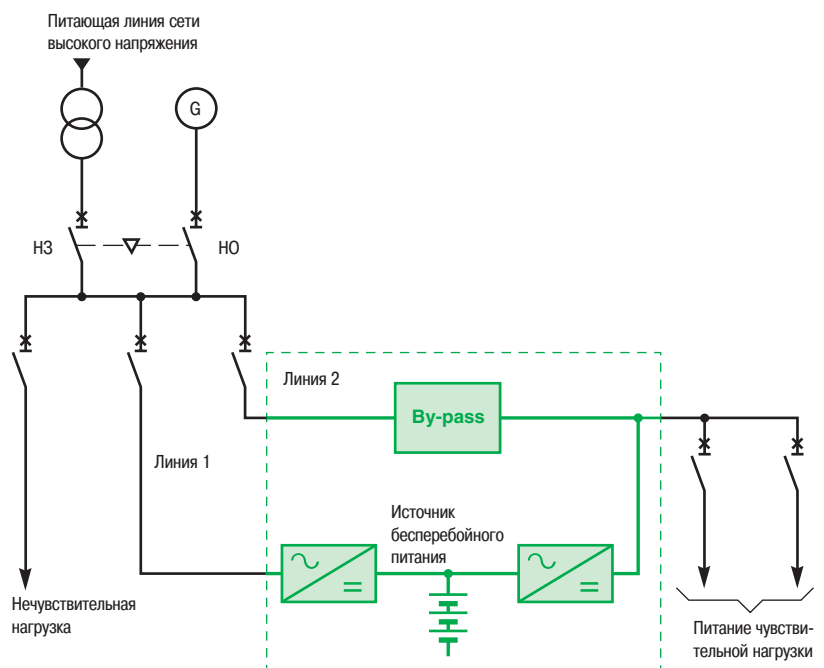


Рис. N8: Комбинация «генераторная установка – ИБП» для обеспечения качественным электроснабжением

## Мощность ИБП

Максимальная мощность ИБП должна обеспечивать:

- Номинальную мощность питаемых нагрузок. Это сумма полных мощностей  $S_a$ , потребляемых каждой нагрузкой. Кроме того, чтобы не зависить мощность ИБП, необходимо учитывать перегрузочную способность ИБП (например, 1,5 In в течение 1 минуты и 1,25 In в течение 10 минут).
- Мощность, необходимую для перезарядки батареи: ток пропорционален времени автономной работы, требуемому при заданной мощности. Параметр  $S_r$  ИБП рассчитывается по формуле:

$$S_r = 1.17 \times P_n$$

Таблица M9 определяет пиковые токи и устройства защиты в линии выпрямителя (линия 1) и резервной сети (линия 2).

Номинальная мощность Рп (кВА)	Значение тока (А)	
	Линия 1 с трехфазным выпрямителем, 400 В- I1	Линия 2 с трехфазным питанием 400 В - Iu
40	86	60.5
60	123	91
80	158	121
100	198	151
120	240	182
160	317	243
200	395	304
250	493	360
300	590	456
400	793	608
500	990	760
600	1,180	912
800	1,648	1,215

Рис. N9: Пиковый ток в линии выпрямителя (линия 1) и резервной сети (линия 2)

Комбинация «генераторная установка/ИБП»

■ Переключение выпрямителя ИБП на питание от генераторной установки  
Выпрямитель ИБП может иметь систему плавного пуска зарядного устройства для предотвращения больших пусковых токов, когда питание нагрузки переключается на генераторную установку (см. рис. N10).

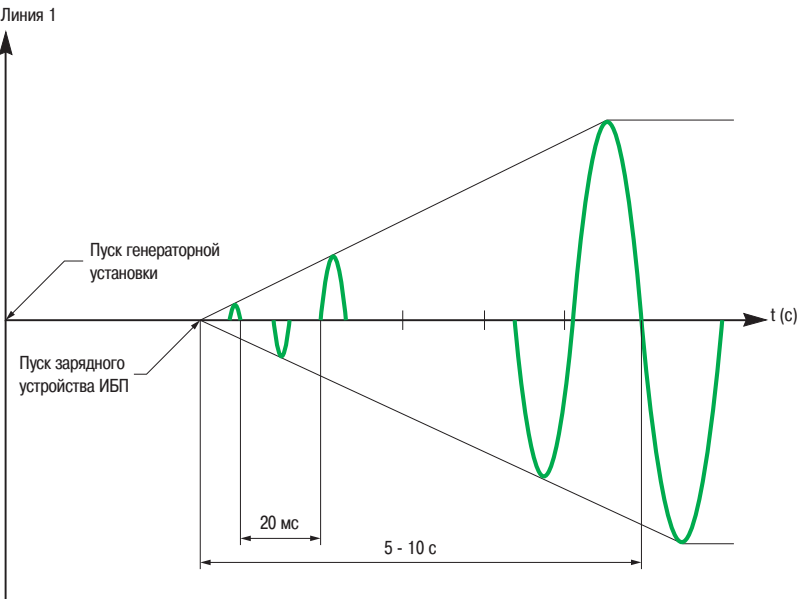


Рис. N10: Плавный пуск выпрямителя ИБП, тип 2

■ Гармоники и искажение напряжения  
Коэффициент искажения синусоидальной кривой напряжения:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum U_{np}^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где  $U_{np}$  – гармоническая составляющая напряжения n-го порядка.

Это значение зависит от следующих параметров:

- гармонические токи, генерируемые выпрямителем (пропорциональны мощности  $S_r$  выпрямителя);
- продольное сверхпереходное реактивное сопротивление генератора  $X''d$ ;
- мощность генератора  $S_g$ .

Мы определяем  $U'Rcc(\%) = X''d \frac{S_r}{S_g}$  напряжение КЗ генератора, приведенное к мощности выпрямителя т.е.,  $t = f(U'Rcc)$ .

# 1 Защита низковольтной генераторной установки и отходящих цепей

**Примечание 1:** поскольку сверхпереходное реактивное сопротивление высокое, гармонические искажения, как правило, слишком велики в сравнении с допустимым значением (7-8%) для экономически обоснованных параметров генератора. Рекомендуемым решением является использование специального фильтра.

**Примечание 2:** гармонические искажения не представляет вреда для выпрямителя, но могут быть вредным для других нагрузок, питаемых параллельно с выпрямителем.

## Применение

Для определения искажения  $K_u$  (THDu) как функции  $U'R_{cc}$  используется график (см. N11).

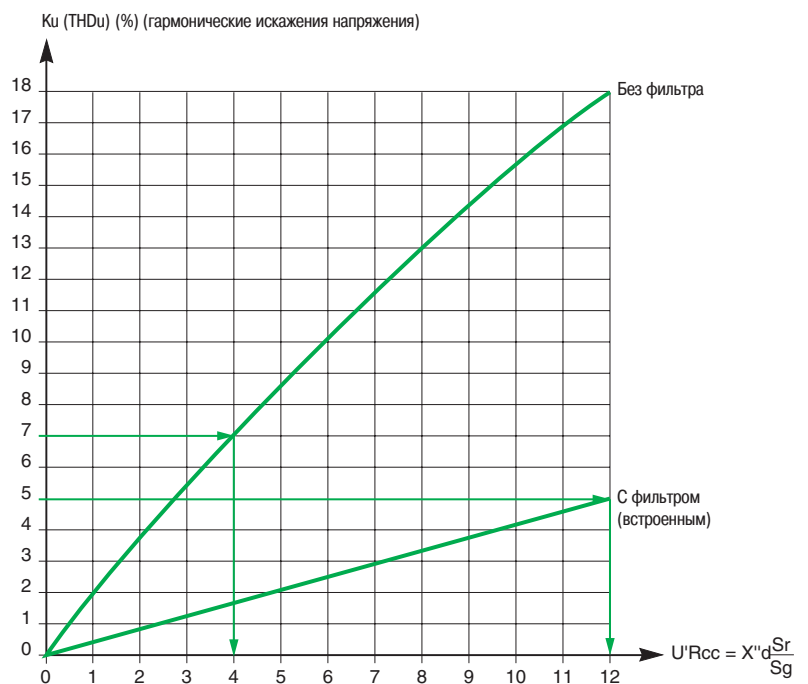


Рис. N11: График для  $K_u$  (THDu) (%) - коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

График дает:

- значение  $K_u$  как функции  $U'R_{cc}$ ;
- значение  $U'R_{cc}$  как функции  $K_u$ .

На основе этого определяется мощность генератора  $S_g$ .

## Пример: мощность генератора

- ИБП 300 кВА без фильтра, сверхпереходное реактивное сопротивление 15%

Мощность выпрямителя ( $S_r$ )  $S_r = 1,17 \times 3000 \text{ кВА} = 351 \text{ кВА}$

Для  $K_u < 7\%$  график дает  $U'R_{cc} = 4\%$ , мощность  $S_g$ :

$$S_g = 351 \times \frac{15}{4} \approx 1,400 \text{ кВА}$$

- ИБП 300 кВА с фильтром, сверхпереходное реактивное сопротивление 15%

Для  $K_u = 5\%$  расчет дает  $U'R_{cc} = 12\%$ , мощность  $S_g$ :

$$S_g = 351 \times \frac{15}{12} \approx 500 \text{ кВА}$$

**Примечание:** с питающим трансформатором 630 кВА на ИБП 300 кВА без фильтра получаемое значение равно 5%.

Это означает, что работа генераторной установки должна постоянно контролироваться на гармонические токи.

Если напряжение гармонических искажений очень большое то использование фильтра в сети — наиболее эффективное решение для снижения гармонических искажений до значений, допустимых для чувствительных нагрузок.

## 1.4 Параллельное подключение генераторной установки

Параллельное соединение генераторных установок (независимо от типа источника – основной или резервный) требует тщательного контроля и мониторинга.

### Работа в параллельном режиме

Поскольку генераторные установки при параллельном подключении генерируют энергию для одной нагрузки, они должны быть синхронизированы (напряжение, частота) и распределение нагрузок между ними должно быть сбалансировано. Эта функция выполняется регулятором каждой генераторной установки (регулирование приводного двигателя и регулирование возбуждения). Параметры (частота, напряжение) контролируются до соединения: при совпадающих значениях этих параметров происходит подключение.

### Повреждения изоляции (см. рис. N12)

Повреждение изоляции внутри металлического корпуса генераторной установки может серьезно повредить генератор, если повреждение носит характер фазного КЗ. Повреждение должно оперативно выявляться и устраняться, иначе другие генераторы будут подавать энергию на поврежденный участок и будут отключены по перегрузке (при этом бесперебойность питания не может быть гарантирована). Защита от замыкания на землю (GFP), встроенная в цепь генератора, используется в следующих целях:

- быстрое отсоединение поврежденного генератора и обеспечение бесперебойного питания;
- действие на цепь управления поврежденного генератора для его остановки и снижения риска повреждения.

Защита GFP является «чувствительной к току нулевой последовательности» и должна устанавливаться как можно ближе к устройству защиты на каждой генераторной установке с заземлением корпуса отдельным защитным заземлением (PE) (согласно схеме заземления TN-C/TN-S(1)). Такой тип защиты обычно называется «ограниченным замыканием на землю».

### Работа генераторных установок в качестве нагрузок (см. рис. N13 и рис. N14)

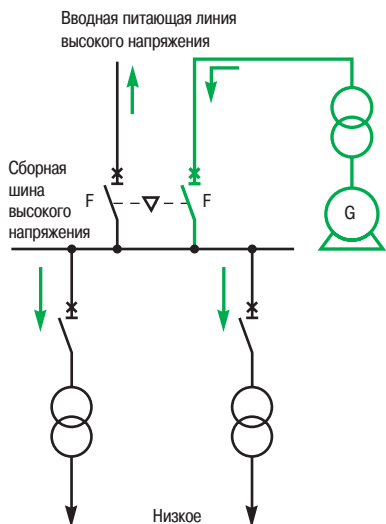


Рис. N13: Направление передачи энергии – генераторная установка, работающая в режиме генератора

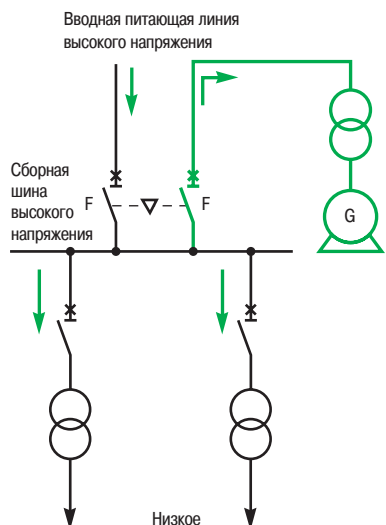


Рис. N14: Направление передачи энергии – генераторная установка, работающая в режиме нагрузки

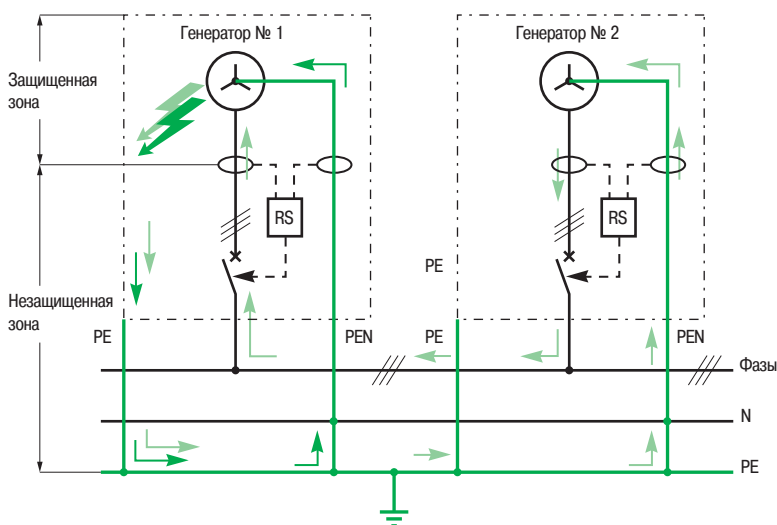


Рис. N12: Замыкание на корпус внутри генератора

Одна из параллельно соединенных генераторных установок может перестать работать в режиме генератора и начать работать в качестве, например, двигателя (например, из-за потери возбуждения). Это может приводить к перегрузке других генераторных установок и, как следствие, выводить энергосистему из строя.

Для проверки того, что генераторная установка действительно подает питание на нагрузку (работа в качестве генератора), необходимо проверить направление потока энергии на сборные шины (контроль на обратную мощность). При возникновении повреждения, когда установка работает в режиме двигателя, такой контроль позволяет устранить повреждение.

### Заземление параллельно-соединенных генераторных установок

Заземление параллельно-соединенных генераторных установок (подсоединение нейтралей к общему заземлению (схема заземления TN или TT)) может приводить к токам замыкания на землю (гармоники 3-го порядка и гармоники порядка, кратного 3). Для предотвращения протекания таких токов между генераторными установками рекомендуется установить развязывающее сопротивление в заземляющей цепи.

(1) Схема заземления TN-C для установок, работающих в качестве генератора, и схема заземления TN-S для установок, работающих в качестве нагрузки.

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

### 2.1 Готовность и качество электроэнергии

Помехи в электросети отрицательно влияют на:

- безопасность людей;
- безопасность имущества;
- рентабельность компании или технологического процесса.

Поэтому помехи должны устраняться.

Ряд технических решений вносит вклад в достижение этой цели с различной степенью эффективности. Такие решения могут сопоставляться на основе двух критериев:

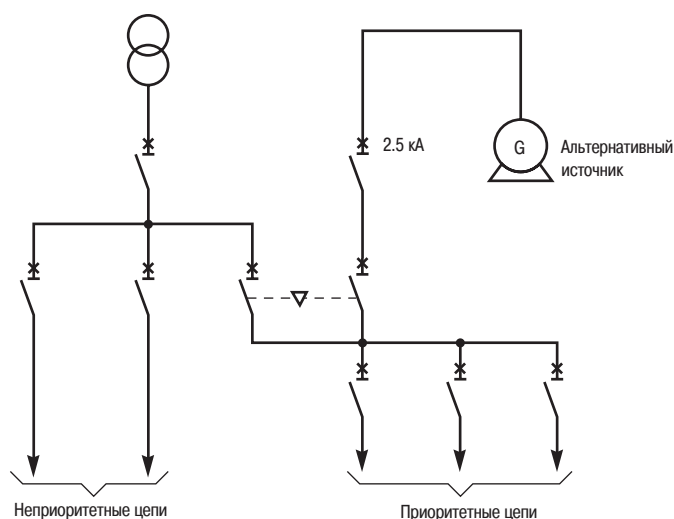
- готовность (безотказность) системы электроснабжения;
- качество поставляемой электроэнергии.

Готовность может определяться как количество времени в году, в течение которого напряжение присутствует на клеммах нагрузки. Готовность снижается главным образом из-за перерывов в электроснабжении в результате выхода источников питания из строя или повреждений в электрических цепях.

Существует ряд решений по ограничению риска:

- обеспечение возможности питания от нескольких различных источников, а не от одного источника питания;
- подразделения цепей на приоритетные и неприоритетные с обеспечением питания (при необходимости), приоритетных цепей от другого имеющегося источника;
- сброс нагрузки при необходимости, чтобы пониженная мощность нагрузки могла быть обеспечена питанием от резервного источника;
- выбор системы заземления в соответствии с целями бесперебойного питания, например, система IT;
- селективность устройств защиты (селективное отключение) для ограничения последствий повреждения части системы.

Следует отметить, что единственный способ обеспечить готовность системы с учетом выхода источников из строя (в дополнение к вышеуказанным мерам) - это предусмотреть автономный альтернативный источник питания, по крайней мере, для приоритетных нагрузок (см. **рис. N15**).



**Рис. N15:** Повышение надежности электроснабжения

Такой источник принимает нагрузку в случае повреждения в системе. При этом необходимо учитывать два фактора:

- время переключения (время, требуемое для переключения с системы на источник), которое должно быть приемлемо для нагрузки;
- время работы, в течение которого такой источник может питать нагрузку.

Качество электроэнергии определяется устранением помех на клеммах нагрузки.

Альтернативный источник является средством обеспечения бесперебойного электроснабжения нагрузки. Однако, во многих случаях он не гарантирует качество подаваемой электроэнергии с учетом имеющихся помех.

Сегодня многие чувствительные электронные нагрузки требуют электропитания с низким уровнем помех, не говоря уже о возможности перерыва в электроснабжении.

Например, вычислительные центры, АТС и многие системы управления и контроля производственного процесса.

Такие области требуют решений, которые обеспечивают бесперебойность электроснабжения и качество электроэнергии.

### Решение на основе ИБП

Решение для чувствительных нагрузок состоит в выборе специальных источников питания с повышенными требованиями к выходному напряжению. Выходное напряжение должно отвечать следующим требованиям:

- Отсутствие каких-либо помех в энергоснабжении и соблюдение строгих допусков, требуемых нагрузкой.

- Бесперебойность электроснабжения в случае выхода из строя одного из источников питания.

Источники бесперебойного питания (ИБП) отвечают таким требованиям по бесперебойности электроснабжения и качеству электроэнергии в силу следующих своих характеристик:

- Подвод напряжения к нагрузке требуемого качества благодаря использованию инвертера.

- Обеспечение автономной работы посредством использования аккумуляторных батарей.

- Переключение с энергосистемы на ИБП без прерывания электропитания нагрузки, с использованием бесконтактного переключателя (без подвижных частей).

Такие характеристики делают ИБП идеальным источником питания для всех чувствительных нагрузок, поскольку они обеспечивают качество и бесперебойность электроснабжения независимо от состояния энергосистемы.

ИБП включает следующие основные компоненты:

- Выпрямитель/зарядное устройство, которое вырабатывает постоянный ток для зарядки батареи и питания инвертера

- Инвертер, который обеспечивает качественную электроэнергию:

- без помех (возмущений имеющихся в системе электроснабжения), в частности, кратковременных перерывов в электроснабжении;

- в пределах допусков, отвечающих требованиям чувствительных электронных устройств (например, для Galaxy, допуски на амплитуду -  $\pm 0,5\%$  и частоту -  $\pm 1\%$  в сравнении с  $\pm 10\%$  и  $\pm 5\%$  в энергосистеме, что в 20 и 5 раз лучше, соответственно).

- Аккумуляторная батарея с достаточным временем резервного питания (от 8 минут до 1 часа и более) для обеспечения безопасности людей и имущества.

- Бесконтактный переключатель (без подвижных частей) — полупроводниковое устройство, которое переключает нагрузку с инвертера на энергосистему и обратно без перерыва в электроснабжении.

## 2.2 Типы статических ИБП

Типы статических ИБП определяются стандартом МЭК 62040.

Стандарт различает три рабочих режима:

- режим резервирования (также называемый офф-лайн режимом);

- линейно-интерактивный режим;

- режим двойного преобразования (также называемый он-лайн режимом).

Эти определения касаются работы ИБП совместно с основным источником питания, включая распределительную систему до ИБП.

Стандарт МЭК 62040 определяет следующие термины:

- Первичное электропитание: нормально стабильное электропитание, обеспечиваемое обычной электроэнергетической компанией, но иногда за счет генерирующей установки пользователя.

- Резервное электропитание: электропитание, предназначенное для замены первичного электропитания в случае его нарушения.

- Байпасное электропитание: электропитание через байпас.

Как правило, ИБП обеспечен двумя вводами переменного тока (в настоящем руководстве это нормальный ввод переменного тока и байпасный ввод переменного тока).

- Нормальный ввод переменного тока, указанный как сетевой ввод 1 (линия 1), получает первичное электропитание, т.е. по кабелю, соединенному с питающей линией от энергосистемы или частной распределительной системы.

- Байпасный ввод переменного тока, указанный как сетевой ввод 2 (линия 2), как правило, получает резервное электропитание, т.е. по кабелю, соединенному с питающей линией, отличной от питающей нормальный ввод переменного тока, с резервированием посредством альтернативного источника (например, двигатель-генератор или другой ИБП).

При отсутствии резервного электропитания байпасный ввод переменного тока получает первичное электропитание (второй кабель, идущий параллельно кабелю, подсоединенному к нормальному вводу переменного тока).

Байпасный ввод переменного тока используется для питания байпасных линий ИБП (при наличии). Поэтому, байпасные линии получают первичное или резервное питание в зависимости от наличия резервного источника питания.

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

### ИБП, работающий в режиме резервирования (режим офф-лайн)

#### Принцип работы

Инвертер подсоединен параллельно с вводами переменного тока в источнике резервного питания (см. [рис. N16](#)).

#### ■ Нормальный режим

Нагрузка питается энергосистемой через фильтр, который устраняет определенные помехи и обеспечивает некоторую степень регулирования напряжения («дополнительные устройства... для обеспечения кондиционирования параметров электропитания», как говорится в стандарте). Инвертер работает в режиме резервирования.

#### ■ Режим резервного аккумуляторного питания

При выходе напряжения на вводе переменного тока за допуски, указанные для ИБП, или исчезновении электропитания от энергосистемы, включаются инвертер и батарея для обеспечения бесперебойного электропитания нагрузки с очень коротким временем переключения ( $< 10$  мс).

ИБП продолжает работать от батареи до завершения времени автономной работы или возврата энергосистемы в нормальный режим (при этом нагрузка переключается обратно на вход переменного тока (нормальный режим)).

#### Применение

Фактически, эта конфигурация является компромиссом между приемлемым уровнем защиты от помех и стоимостью. Может использоваться только при низкой номинальной мощности ( $< 2$  кВА). Отсутствует бесконтактный переключатель, поэтому требуется определенное время для переключения нагрузки на инвертер. Это время приемлемо для определенных нагрузок, но неприемлемо для более сложных чувствительных систем (крупные вычислительные центры, АТС и т.д.). Более того, частота не регулируется и отсутствует байпас.

**Примечание:** В нормальном режиме питание нагрузки не поступает через инвертер, что объясняет, почему этот тип ИБП иногда называется «офф-лайн». Это неправильный термин, поскольку он подразумевает «не питаемый от энергосистемы», в то время, как фактически, нагрузка питается от энергосистемы через вход переменного тока в нормальном режиме работы.

### ИБП, работающий в линейно-интерактивном режиме

#### Принцип работы

Инвертер подсоединен параллельно с вводами переменного тока в резервной конфигурации, но одновременно он заряжает батарею (см. [рис. N17](#)).

#### ■ Нормальный режим

Нагрузка получает стабилизированное электропитание через параллельное соединение ввода переменного тока и инвертера. Инвертер обеспечивает стабилизацию выходного напряжения и/или зарядку батареи. Выходная частота зависит от частоты на вводе переменного тока.

#### ■ Режим резервного питания от аккумуляторов

При выходе питающего напряжения за допуски, указанные для ИБП, или исчезновении электропитания от энергосистемы, включаются инвертер и батарея для обеспечения бесперебойного питания нагрузки после мгновенного переключения с помощью бесконтактного выключателя, который отсоединяет ввод переменного тока для предотвращения поступления питания от инвертера в энергосистему.

ИБП продолжает работать на батарее до завершения времени автономной работы или возврата энергосистемы в нормальный режим (при этом нагрузка переключается обратно на ввод переменного тока (нормальный режим)).

#### ■ Байпасный режим

Этот тип ИБП может обеспечиваться байпасом. При отказе одной из функций ИБП нагрузка может переключаться на байпасный ввод переменного тока (от энергосистемы или резервного источника в зависимости от объекта).

#### Применение

Эта конфигурация не совсем подходит для резервирования чувствительных нагрузок в диапазоне мощности от средней до высокой из-за невозможности регулирования частоты. По этой причине она редко применяется, кроме случаев низкой номинальной мощности.

### ИБП, работающий в режиме двойного преобразования (он-лайн режим)

#### Принцип работы

Инвертер подсоединен последовательно между вводом переменного тока и нагрузкой.

#### ■ Нормальный режим

При нормальном режиме все питание, подаваемое на нагрузку, проходит через выпрямитель/зарядное устройство и инвертер, которые совместно выполняют двойное преобразование (пер. тока - пост. тока - пер. тока). Отсюда и название режима.

#### ■ Режим резервного аккумуляторного питания

При выходе напряжения на вводе переменного тока за допуски, указанные для ИБП, или исчезновении электропитания от энергосистемы, включаются инвертер и батарея для обеспечения бесперебойного питания нагрузки после мгновенного переключения с помощью бесконтактного выключателя.

ИБП продолжает работать на батарее до завершения времени автономной работы или возврата энергосистемы в нормальный режим (при этом нагрузка переключается обратно на вход переменного тока (нормальный режим)).

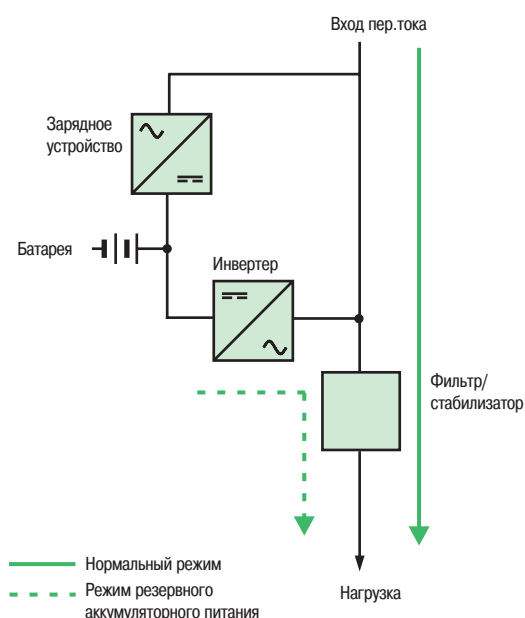


Рис. N16: ИБП, работающий в режиме резервирования

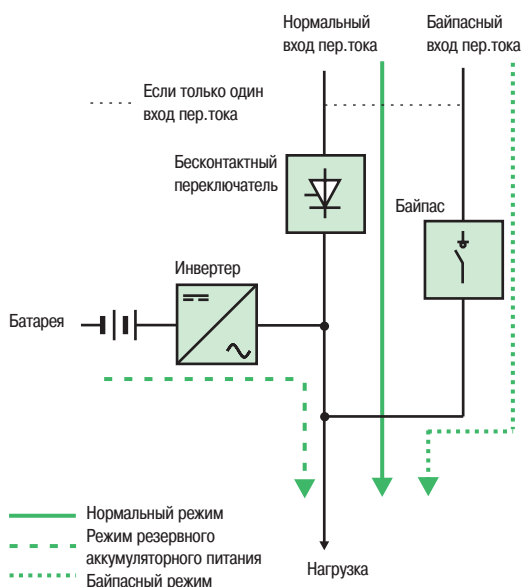


Рис. N17: ИБП, работающий в линейно-интерактивном режиме



### ■ Байпасный режим

Как правило, этот тип ИБП обеспечивается статическим байпасом, иногда называемым статическим (бесконтактным) переключателем (см. **рис. N18**).

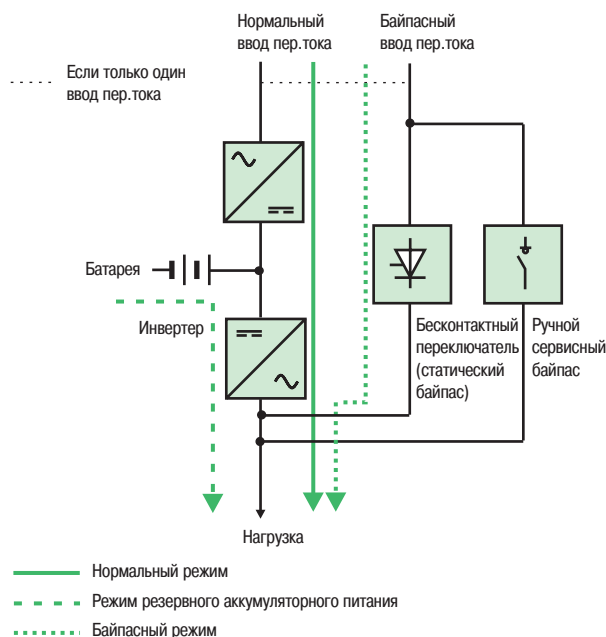
Нагрузка может переключаться без прерывания питания на байпасный ввод переменного тока (с питанием от энергосистемы или резервного источника в зависимости от объекта) в следующем случае:

- отказ ИБП;
- большие переходные токи нагрузки (броски тока при включении или при повреждении).
- пики нагрузки.

Однако, присутствие байпаса подразумевает одинаковую входную и выходную частоту, а при разных значениях напряжения требуется байпасный трансформатор.

В большинстве случаев ИБП должен быть синхронизирован с байпасным электропитанием для обеспечения бесперебойного питания нагрузки. Более того, когда ИБП работает в байпасном режиме помехи от входного источника пер. тока могут передаваться непосредственно на нагрузку, поскольку инвертер в этом режиме не подключен.

**Примечание:** также может быть предусмотрена другая байпасная линия, часто называемая сервисным байпасом, для проведения техобслуживания. Она включается ручным выключателем.



**Рис. N18:** ИБП, работающий в режиме двойного преобразования (он-лайн режим)

### Применение

При такой конфигурации время, требуемое для переключения нагрузки на инвертер, пренебрежимо мало благодаря бесконтактному выключателю.

Кроме того, выходное напряжение и частота не зависят от входного напряжения и частоты. Это означает, что ИБП, разработанный для такой цели, может работать в качестве преобразователя частоты.

Практически, это основная конфигурация, используемая при средней и высокой номинальной мощности (10 кВА и выше). Далее в данном разделе будет рассматриваться только эта конфигурация.

**Примечание:** Этот тип ИБП часто называется он-лайн, подразумевая, что нагрузка постоянно питается через инвертер независимо от режима работы входного источника пер. тока. Однако, этот термин неверен, поскольку он подразумевает «питаемый энергосистемой», в то время, как, фактически, нагрузка получает питание, преобразованное системой двойного преобразования. Вот почему стандарт МЭК 62040 рекомендует термин «двойное преобразование».

### 2.3 Аккумуляторные батареи

#### Выбор типа батареи

Батарея состоит из взаимосвязанных элементов либо с вентиляцией либо с рекомбинацией газов.

Существует два основных типа батарей:

- Никель-кадмиевые батареи
- Свинцово-кислотные батареи
- Элементы с вентиляцией (свинец-сурьма): Элементы обеспечены отверстиями для следующих целей
  - Выпуск в атмосферу кислорода и водорода, образующихся в результате различных химических реакций
  - Доливка дистиллированной или деминерализованной воды
- Элементы с рекомбинацией газов (свинцовые, чисто-свинцовые и свинцово-оловянные батареи): Уровень рекомбинации газов составляет минимум 95%, поэтому они не требуют добавления воды в течение срока службы

Далее в тексте эти батареи называются батареями с вентиляцией или с рекомбинацией газов (батареи с рекомбинацией газов часто называются «герметичными»).

Основные типы батарей, используемых вместе с источниками ИБП:

- Герметичные свинцово-кислотные батареи, используемые в 95% случаев, поскольку они просты в обслуживании и не требуют специального помещения
- Свинцово-кислотные батареи с вентиляцией
- Никель-кадмиевые батареи с вентиляцией

Вышеуказанные три типа батарей могут поставляться в зависимости от экономических факторов и эксплуатационных требований объекта, с различными возможными сроками службы.

Емкость и время резервного питания могут обеспечиваться по требованию пользователя.

Предлагаемые батареи идеально подходят для ИБП, поскольку они разрабатываются совместно с ведущими изготовителями аккумуляторных батарей.

#### Выбор времени резервного питания

Выбор зависит от следующих факторов:

- Средняя продолжительность перерывов в энергоснабжении.
- Имеющиеся резервные источники питания (дизель-генератор и т.д.).
- Тип объекта.

Типовой диапазон:

- Стандартное время резервного питания – 10, 15 или 30 минут.
- Время резервного питания по спецзаказу.

Применяются следующие общие правила:

- Объекты с компьютерами

Время резервного аккумуляторного питания должно быть достаточным для завершения процедур сохранения файлов и закрытия системы, требуемых для обеспечения контролируемого завершения работы системы. Вообще говоря, вычислительные отделы определяют необходимое время резервного питания в зависимости от конкретных требований.

- Производственные процессы

Время резервного питания должно рассчитываться с учетом экономических затрат в результате прерывания процесса и времени, требуемого для перезапуска.

#### Таблица выбора

**Рис. N19** содержит сводные характеристики различных типов аккумуляторных батарей.

Батареи с рекомбинацией газов пользуются все большим спросом в силу следующих причин:

- не требуется техобслуживание;
- простота монтажа;
- монтаж в помещениях любого типа (компьютерные помещения, технические помещения, без специальных требований по вентиляции и т.д.).

Однако, в определенных случаях рекомендуются батареи с вентиляцией, особенно с учетом следующего:

- длительный срок службы;
- длительное резервное питание;
- высокая номинальная мощность.

Батареи с вентиляцией должны устанавливаться в специальных помещениях в соответствии с установленными правилами и требуют соответствующего техобслуживания.

	Срок службы	Компактность	Допуски на рабочую температуру	Интервал техобслуживания	Спец-помещение	Стоимость
Герметичные свинцово-кислотные	5 или 10 лет	+	+	Малый	Не требуется	Низкая-средняя
Свинцово-кислотные с вентиляцией	5 или 10 лет	+	++	Средний	Требуется	Низкая
Никель-кадмиевые	5 или 10 лет	++	+++	Большой	Не требуется	Высокая

Рис. N19: Основные характеристики различных типов батарей

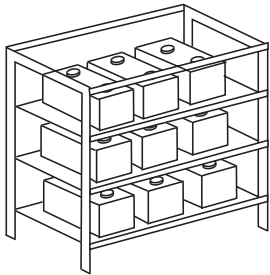


Рис. N20: Монтаж на полках

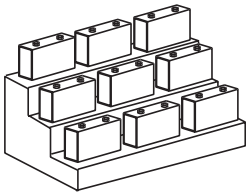


Рис. N21: Монтаж ярусами

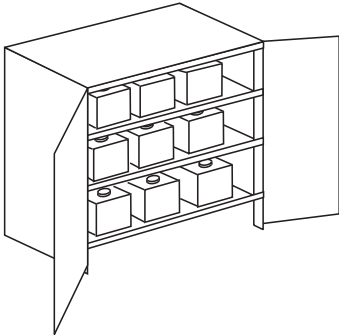


Рис. N22: Монтаж в шкаф

Методы монтажа

В зависимости от типа ИБП, емкости батареи и времени резервного питания, батарея может быть:

- герметичной и размещаться в шкафу ИБП;
- герметичной и размещаться в 1-3 шкафах;
- с вентиляцией или герметичной и монтироваться на стойке. В этом случае метод монтажа может быть:

- на полках (см. рис. N20);
- Этот метод монтажа возможен для герметичных батарей или батарей с вентиляцией, для которых не требуется техобслуживание и пополнение электролита.
- монтаж ярусами (см. рис. N21);
- Этот метод монтажа пригоден для всех типов батарей и, в частности, батарей с вентиляцией в силу простоты проверки уровня и пополнения электролита.
- в шкафах (см. рис. N22);
- Этот метод монтажа пригоден для герметичных батарей. Он легко реализуем и обеспечивает максимальную безопасность.

2.4 Схемы заземления для объектов с ИБП

Применение систем защиты, предусматриваемых стандартами, на объектах с источниками ИБП требует ряда мер предосторожности в силу следующих причин:

- ИБП выполняет двойную функцию:
- нагрузка для питающей системы;
- источник питания для нижерасположенной питаемой системы.
- Если батарея не устанавливается в шкафу, повреждение изоляции в системе постоянного тока может привести к появлению тока замыкания на землю.

Такой ток может нарушать работу ряда устройств защиты, особенно УЗО, используемых для защиты людей.

Защита от прямого контакта (см. рис. N23)

Все установки удовлетворяют применяемым требованиям, поскольку оборудование размещается в шкафах, обеспечивающих степень защиты IP 20. Это верно даже для батареи, устанавливаемой в шкаф.

Если батареи не устанавливаются в шкаф, т.е., в специальном помещении, необходимо принимать меры, указываемые в конце данного раздела.

**Примечание:** схема TN (вариант TN-S или TN-C) наиболее часто рекомендуется для электропитания компьютерных систем.

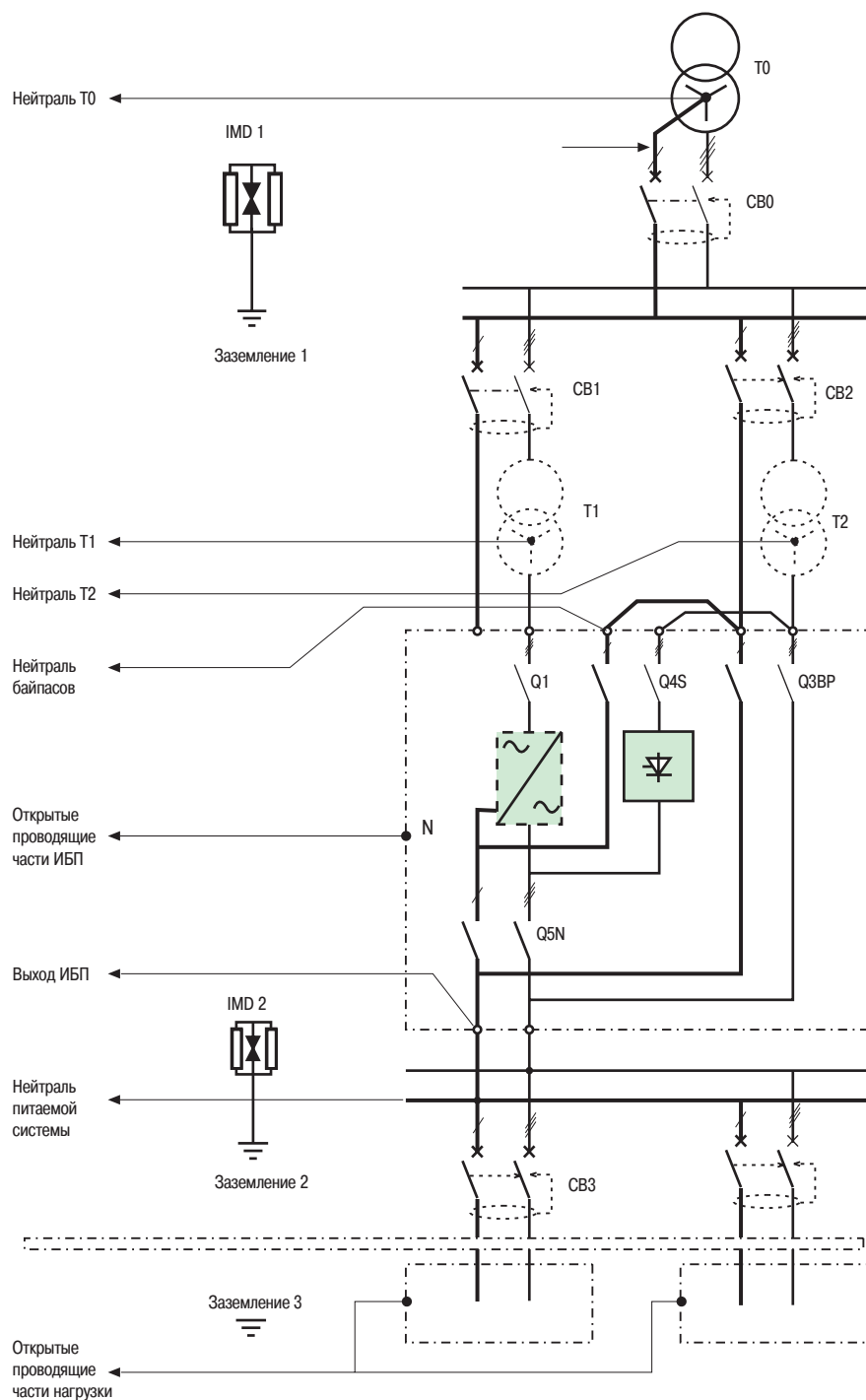
Тип схемы	Схема IT	Схема TT	Схема TN
Принцип работы	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Сигнализация первого повреждения изоляции</li><li>■ Обнаружение и устранение первого повреждения</li><li>■ Отключение при втором повреждении изоляции</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Отключение при первом повреждении изоляции</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Отключение при первом повреждении изоляции</li></ul>
Метод защиты людей	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Соединение и заземление проводящих частей</li><li>■ Контроль первого повреждения с помощью устройства контроля изоляции (УКИ)</li><li>■ Отключение при втором повреждении (выключатель или плавкий предохранитель)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Заземление проводящих частей и использование УЗО</li><li>■ Первое повреждение изоляции приводит к отключению при обнаружении токов утечки</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Обязательное соединение и заземление проводящих частей и нейтрали</li><li>■ Первое повреждение изоляции приводит к отключению при обнаружении тока повреждения (выключатель или плавкий предохранитель)</li></ul>
Преимущества и недостатки	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Решение, обеспечивающее максимальную бесперебойность электроснабжения (сигнализация первого замыкания)</li><li>■ Требуется квалифицированный персонал (обнаружение первого замыкания)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Простейшее решение по разработке и монтажу</li><li>■ Не требуется устройство контроля изоляции (УКИ)</li><li>■ Однако, каждое повреждение приводит к отключению цепи</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>■ Решение с низкой стоимостью монтажа</li><li>■ Трудоемкий расчет (расчет полного сопротивления петли фаза-ноль)</li><li>■ Требуется квалифицированный технический персонал</li><li>■ Высокие токи повреждения</li></ul>

Рис. N23: Основные характеристики схем заземления

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

### Основные точки контроля для источников ИБП

**Рис. N24** показывает все основные точки, которые должны быть соединены, а также устройства (трансформаторы, УЗО и т.д.), которые должны быть установлены, чтобы обеспечить соответствие установки стандартам по безопасности.



**Рис. N24:** Основные точки, которые должны быть соединены в схемах заземления

## 2.5 Выбор схем защиты

Автоматические выключатели играют основную роль в установке, но их значение часто оценивается только при авариях, которые случаются достаточно редко. Самый оптимальный выбор параметров ИБП и конфигурации системы может быть поставлен под угрозу неверным выбором всего лишь одного выключателя.

### Выбор выключателей

Рис. N25 показывает, как нужно выбирать выключатели.

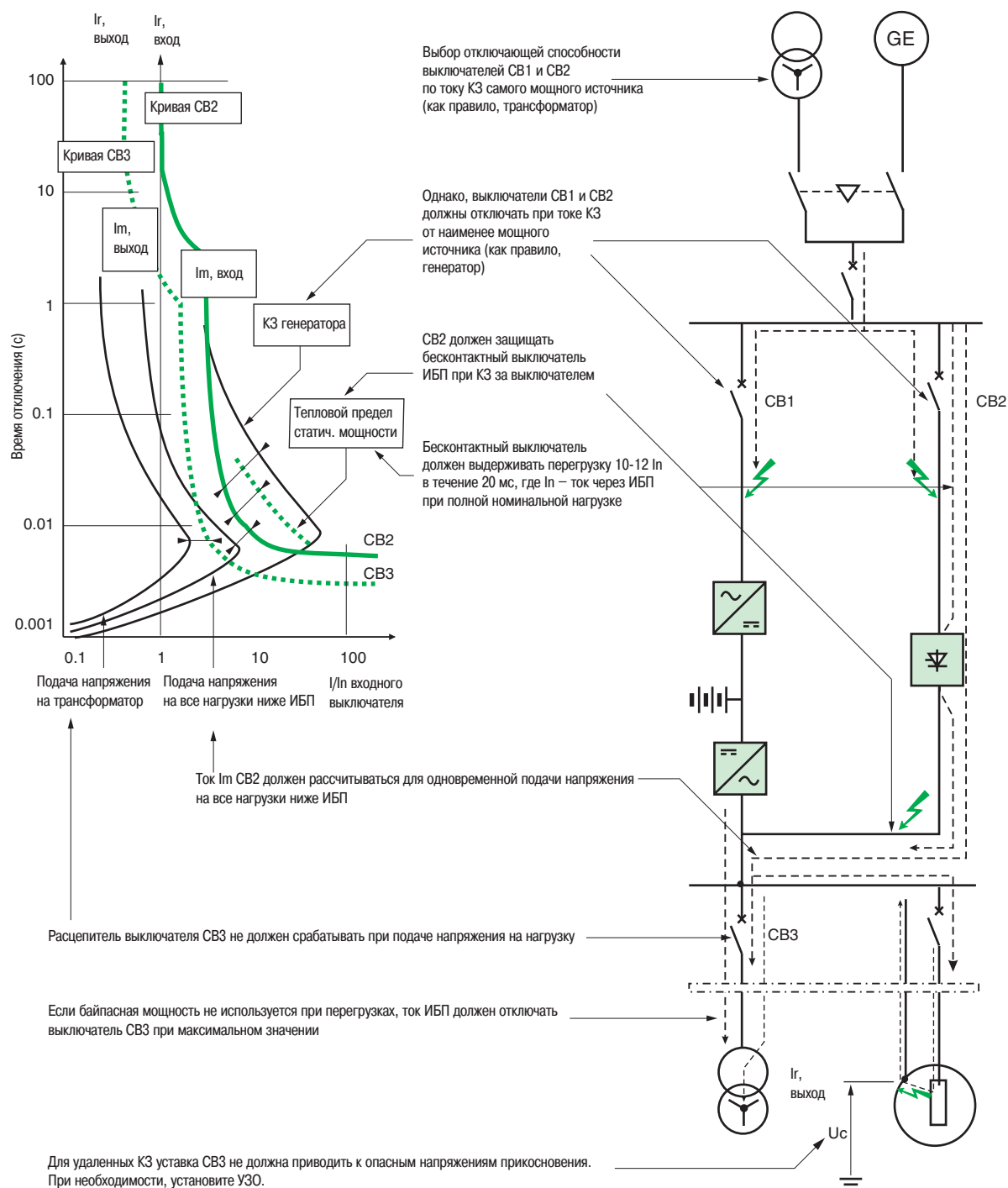


Рис. N25: Выключатели выбираются для различных ситуаций

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

### Номинальные значения

Номинальный ток выбранного выключателя должен быть выше номинального тока нагрузки.

### Отключающая способность

Отключающая способность должна выбираться немного больше тока КЗ, возможного в точке установки.

### Пороговые значения (уставки) $I_r$ и $I_m$

Таблица ниже показывает, как нужно выбирать пороговые значения (уставки)  $I_r$  (тепловая перегрузка) и  $I_m$  (мгновенное срабатывание при КЗ) для обеспечения селективности в вышестоящими и нижестоящими устройствами защиты.

Примечание (см. [рис. N26](#))

- Временная селективность должна обеспечиваться квалифицированным персоналом, поскольку выдержки времени перед отключением повышают термическое напряжение ( $I^2t$ ) на выходе (кабели, полупроводники и т.д.). Требуется осторожность, если выключатель CB2 отключается с использованием селективной токовой отсечки.
- Энергетическая селективность зависит не от расцепителей, а от выключателя.

Тип отходящей цепи	Отношение $I_r$ , $I_r$ на входе $I_r$ на выходе	Отношение $I_m$ , $I_m$ вход $I_m$ выход	Отношение $I_m$ , $I_m$ вход $I_m$ выход
Нижестоящий расцепитель	Все типы	Магнитный	Электронный
Распределенная нагрузка	$> 1.6$	$> 2$	$> 1.5$
Асинхронный двигатель	$> 3$	$> 2$	$> 1.5$

Рис. N26: Пороговые значения (уставки)  $I_r$  и  $I_m$  в зависимости от расцепителей на входе и выходе

### Особый случай КЗ генератора

Рис. N27 показывает реакцию генератора на КЗ.

Во избежание какой-либо неопределенности в отношении типа возбуждения отключение происходит при первом пике (3-5  $I_n$  в соответствии со значением  $X''d$ ) на основе уставки защиты  $I_m$  без выдержки времени.

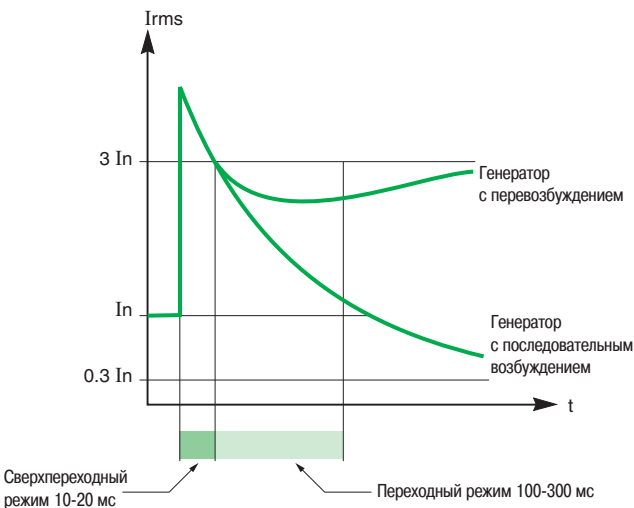


Рис. N27: Процессы в генераторе при КЗ

## 2.6 Установка, подсоединение и выбор кабелей

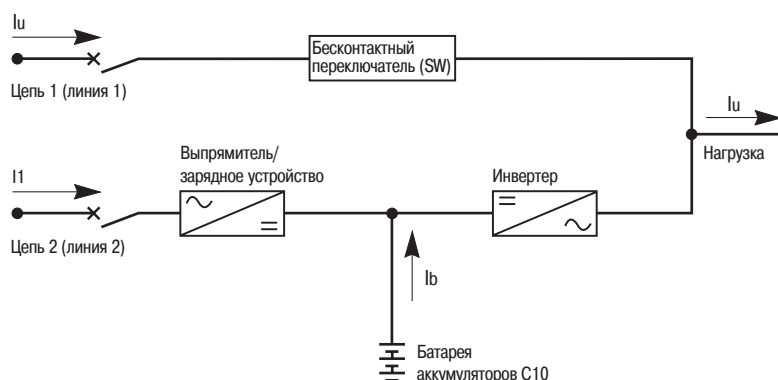
### Готовые к применению (комплектные) блоки ИБП

Источники ИБП малой мощности, предназначенные, например, для защиты компьютеров, являются компактными готовыми к применению устройствами. Внутренняя проводка выполняется на заводе с учетом характеристик устройств.

### Другие исполнения ИБП

Для других исполнений ИБП проводные соединения с системой электропитания, аккумуляторной батареей и нагрузкой не включаются в объем поставки.

Выбор кабелей определяется величиной тока в цепи, как показано на **рис. N28** ниже.



**Рис. N28:** Ток, учитываемый при выборе соединительных кабелей

### Расчет токов $I_1$ , $I_u$

- Входной ток  $I_u$  от электросети является током нагрузки.
- Входной ток  $I_1$  зарядного устройства/выпрямителя зависит от следующих параметров:
  - емкости батареи (C10) и режима зарядки ( $I_b$ );
  - характеристик зарядного устройства;
  - КПД инвертера.
- Ток  $I_b$  является током в точке подсоединения батареи.

Эти токи указываются изготовителями.

### Повышение температуры кабеля и потери напряжения

Сечение кабеля зависит от следующих параметров:

- допустимого повышения температуры;
- допустимой потери напряжения.

Для заданной нагрузки каждый из этих параметров приводит к минимально допустимому сечению, должно использоваться большее из двух значений.

При прокладке кабелей необходимо выдерживать требуемые расстояния между контрольными и силовыми цепями для предотвращения помех из-за высокочастотных токов.

### Повышение температуры

Допустимое повышение температуры в кабелях зависит от типа изоляции кабеля.

Повышение температуры в кабелях зависит от следующих факторов:

- материала жилы кабеля (медь или алюминий);
- метода монтажа;
- числа проложенных рядом (по одной трассе) кабелей.

Стандарты предусматривают максимальный допустимый ток для каждого типа кабеля.

### Потери напряжения

Максимальные допустимые потери напряжения:

- 3% для цепей переменного тока (50 или 60 Гц);
- 1% для цепей постоянного тока.

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

### Таблицы выбора

**Рис. N29** показывает потерю напряжения (в %) для цепи с длиной кабеля 100 м. Для расчета падения напряжения в цепи с длиной кабеля L необходимо умножить значение на L/100.

■ Sph: сечение проводников.

■ In: номинальный ток устройств защиты цепи.

### Трехфазная цепь

Если потеря напряжения превышает 3% (50-60 Гц), необходимо увеличить сечение проводников.

### Цепь постоянного тока

Если потеря напряжения превышает 1%, необходимо увеличить сечение проводников.

**a – трехфазные цепи (медные проводники)**

50/60 Гц – три фазы 380/400/415 В,  $\cos \varphi = 0.8$ , симметричная система, три фазы + N

In (A)	Sph (мм <sup>2</sup> )											
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
10	0.9											
15	1.2											
20	1.6	1.1										
25	2.0	1.3	0.9									
32	2.6	1.7	1.1									
40	3.3	2.1	1.4	1.0								
50	4.1	2.6	1.7	1.3	1.0							
63	5.1	3.3	2.2	1.6	1.2	0.9						
70	5.7	3.7	2.4	1.7	1.3	1.0	0.8					
80	6.5	4.2	2.7	2.1	1.5	1.2	0.9	0.7				
100	8.2	5.3	3.4	2.6	2.0	2.0	1.1	0.9	0.8			
125		6.6	4.3	3.2	2.4	2.4	1.4	1.1	1.0	0.8		
160			5.5	4.3	3.2	3.2	1.8	1.5	1.2	1.1	0.9	
200				5.3	3.9	3.9	2.2	1.8	1.6	1.3	1.2	0.9
250					4.9	4.9	2.8	2.3	1.9	1.7	1.4	1.2
320							3.5	2.9	2.5	2.1	1.9	1.5
400							4.4	3.6	3.1	2.7	2.3	1.9
500								4.5	3.9	3.4	2.9	2.4
600									4.9	4.2	3.6	3.0
800										5.3	4.4	3.8
1,000											6.5	4.7

Для трехфазной цепи 230 В умножить результат на  $\sqrt{3}$ .

Для однофазной цепи 208/230 В умножить результат на 2.

**b – Цепи постоянного тока (медные проводники)**

In (A)	Sph (мм <sup>2</sup> )											
	-	-	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
100			5.1	3.6	2.6	1.9	1.3	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4
125				4.5	3.2	2.3	1.6	1.3	1.0	0.8	0.6	0.5
160					4.0	2.9	2.2	1.6	1.2	1.1	0.6	0.7
200						3.6	2.7	2.2	1.6	1.3	1.0	0.8
250							3.3	2.7	2.2	1.7	1.3	1.0
320								3.4	2.7	2.1	1.6	1.3
400									3.4	2.8	2.1	1.6
500										3.4	2.6	2.1
600										4.3	3.3	2.7
800											4.2	3.4
1,000											5.3	4.2
1,250												5.3

**Рис. N29:** Потери напряжения в % для трехфазных цепей [a] и цепей постоянного тока [b]

### Особый случай нейтральных проводников

В трехфазных системах гармоники третьего порядка (и кратные им) однофазных нагрузок складываются в нейтральном проводнике (сумма токов в трех фазах).

По этой причине применяется следующее правило:

сечение нейтрали = 1,5 x сечение фазы.



**Пример**

Рассмотрим трехфазную цепь 400В, 70 м, с медными проводниками и номинальным током 600 А. Стандарт МЭК 364 указывает минимальное поперечное сечение в зависимости от метода монтажа и нагрузки.

Примем минимальное сечение равным 95 мм<sup>2</sup>.

Необходимо проверить, что потеря напряжения не превышает 3%.

Согласно таблице для трехфазных цепей, для тока 600А в кабеле 300 мм<sup>2</sup> потеря напряжения составляет 3% для 100 м кабеля, т.е. для 70 м:

$$3 \times \frac{70}{100} = 2.1 \%$$

Аналогичный расчет может быть сделан для постоянного тока 1000 А.

Падение напряжения на 100 м кабеля 240 мм<sup>2</sup> составляет 5,3%, т.е. для 10-метрового кабеля:

$$5.3 \times \frac{10}{100} = 0.53 \%$$

То есть, меньше 3%.

## 2.7 Дистанционное управление и мониторинг ИБП

Источники ИБП могут быть связаны с электрическими и компьютерными устройствами. Они могут получать определенные данные и поставлять информацию о своей работе для следующих целей:

- Оптимизация защиты

Например, ИБП поставляют важную информацию о рабочих параметрах для компьютерной системы (нагрузка на инвертере, нагрузка на статическом байпасе, нагрузка на батарею, предупреждающая сигнализация о разрядке батареи)

- Дистанционное управление

ИБП поставляет данные измерений и информацию о рабочем состоянии для принятия операторами соответствующих мер.

- Управление системой

Оператор имеет автоматизированную систему диспетчерского управления, которая позволяет получать и сохранять информацию от источников ИБП для обеспечения сигнализации о неисправностях и принятия мер.

Развитие в направлении интеграции компьютерного оборудования и ИБП привело к появлению новых встроенных функций дистанционного управления и мониторинга ИБП.

## 2.8 Дополнительное оборудование

### Трансформаторы

Двухобмоточный трансформатор, установленный в цепи 2, обеспечивает:

- изменение уровня напряжения, если сетевое напряжение отличается от допустимого диапазона изменений напряжения на входе нагрузки;
- возможность изменения системы заземления между сетями.

Более того, такой трансформатор обеспечивает:

- снижение уровня тока КЗ на вторичной обмотке (т.е. на стороне нагрузки) в сравнении с сетевой стороной;
- предотвращение поступления токовых гармонических составляющих третьего порядка, которые возможны на вторичной обмотке, в электросеть при соединенной треугольником первичной обмотке.

### Фильтр подавления гармоник

Блок ИБП включает зарядное устройство батареи с тиристорным или транзисторным управлением. Данное устройство генерирует гармонические составляющие тока в электросеть.

Такие нежелательные гармоники отфильтровываются на входе выпрямителя, и, в большинстве случаев, такое снижение уровня гармоник достаточно для всех практических целей. Однако, в особых случаях, особенно на крупных объектах, могут потребоваться дополнительные фильтры.

## 2 Источники бесперебойного питания (ИБП)

Например, в следующих случаях:

- Номинальная мощность ИБП велика по отношению к мощности трансформатора питающей сети.
- Низковольтные сборные шины питают нагрузки, особо чувствительные к гармоникам.
- Генератор с дизельным (или газотурбинным и т.д. приводом) установлен в качестве резервного источника питания.

В таких случаях следует обращаться к изготовителю ИБП за консультацией.

### Коммуникационное оборудование

Необходимость коммуникации с оборудованием компьютерных систем приводит к использованию соответствующих технических средств в ИБП. Такие средства могут встраиваться в исходную конструкцию (см. **рис. М30а**) или добавляться к существующим системам по запросу (см. **рис. М30б**).



**Рис. М30а:** Готовый к использованию блок ИБП (с дополнительным модулем связи)



**Рис. М30б:** Блок ИБП, повышающий надежность (готовность) и качество электропитания компьютерной системы

## 3 Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения

Как правило, такие трансформаторы имеют мощность в диапазоне от нескольких сот ВА до нескольких сот кВА и часто используются в следующих целях:

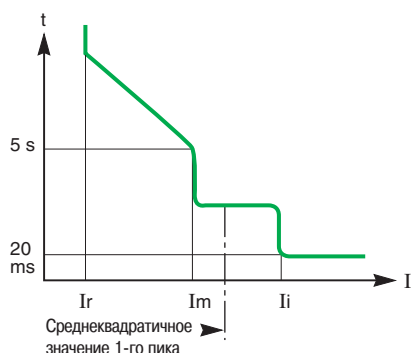
- Изменение уровня низкого напряжения для следующих цепей:
  - вспомогательное питание цепей управления и сигнализации;
  - осветительные цепи (подача 230 В при первичной трехфазной трехпроводной системе питания 400 В).
- Изменение системы заземления (уход от IT) для определенных нагрузок с относительно высоким емкостным током на землю (компьютерное оборудование) или активного тока утечки (электропечи, оборудование индукционного или диэлектрического нагрева, точки общепита и т.д.).

Как правило, трансформаторы низкого/низкого напряжения имеют встроенные системы защиты, и необходимо обращаться к изготовителям за подробной информацией. В любом случае, защита по максимальному току должна обеспечиваться на первичной обмотке. Эксплуатация таких трансформаторов требует знания их конкретных функций, а также информации, приводимой ниже.

**Примечание:** в случае изолирующих трансформаторов безопасности низкого/низкого напряжения при сверхнизком напряжении часто требуется заземленный металлический экран между первичной и вторичной обмотками в соответствии с местными условиями, как рекомендуется в Европейском стандарте EN 60742.

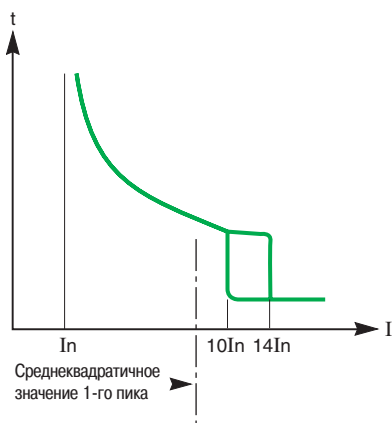
### 3.1 Ток намагничивания трансформатора при включении

В момент подачи напряжения на трансформатор отмечаются высокие значения переходного тока (который включает значительную составляющую постоянного тока), которые должны учитываться при рассмотрении схем защиты (см. **рис. N31**).

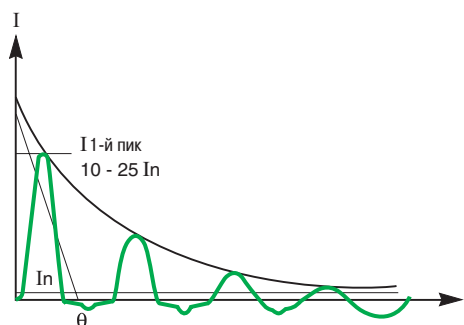


**Рис. N32:** Характеристика отключения выключателя Compact NS с электронным расцепителем STR

N24



**Рис. N33:** Характеристика отключения выключателя Multi 9, кривая D



**Рис. N31:** Ток намагничивания трансформатора при включении

Величина пика тока зависит от следующих параметров:

- величины напряжения в момент подачи напряжения;
- величины и полярности остаточного потока в сердечнике трансформатора;
- характеристики нагрузки, подключенной к трансформатору.

Первый пик тока может достигать значения в 10-15 раз больше номинального тока, а для трансформаторов малой мощности (< 50 кВА) — в 20-25 раз больше номинального тока. Такой переходный ток быстро уменьшается с постоянной времени затухания  $\theta$ , примерно от нескольких мс до нескольких десятков мс.

### 3.2 Защита цепей питания трансформатора низкого/низкого напряжения

Устройства защиты цепей питания трансформатора низкого/низкого напряжения должны предотвращать возможность ложного срабатывания из-за броска тока намагничивания, указанного выше. Поэтому необходимо использовать:

- селективные (т.е. с небольшой выдержкой времени) выключатели типа Compact NS STR (см. **рис. N32**);
- выключатели с крайне высокой уставкой магнитного расцепителя типа Compact NS или Multi 9, кривая D (см. **рис. N33**).

### 3 Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения

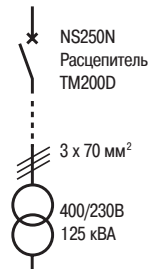


Рис. N34: Пример

#### Пример

Трехфазная цепь 400 В питает трансформатор 125 кВА 400/230 В ( $I_n = 190$  А), для которого первый бросок тока намагничивания может достигать  $17 I_n$ , т.е.  $17 \times 190 = 3230$  А.

Компактный выключатель NS 250N с уставкой  $I_r$  200 А подходит в качестве устройства защиты.

#### Отдельный случай: защита от перегрузки, установленная на вторичной обмотке трансформатора (см. рис. N34)

Преимущество установки защиты от перегрузки, на вторичной обмотке, состоит в том, что защита от КЗ на первичной обмотке может иметь большую уставку срабатывания, или, как альтернативный вариант, может использоваться выключатель типа МА. в то же время, уставка защиты от КЗ на первичной обмотке должна иметь достаточную чувствительность для обеспечения ее срабатывания в случае КЗ на вторичной обмотке трансформатора.

**Примечание:** защита первичной обмотки иногда обеспечивается посредством плавких предохранителей типа аМ. Это решение имеет два недостатка:

- плавкие предохранители должны быть рассчитаны на значительный ток (как минимум в 4 раза больше номинального тока трансформатора);
- для обеспечения отключения трансформатора от источника питания на стороне первичной обмотки вместе с предохранителями должен использоваться выключатель нагрузки или контактор.

### 3.3 Типовые электротехнические характеристики трансформаторов низкого/низкого напряжения, 50 Гц

#### Трехфазные трансформаторы

Ном. мощ. (кВА)	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
Потери холостого хода (Вт)	100	110	130	150	160	170	270	310	350	350	410	460	520	570	680	680	790	950	1160	1240	1485	1855	2160
Потери при полной нагрузке (Вт)	250	320	390	500	600	840	800	1180	1240	1530	1650	2150	2540	3700	3700	5900	5900	6500	7400	9300	9400	11400	13400
Напряжение КЗ (%)	4.5	4.5	4.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5	5	4.5	5	5	5.5	4.5	5.5	5	5	4.5	6	6	5.5	5.5

#### Однофазные трансформаторы

Ном. мощ. (кВА)	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160
Потери холостого хода (Вт)	105	115	120	140	150	175	200	215	265	305	450	450	525	635
Потери при полной нагрузке (Вт)	400	530	635	730	865	1065	1200	1400	1900	2000	2450	3950	3950	4335
Напряжение КЗ (%)	5	5	5	4.5	4.5	4.5	4	4	5	5	4.5	5.5	5	5

### 3.4 Защита трансформаторов низкого/низкого напряжения с помощью выключателей Merlin Gerin

#### Выключатель Multi 9

Номинальная мощность трансформатора (кВА)			Выключатель, кривая D или K	Ном. ток (А)
230/240 В, 1 фаза	230/240 В, 3 фазы	400/415 В, 3 фазы		
0.05	0.09	0.16	C60, NG125	0.5
0.11	0.18	0.32	C60, NG125	1
0.21	0.36	0.63	C60, NG125	2
0.33	0.58	1.0	C60, NG125	3
0.67	1.2	2.0	C60, NG125	6
1.1	1.8	3.2	C60, C120, NG125	10
1.7	2.9	5.0	C60, C120, NG125	16
2.1	3.6	6.3	C60, C120, NG125	20
2.7	4.6	8.0	C60, C120, NG125	25
3.3	5.8	10	C60, C120, NG125	32
4.2	7.2	13	C60, C120, NG125	40
5.3	9.2	16	C60, C120, NC100, NG125	50
6.7	12	20	C60, C120, NC100, NG125	63
8.3	14	25	C120, NC100, NG125	80
11	18	32	C120, NC100, NG125	100
13	23	40	C120, NG125	125

N25

### 3 Защита трансформаторов низкого/ низкого напряжения

Выключатели Compact NS100...NS250 с расцепителем TM-D

Номинальная мощность трансформатора (кВА)			Выключатель	Расцепитель
230/240 В, 1 фаза	230/240 В, 3 фазы 400/415 В, 1 фаза	400/415 В, 3 фазы		
3	5...6	9...12	NS100N/H/L	TM16D
5	8...9	14...16	NS100N/H/L	TM05D
7...9	13...16	22...28	NS100N/H/L	TM40D
12...15	20...25	35...44	NS100N/H/L	TM63D
16...19	26...32	45...56	NS100N/H/L	TM80D
18...23	32...40	55...69	NS160N/H/L	TM100D
23...29	40...50	69...87	NS160N/H/L	TM125D
29...37	51...64	89...111	NS250N/H/L	TM160D
37...46	64...80	111...139	NS250N/H/L	TM200D

Выключатели Compact NS100...NS1600 и Masterpact с расцепителем STR или Micrologic

Номинальная мощность трансформатора (кВА)			Выключатель	Расцепитель	Уставка Ir max
230/240 В, 1 фаза	230/240 В, 3 фазы 400/415 В, 1 фаза	400/415 В, 3 фазы			
4...7	6...13	11...22	NS100N/H/L	STR22SE 40	0.8
9...19	16...30	27...56	NS100N/H/L	STR22SE 100	0.8
15...30	5...50	44...90	NS160N/H/L	STR22SE 160	0.8
23...46	40...80	70...139	NS250N/H/L	STR22SE 250	0.8
37...65	64...112	111...195	NS400N/H	STR23SE / 53UE 400	0.7
37...55	64...95	111...166	NS400L	STR23SE / 53UE 400	0.6
58...83	100...144	175...250	NS630N/H/L	STR23SE / 53UE 630	0.6
58...150	100...250	175...436	NS800N/H - NT08H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
74...184	107...319	222...554	NS800N/H - NT08H1 - NW08N1/H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
90...230	159...398	277...693	NS1000N/H - NT10H1 - NW10N1/H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
115...288	200...498	346...866	NS1250N/H - NT12H1 - NW12N1/H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
147...368	256...640	443...1,108	NS1600N/H - NT16H1 - NW16N1/H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
184...460	320...800	554...1,385	NW20N1/H1	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
230...575	400...1,000	690...1,730	NW25N2/H3	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1
294...736	510...1,280	886...2,217	NW32N2/H3	Micrologic 5.0/6.0/7.0	1

## 4 Осветительные сети

На долю освещения - источника комфорта и производительности — приходится 15% количества электроэнергии, потребляемой в промышленности, и 40% - в зданиях. Качество освещения (устойчивость и непрерывность) зависит от качества электроэнергии, потребляемой для этой цели. Поэтому, подача электроэнергии в осветительные сети имеет большое значение.

Для помощи в разработке и облегчения выбора соответствующих средств защиты ниже приводится анализ различных технологий изготовления ламп. Обсуждаются отличительные характеристики осветительных цепей и их влияние на устройства управления и защиты. Приводятся рекомендации по сложным вариантам реализации осветительных сетей.

### 4.1 Различные технологии изготовления ламп

Электрическая энергия может быть использована для получения искусственного освещения двумя путями: тепловое излучение и электролюминесценция.

Тепловое излучение — излучение света посредством накаливания. Наиболее общим примером является нить, раскаленная до белого свечения посредством прохождения по ней электрического тока. Поступающая энергия преобразуется в джоулево тепло и световой поток.

Люминесценция — явление излучения материалом видимого света. Газы (или пары), под действием электрического разряда, излучают свет (электролюминесценция газов).

Поскольку газ не проводит ток при нормальной температуре и давлении, разряд вызывается генерируемыми заряженными частицами, которые ионизируют газ. Состав, давление и температура газа определяют спектр видимого излучения.

Фотолюминесценция представляет собой люминесценцию материала, подвергаемого воздействию излучения видимого или почти видимого спектра (ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучения).

Явление, когда вещество поглощает УФ-излучение и испускает видимое излучение, называется флуоресценцией.

#### Лампы накаливания

Лампы накаливания стали использоваться раньше других средств освещения и нашли самое широкое распространение в наши дни.

Они основаны на принципе накаливания нити в вакууме или нейтральной среде, предотвращающей перегорание нити накаливания.

Различаются два типа ламп:

##### ■ Стандартные лампы

Содержат вольфрамовую нить и заполнены инертным газом (азот и аргон или криптон).

##### ■ Галогенные лампы

Также содержат вольфрамовую нить, но заполнены галогенным составом и инертным газом (криптон или ксенон). Галогенный состав обеспечивает восстановление нити, что повышает срок службы ламп и предотвращает их почернение. Кроме того, он обеспечивает повышенную температуру нити и, как следствие, повышенную светимость в лампах малого размера.

Основные недостатки ламп накаливания состоят в значительном тепловыделении, что определяет их низкую световую эффективность.

#### Флуоресцентные лампы

Сюда включаются флуоресцентные трубки и компактные флуоресцентные лампы. Они известны как «ртутные лампы низкого давления».

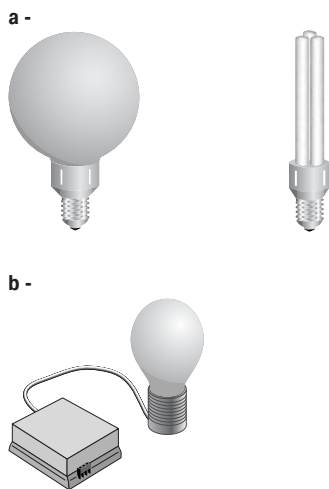
Во флуоресцентных трубках электрический разряд вызывает столкновение электронов с ионами паров ртути, приводя к ультрафиолетовому излучению в результате активации атомов ртути. Флуоресцентный материал, которым покрыта внутренняя поверхность трубок, преобразует это излучение в видимый свет.

Флуоресцентные трубки выделяют меньше тепла и служат дольше, чем лампы накаливания, но для них требуется устройство зажигания, называемое «стартером», и устройство ограничения тока в дуге после зажигания. Последнее устройство, называемое «балластным сопротивлением», обычно представляет собой дроссель, расположенный последовательно с дугой.

Компактные флуоресцентные лампы основаны на том же принципе, что и флуоресцентные трубки. Функции стартера и балластного сопротивления обеспечиваются электронной цепью (встроенной в лампу), что позволяет использовать загнутые трубки.

Компактные флуоресцентные лампы (см. **рис. N35**) разработаны для замены ламп накаливания. Они обеспечивают значительную экономию электроэнергии (15 Вт вместо 75 Вт при одинаковом уровне яркости) и имеют повышенный срок службы.

Лампы, известные как «индукционные» или «безэлектродные», работают по принципу ионизации газа в трубке посредством электромагнитного поля очень высокой частоты (вплоть до 1 ГГц). Их ресурс может составлять 100000 часов.



**Рис. N35:** Компактные лампы дневного света: [а] стандартные и [б] высокочастотные газоразрядные («индукционные»)

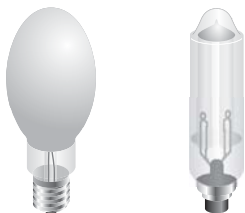


Рис. N36: Газоразрядные лампы

**Газоразрядные лампы (см. рис. N36)**

Свет излучается посредством электрического разряда между электродами в газовой среде кварцевой колбы лампы. Все такие лампы требуют балластного сопротивления для ограничения тока в дуге. Разработан ряд технологий для различных областей применения.

Натриевые лампы низкого давления

Имеют наилучшую светототдачу, но при крайне низкой цветопередаче, поскольку обеспечивают только монохроматическое оранжевое излучение.

Натриевые лампы высокого давления излучают белый свет с оранжевым оттенком.

В ртутных лампах высокого давления разряд происходит в кварцевой или керамической колбе при высоких давлениях. Такие лампы называются «флуоресцентными ртутными разрядными лампами». Они излучают характерный голубовато-белый свет.

Лампы с галогидными соединениями металлов представляют последнюю технологию. Они обеспечивают широкий спектр цветов. Использование керамических трубок обеспечивает повышенную световую эффективность и лучшую цветостойкость.

**Светоизлучающие диоды (LED)**

Принцип работы светодиодов состоит в излучении света полупроводником при прохождении через него электрического тока. Светодиоды находят широкое применение в многочисленных областях. Недавняя разработка белых или голубых диодов с высокой светототдачей открывает новые перспективы, особенно для сигнализации (уличные светофоры, указатели выхода или аварийное освещение).

Светодиоды являются устройствами низкого напряжения и тока и пригодны для аккумуляторного питания. Требуется выпрямитель для питания.

Преимущество светодиодов состоит в низком энергопотреблении. Как результат, они работают при очень низкой температуре, что обеспечивает их длительный срок службы. Однако стандартный светодиод имеет низкую яркость. Поэтому, для осветительной электроустановки высокой мощности требуется большое количество единиц, соединенных последовательно и параллельно.

Технология	Применение	Преимущества	Недостатки
Стандартная лампа накаливания	- Бытовое освещение - Локальное декоративное освещение (иллюминация)	- Прямое подсоединение без промеж. распределительных устройств - Разумная цена - Компактность - Мгновенное освещение - Хорошая цветопередача	- Низкая светототдача и высокое энергопотребление - Значительное тепловыделение - Короткий срок службы
Галогенная лампа накаливания	- Подсветка - Интенсивное освещение	- Прямое подсоединение - Эффективность - Превосходная цветопередача	- Средняя светототдача
Флуоресцентная трубка	- Цеха, офисы, мастерские - Наружное освещение	- Высокая светототдача - Средняя цветопередача	- Низкая яркость одной единицы - Чувствительность к низким температурам
Компактная флуоресцентная лампа	- Бытовое освещение - Офисы - Замена ламп накаливания	- Хорошая светототдача - Хорошая цветопередача	- Высокая стоимость в сравнении с лампами накаливания
Ртутная высокого давления	- Мастерские, залы, ангары - Заводские цеха	- Хорошая светототдача - Приемлемая цветопередача - Компактность - Долгий срок службы	- Время включения освещения порядка нескольких минут
Натриевая, высокого давления	- Наружное освещение - Большие залы	- Очень хорошая светототдача	- Время включения освещения порядка нескольких минут
Натриевая низкого давления	- Наружное освещение - Аварийное освещение	- Хорошая видимость в туман - Экономичность в использовании	- Длительное время включения освещения (5 мин) - Низкая цветопередача
С галогидными соединениями металлов	- Большие участки - Залы с высокими потолками	- Хорошая светототдача - Хорошая цветопередача - Долгий срок службы	- Время включения освещения порядка нескольких минут
Светодиод	- Сигнализация (трехцветные светофоры, указатели выхода и аварийное освещение)	- Нечувствительность к циклам включения-отключения - Низкое энергопотребление - Низкая температура	- Ограниченное число цветов - Низкая яркость единицы

Технология	Мощность (Вт)	КПД (люмен/Вт)	Ресурс (час)
Стандартная лампа накаливания	3 – 1000	10 – 15	1000 – 2000
Галогенная лампа накаливания	5 – 500	15 – 25	2000 – 4000
Флуоресцентная трубка	4 – 56	50 – 100	7500 – 24000
Компактная флуоресцентная лампа	5 – 40	50 – 80	10000 – 20000
Ртутная высокого давления	40 – 1000	25 – 55	16000 – 24000
Натриевая высокого давления	35 – 1000	40 – 140	16000 – 24000
Натриевая низкого давления	35 – 180	100 – 185	14000 – 18000
С галогидными соединениями металлов	30 – 2000	50 – 115	6000 – 20000
Светодиод	0,05 – 0,1	10 – 30	40000 – 100000

Рис. N37: Сравнительные характеристики осветительных устройств



## 4.2 Электротехнические характеристики ламп

### Лампы накаливания с прямым электропитанием

В силу крайне высокой рабочей температуры нити (до 2500°C) ее сопротивление значительно зависит от того, включена лампа или нет. Поскольку сопротивление в холодном состоянии низкое, пик тока приходится на зажигание и может в 10-15 раз превышать номинальный ток в течение доли миллисекунды или даже нескольких миллисекунд.

Это ограничение сказывается на применении стандартных и галогенных ламп: оно налагает требование по снижению максимального числа ламп, которые могут питаться через такие устройства, как импульсное реле, модульные контакторы и реле сборных шин.

### Галогенные лампы сверхнизкого напряжения (ELV)

■ Некоторые галогенные лампы низкой мощности работают при питании от сверхнизкого напряжения 12 или 24 В через трансформатор или электронный преобразователь. При питании через трансформатор явление намагничивания усиливается изменением сопротивления нити при включении. Ток при включении может в 50-75 раз превышать номинальный в течение нескольких миллисекунд. Использование светорегулятора (диммера), установленного перед лампой, позволяет значительно снизить это ограничение.

■ Электронные преобразователи представляют значительно более дорогостоящее решение в сравнении с трансформатором при одинаковой номинальной мощности. Такой экономический недостаток может компенсироваться за счет удобства монтажа, поскольку их низкое тепловыделение означает возможность крепления на огнеопасной опоре. Более того, они, как правило, имеют встроенную тепловую защиту.

В настоящее время поставляются галогенные лампы сверхнизкого напряжения с трансформатором, встроенным в их цоколь. Они могут получать питание непосредственно через низковольтную линию и могут заменять стандартные лампы без каких-либо специальных приспособлений.

### Регулирование силы света ламп накаливания

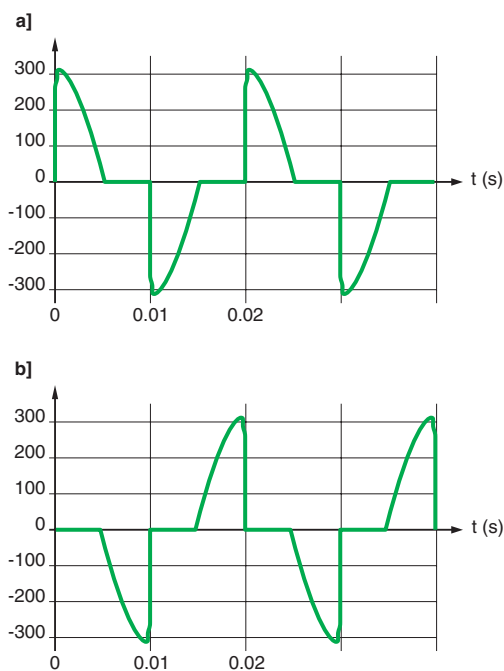
Такое регулирование может осуществляться путем изменения напряжения, подаваемого на лампу.

Напряжение обычно изменяется специальным устройством, таким как диммер, путем изменения угла отпираания в период сетевого напряжения. Форма волны напряжения, подаваемого на лампу, показана на **рис. N38a**. Такой метод, известный как «управление отпираанием», может использоваться для питания цепей с активным сопротивлением или индуктивных цепей. Другой метод, пригодный для питания емкостных цепей, разработан с использованием электронных компонентов MOS и IGBT. При этом методе изменяется напряжение путем блокировки тока до завершения полупериода (см. **рис. M38b**). Этот метод известен как «управление запираанием».

Постепенное включение лампы может также снижать (или даже устранять) пик тока при зажигании.

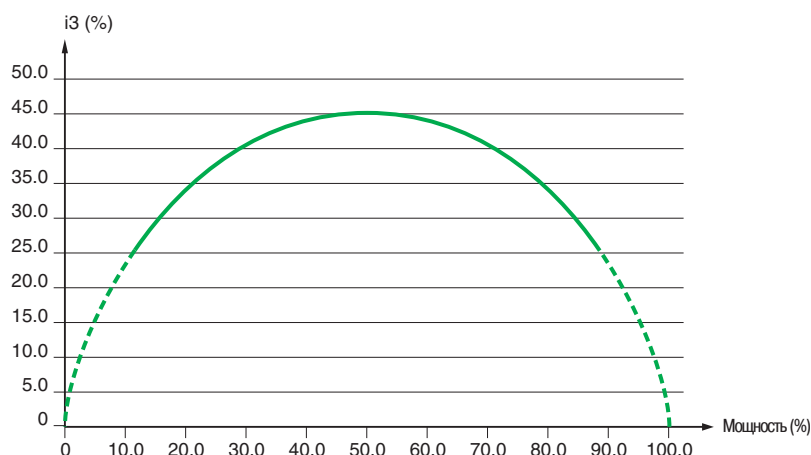
Поскольку ток искажается электронным светорегулятором, генерируются гармонические токи. Преобладают гармоники третьего порядка. Процент токовых гармонических составляющих третьего порядка относительно максимального основного тока (при максимальной мощности) показан на **рис. N39**.

Следует отметить, что на практике мощность, подаваемая на лампу через электронный светорегулятор, может изменяться только в диапазоне 15-85% максимальной мощности лампы.



**Рис. N38:** Форма волны напряжения, подаваемого через электронный светорегулятор, при 50% максимального напряжения при использовании следующих методов:

a) «управление отпираанием»;  
b) «управление запираанием»



**Рис. N39:** Процент токовых гармонических составляющих третьего порядка, как функция мощности, подаваемой на лампу накаливания через электронный светорегулятор



Согласно стандарту МЭК 61000-3-2, устанавливающему предельное содержание гармоник для электрических или электронных систем при токе  $\leq 16\text{ A}$ , применяются следующие правила:

- Автономные электронные светорегуляторы для ламп накаливания с номинальной мощностью не более 1 кВт не ограничиваются по содержанию гармоник.
- Для других случаев и осветительного оборудования с использованием ламп накаливания со встроенным электронным светорегулятором, максимальный допустимый гармонический ток (гармоники третьего порядка) составляет 2,30 А.

Флуоресцентные лампы с магнитным балластным сопротивлением

Флуоресцентные трубки и газоразрядные лампы требуют ограничения интенсивности дуги. Такое ограничение выполняется дросселем (или магнитным балластным сопротивлением), включенным последовательно с лампой (см. рис. N40).

Такая схема наиболее часто используется в жилых помещениях с ограниченным числом ламп. Не накладывается особых ограничений на выключатели.

Электронные светорегуляторы несовместимы с магнитными балластными сопротивлениями: отсутствие напряжения прерывает разряд и приводит к полному выключению лампы.

Стартер выполняет двойную функцию: предварительный нагрев электродов трубки и последующее генерирование повышенного напряжения для зажигания трубки. Такое повышенное напряжение создается путем размыкания контакта (управляемого тепловым выключателем), что прерывает циркуляцию тока в магнитном балластном сопротивлении.

В течение работы стартера (прибл. 1 с) ток, потребляемый светильником, приблизительно в два раза превышает номинальный ток.

Поскольку ток, потребляемый трубкой с балластным сопротивлением, является преимущественно индуктивным, коэффициент мощности низкий (в среднем 0,4-0,5). В системах, включающих большое количество ламп, необходимо обеспечивать компенсацию для повышения коэффициента мощности.

Для крупных осветительных электроустановок централизованная компенсация с помощью конденсаторов является возможным решением, но более часто такая компенсация осуществляется на уровне каждого светильника в рамках ряда различных схем (см. рис. N41).

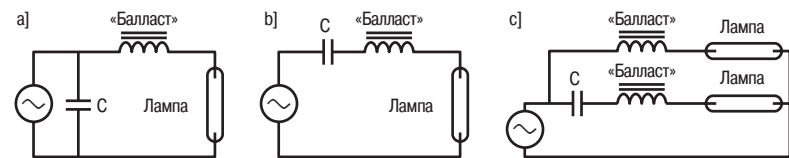


Схема компенсации	Применение	Примечания
Без компенсации	Жилые помещения	Единственное подсоединение
Параллельная [a]	Офисы, мастерские, универсамы	Риск больших токов для устройств управления
Последовательная [b]		Выбор конденсаторов с высоким рабочим напряжением (450-480В)
Двойная последоват. [c]		Подавление эффекта мерцания

Рис. N41: Различные схемы компенсации: а) параллельная; б) последовательная; в) двойная последовательная компенсация

Параметры компенсационных конденсаторов выбираются для обеспечения общего коэффициента мощности не выше 0,85. В большинстве случаев параллельной компенсации их средняя емкость составляет 1 мкФ для активной мощности 10 Вт для ламп любого типа. Однако, такая компенсация несовместима с электронными светорегуляторами.

Ограничения, влияющие на компенсацию

Схема параллельной компенсации налагает ограничения на зажигание лампы. Поскольку конденсатор изначально разряжен, включение приводит к повышенному потреблению тока. Кроме того, возникают перенапряжения из-за колебаний в цепи, включающей конденсатор и индуктивность.

Следующий пример может использоваться для определения порядка величин.

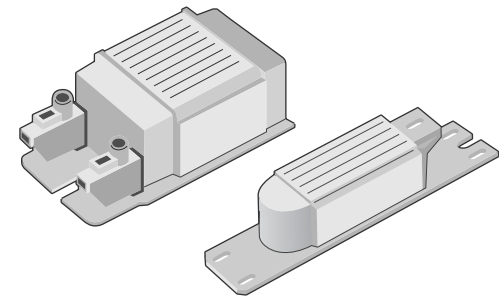


Рис. N40: Балластный дроссель

N30

Рассмотрим блок из 50 флуоресцентных ламп на 36 Вт каждая:

- общая активная мощность: 1800 Вт;
- полная мощность: 2 кВА;
- общий среднеквадратичный ток: 9А;
- пиковый ток: 13А.

Конденсаторная батарея:

- Общей емкостью:  $C = 175 \text{ мкФ}$ .
- Входной индуктивностью (соответствующей току КЗ 5 кА):  $L = 150 \text{ мкН}$ .

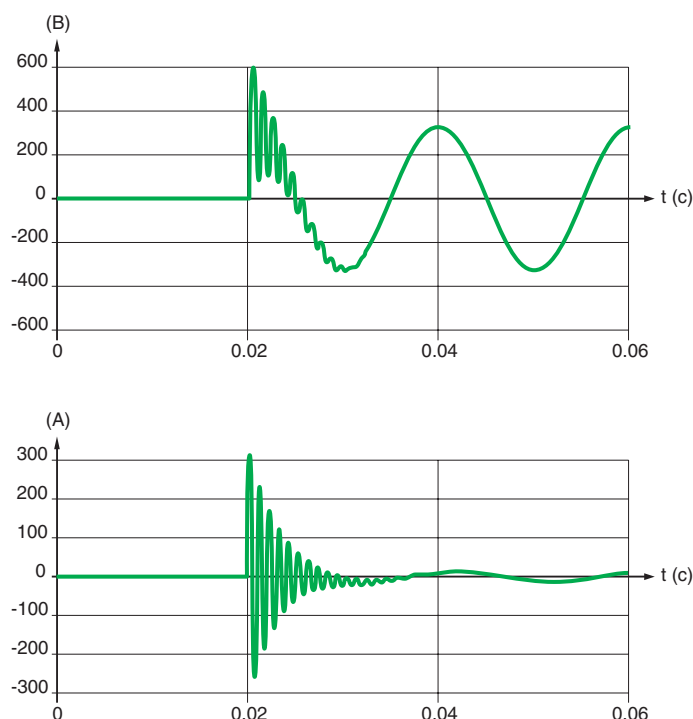
Максимальный пиковый ток при включении:

$$I_c = V_{\max} \sqrt{\frac{C}{L}} = 230 \sqrt{2} \sqrt{\frac{175 \times 10^{-6}}{150 \times 10^{-6}}} = 350 \text{ А}$$

Следовательно, теоретический пиковый ток при включении в 27 раз больше пикового тока при нормальном режиме работы.

Форма волны напряжения и тока при зажигании приводится на **рис. N42** в предположении включения в момент максимума напряжения сетевого питания.

Следовательно, существует риск приваривания контактов в электромеханических устройствах управления (импульсное реле, контактор, выключатель) или выхода из строя полупроводниковых переключателей.



**Рис. N42:** Напряжение питания и потребляемый ток при включении

На самом деле, ограничения обычно носят менее строгий характер, учитывая полное сопротивление кабелей.

Зажигание флуоресцентных трубок в группах накладывает одно дополнительное ограничение. При уже включенной группе трубок, компенсационные конденсаторы, находящиеся в этих трубках под напряжением, участвуют в токе включения в момент зажигания второй группы трубок: они «усиливают» пик тока в выключателе в момент зажигания второй группы трубок.

Таблица на **рис. N43**, основанная на результатах измерений, указывает величину первого пика тока для различных значений ожидаемого тока  $K3 I_{sc}$ . Как видно из таблицы, пик тока может умножаться на 2 или 3 в зависимости от числа ламп, работающих на момент подключения последней группы ламп.

Число используемых ламп	Число подключаемых ламп	Пик тока включения (А)		
		$I_{sc} = 1500 \text{ A}$	$I_{sc} = 3000 \text{ A}$	$I_{sc} = 6000 \text{ A}$
0	14	233	250	320
14	14	558	556	575
28	14	608	607	624
42	14	618	616	632

**Рис. N43:** Величина пика тока выключателя на момент зажигания второй группы ламп

Рекомендуется последовательное зажигание каждой группы ламп для снижения пика тока в главном выключателе.

Магнитные балластные сопротивления последней разработки характеризуются низкими потерями. Магнитная цепь оптимизирована, но принцип работы остается прежним. Это новое поколение балластных сопротивлений находит широкое применение под влиянием новых норм (Европейская директива, Закон об энергетической политике США).

**Флуоресцентные лампы с электронным балластным сопротивлением**

Электронные балластные сопротивления используются в качестве замены магнитных балластных сопротивлений для питания флуоресцентных трубок (включая компактные флуоресцентные лампы) и газоразрядных ламп. Они также обеспечивают функцию «стартера» и не требуют каких-либо средств компенсации.

Принцип работы электронных балластных сопротивлений (см. **рис. N44**) заключается в питании дуги лампы через электронное устройство, которое генерирует напряжение переменного тока прямоугольной формы при частоте 20-60 кГц.

Подвод на дугу высокочастотного напряжения полностью устраняет явление мерцания и стробоскопические эффекты. Электронное балластное сопротивление работает бесшумно.

В течение периода предварительного нагрева газоразрядной лампы балластное сопротивление обеспечивает повышение напряжения на лампе, создавая тем самым неизменный по величине ток. В установившемся режиме оно регулирует напряжение, подаваемое на лампу, независимо от каких-либо колебаний сетевого напряжения.

Оптимальный режим напряжения дуги обеспечивает экономию электроэнергии (5-10%) и повышение срока службы лампы. Более того, кпд электронного балластного сопротивления может превышать 93%, тогда как средний кпд магнитных устройств – 85%.

Коэффициент мощности – высокий ( $> 0,9$ ).

Электронное балластное сопротивление используется также для обеспечения функции регулирования силы света. Изменение частоты фактически изменяет величину тока в дуге и, следовательно, силу света.

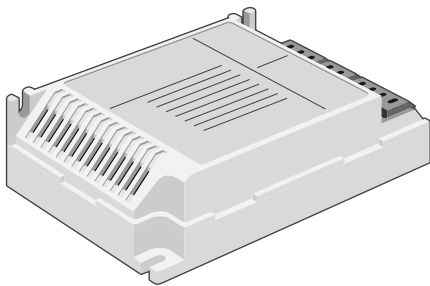
**Ток включения**

Основное ограничение, накладываемое электронными балластными сопротивлениями на сетевое электропитание, заключается в высоком токе включения, связанным с начальной нагрузкой сглаживающих конденсаторов (см. **рис. N45**).

Технология	Макс. ток включения	Длительность
Выпрямитель с конденсатором компенсации реактивной мощности (PFC)	30 - 100 In	$\leq 1 \text{ мс}$
Выпрямитель с дросселем	10 - 30 In	$\leq 5 \text{ мс}$
Магнитный «балласт»	$\leq 13 \text{ In}$	5 - 10 мс

**Рис. N45:** Порядок величины максимальных значений тока включения в зависимости от используемой технологии

N32

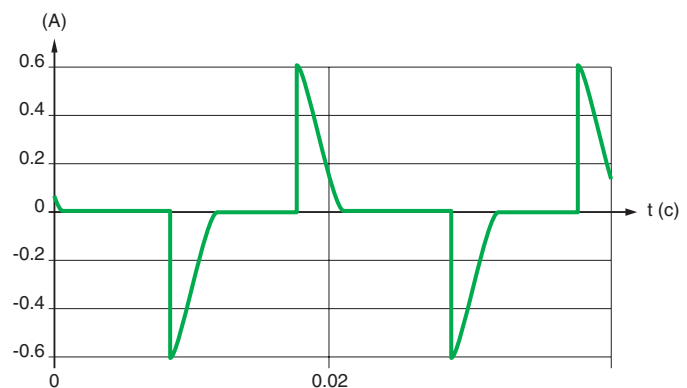


**Рис. N44:** Электронный «балласт»

На самом деле, учитывая полное сопротивление кабелей, токи включения для блока ламп намного ниже, чем приведенные значения, порядка 5-10 In в течение менее 5 мс. В отличие от магнитных балластных сопротивлений, такой ток включения не сопровождается перенапряжением.

### Гармонические токи

Для балластных сопротивлений, разрядных ламп высокой мощности, ток, потребляемый из сети, имеет меньшее общее гармоническое искажение ( $< 20\%$  в общем случае и  $< 10\%$  для самых сложных устройств). И наоборот, устройства, связанные с лампами малой мощности, в частности, компактными флуоресцентными лампами, потребляют ток с высокой степенью искажения (см. **рис. N46**). Общее гармоническое искажение может достигать 150%. В таких условиях действующее значение тока, потребляемого из сети, в 1,8 раз превышает ток, соответствующий активной мощности лампы, что равнозначно коэффициенту мощности 0,55.



**Рис. N46:** Форма волны тока, потребляемого компактной флуоресцентной лампой

Для равномерного распределения нагрузки между фазами, осветительные цепи обычно подключаются между каждой из фаз и нейтралью с обеспечением симметричности. В таких условиях высокий уровень третьей гармоники и гармоник, кратных 3, может приводить к перегрузке нейтрального проводника. В наименее благоприятной ситуации ток нейтрали может в  $\sqrt{3}$  раза превышать ток в каждой фазе.

Предельные значения гармоник для электрических и электронных систем устанавливаются стандартом МЭК 61000-3-2. Для упрощения предельные значения для осветительного оборудования приводятся здесь только для гармоник третьего и пятого порядка, наиболее значимых в нашем случае (см. **рис. N47**).

Порядок гармоники	Активная входная мощность $> 25$ Вт	Активная входная мощность $\leq 25$ Вт применяется одно из 2 предельных значений	
	% от основной (первой) гармоники тока	% от основной (первой) гармоники тока	Гармонический ток относительно активной мощности
3	30	86	3.4 мА/Вт
5	10	61	1.9 мА/Вт

**Рис. N47:** Максимальный допустимый гармонический ток

### Токи утечки

Электронные балластные сопротивления обычно обеспечиваются конденсаторами, установленными между питающими проводниками и землей. Этим обусловлено наличие постоянно циркулирующего тока утечки порядка 0,5-1 мА на балластное сопротивление. Как следствие, это ограничивает число балластных сопротивлений, которые могут питаться через устройство дифференциальной защиты нулевой последовательности (УЗО).

При включении таких конденсаторов могут возникнуть пики тока, величина которых может достигать нескольких ампер в течение 10 мкс. Такой пиковый ток может приводить к ошибочному отключению устройств.

Высокочастотные помехи

Электронные балластные сопротивления являются источниками высокочастотных кондуктивных и электромагнитных помех. Очень крутой фронт напряжения на выходе электронного балласта вызывает появление импульсов тока в паразитных емкостях на землю. В результате паразитные токи циркулируют в заземляющих и питающих проводниках. В силу высокой частоты таких токов возникает также электромагнитное излучение. Для ограничения таких высокочастотных помех лампа должна устанавливаться в непосредственной близости от балластного сопротивления для уменьшения длины наиболее интенсивно-излучающих проводников.

Различные режимы электропитания (см. рис. N48)

Технология	Режим электропитания	Другие устройства
Стандартная лампа накаливания	Непосредственное электропитание	Электронный светорегулятор (диммер)
Галогенная лампа накаливания		
Галогенная лампа накаливания сверхнизкого напряжения	Трансформатор	Электронный преобразователь
Флуоресцентная трубка	Магнитное балластное сопротивление и стартер	Электронное балластное сопротивление Электронный светорегулятор (диммер) + балластное сопротивл.
Компактная флуоресцентная лампа	Встроенное электронное балластное сопротивление	
Ртутная лампа	Магнитное балластное сопротивление	Электронное балластное сопротивление
Натриевая высокого давления		
Натриевая низкого давления		
С галогидными соединениями металлов		

Рис. N48: Различные режимы электропитания

4.3 Ограничения, связанные с осветительными установками, и рекомендации

Ток, фактически потребляемый осветительными установками

Риск перегрузки

Этот параметр должен определяться, в первую очередь, при разработке установки, иначе высока вероятность того, что будут срабатывать устройства защиты от перегрузки и пользователи будут часто оказываться в темноте. Очевидно, что такое определение должно проводиться с учетом потребления тока всеми компонентами, особенно системами люминесцентного освещения, поскольку мощность, потребляемая балластными сопротивлениями (дресселями стартеров), должна добавляться к мощности, потребляемой лампами.

Решение

Для освещения лампами накаливания следует учитывать, что напряжение в сети может отличаться более, чем на 10% от номинального значения, приводя к увеличению потребляемого тока. Для люминесцентного освещения, если не указывается иное значение, мощность магнитных дросселей может оцениваться в 25% мощности ламп. Для электронных дросселей стартеров эта мощность меньше на 5-10%. Поэтому, уставки устройств защиты от перегрузки должны рассчитываться в зависимости от общей мощности с учетом коэффициента мощности, рассчитанного для каждой цепи.

Сверхтоки при включении

Риск

Устройства, используемые для коммутации, регулирования и защиты осветительных цепей, включают реле, тиристоры, выключатели с дистанционным управлением, контакторы или выключатели. Основное ограничение, накладываемое на эти устройства, - пиковый ток при включении. Такой пиковый ток зависит от технологии используемых ламп, а также от характеристик установки (мощность силового трансформатора, длина кабелей, число ламп) и времени включения. Независимо от длительности, высокий пиковый ток может приводить к свариванию контактов на электромеханическом устройстве управления или повреждению полупроводникового устройства.

### Два решения

Из-за броска тока при включении большинство традиционных реле не могут нормально работать в цепях питания осветительных приборов. Поэтому, следует соблюдать следующие рекомендации:

- Ограничивать число ламп, подсоединяемых к одному устройству, чтобы их мощность не превышала максимальную допустимую мощность устройства.
- Проверять эксплуатационные ограничения, установленные изготовителями для устройств. Такая проверка особо значима при замене ламп накаливания компактными люминесцентными лампами.

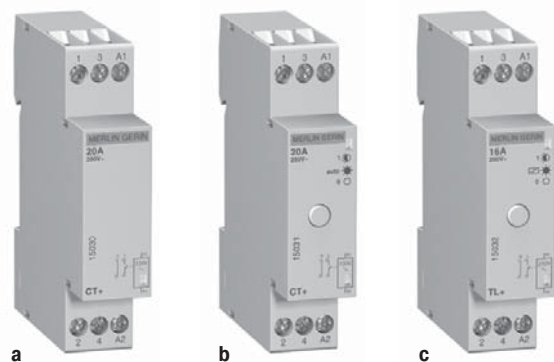
В качестве примера в Таблице ниже (**Рис. N49**) указывается максимальное число скомпенсированных люминесцентных ламп, которые могут коммутироваться разными аппаратами с номинальным током 16А. Следует отметить, что число коммутируемых ламп намного меньше числа, соответствующего максимальной мощности устройств.

Потр. мощность ламп (Вт)	Число ламп с учетом мощности 16 А x 230 В	Макс. число ламп, которые могут коммутировать		
		Контакторы GC16 А CT16 А	Выключатели с дистанц. управлением TL16 А	Автом. выключатели C60-16 А
18	204	15	50	112
36	102	15	25	56
58	63	10	16	34

**Рис. N49** : Число коммутируемых ламп намного меньше числа, соответствующего максимальной мощности устройств

Однако, существует метод ограничения пикового тока при включении цепей с емкостными характеристиками (магнитные балластные сопротивления с параллельной компенсацией и электронные балластные сопротивления). Этот метод состоит в обеспечении включения в момент, когда сетевое напряжение проходит через нуль. Только полупроводниковые выключатели обеспечивают такую возможность (см. **Рис. N50a**). Этот метод показал свою полезность при разработке новых осветительных установок.

Недавно разработаны гибридные устройства, которые объединяют полупроводниковый выключатель (включение при прохождении напряжения через нуль) и электромеханический контактор, шунтирующий полупроводниковый выключатель для снижения потерь в полупроводниках (см. **Рис. N50b**).



**Рис. N50** : «Standard» CT+ контактор [a], CT+ контактор с ручной блокировкой, кнопкой для выбора режима работы и лампой индикации активного рабочего режима [b], и TL+ выключатель с дистанционным управлением (импульсное реле) [c] (Merlin Gerin)

N35

Модульные контакторы и импульсные реле основаны на разных технологиях. Их номинальные параметры определяются по разным стандартам. Например, при заданной номинальной мощности импульсное реле более эффективно, чем модульный контактор, для коммутации осветительных ЭП с большим броском тока при включении или с низким коэффициентом мощности (индуктивная цепь без компенсации).

### Выбор номинальной мощности реле в зависимости от типа лампы

■ **Рис. 51** ниже показывает максимальное число осветительных приборов для каждого реле в зависимости от типа, мощности и конфигурации осветительного прибора. В справочных целях указывается также допустимая мощность.

■ Эти значения приводятся для цепи 230В с двумя активными проводниками (однофазная (фаза/нейтраль) или двухфазная (фаза/фаза)). Для цепей 110В значения в таблице делятся на 2.

■ Чтобы получить эквивалентные значения для всей трехфазной сети 230В, нужно умножить число ламп и общую допустимую мощность на:

□ на 3 (1,73) для цепей без нейтрали;

□ на 3 для цепей с нейтралью.

**Примечание:** Наиболее распространенные номинальные мощности ламп выделены жирным шрифтом.

Тип лампы	Мощность лампы и емкость конденсатора компенсации реактивной мощности	Макс. число светильников для однофазной цепи 230 В и максимальная выходная мощность в цепи											
		Импульсное реле TL				Контактор СТ							
		16 А	32 А	16 А	25 А	40 А	63 А						
<b>Лампы накаливания</b>													
<b>Галогенные лампы низкого напряжения</b>													
<b>Ртутные лампы (без балластного сопротивления)</b>													
	<b>40 Вт</b>	40	1500 Вт	106	4000 Вт	38	1550 Вт	57	2300 Вт	115	4600 Вт	172	6900 Вт
	<b>60 Вт</b>	25	-	66	-	30	-	45	-	85	-	125	-
	<b>75 Вт</b>	20	1600 Вт	53	4200 Вт	25	2000 Вт	38	2850 Вт	70	5250 Вт	100	7500 Вт
	<b>100 Вт</b>	16		42		19		28		50		73	
	150 Вт	10		28		12		18		35		50	
	200 Вт	8		21		10		14		26		37	
	300 Вт	5	1500 Вт	13	4000 Вт	7	2100 Вт	10	3000 Вт	18	5500 Вт	25	7500 Вт
	500 Вт	3		8		4		6		10		15	-
	1000 Вт	1		4		2		3		6	6000 Вт	8	8000 Вт
	1500 Вт	1		2		1		2		4		5	
<b>Галогенные лампы ELV 12 или 24 В</b>													
С ферромагнитным трансформатором	<b>20 Вт</b>	70	1350 Вт	180	3600 Вт	15	300 Вт	23	450 Вт	42	850 Вт	63	1250 Вт
	<b>50 Вт</b>	28	-	74	-	10	-	15	-	27	-	42	-
	75 Вт	19	1450 Вт	50	3750 Вт	8	600 Вт	12	900 Вт	23	1950 Вт	35	2850 Вт
	100 Вт	14		37		6		8		18		27	
С электронным трансформатором	<b>20 Вт</b>	60	1200 Вт	160	3200 Вт	62	1250 Вт	90	1850 Вт	182	3650 Вт	275	5500 Вт
	<b>50 Вт</b>	25	-	65	-	25	-	39	-	76	-	114	-
	75 Вт	18	1400 Вт	44	3350 Вт	20	1600 Вт	28	2250 Вт	53	4200 Вт	78	6000 Вт
	100 Вт	14		33		16		22		42		60	
<b>Люминесцентные лампы со стартером и ферромагнитным балластом</b>													
1 лампа Без компенсации (1)	15 Вт	83	1250 Вт	213	3200 Вт	22	330 Вт	30	450 Вт	70	1050 Вт	100	1500 Вт
	<b>18 Вт</b>	70	-	186	-	22	-	30	-	70	-	100	-
	20 Вт	62	1300 Вт	160	3350 Вт	22	850 Вт	30	1200 Вт	70	2400 Вт	100	3850 Вт
	<b>36 Вт</b>	35		93		20		28		60		90	
	40 Вт	31		81		20		28		60		90	
	<b>58 Вт</b>	21		55		13		17		35		56	
	65 Вт	20		50		13		17		35		56	
	80 Вт	16		41		10		15		30		48	
	115 Вт	11		29		7		10		20		32	
	15 Вт	50	900 Вт	160	2400 Вт	15	200 Вт	20	300 Вт	40	600 Вт	60	900 Вт
1 лампа С параллельной компенсацией (2)	<b>18 Вт</b>	50		133		15	-	20	-	40	-	60	-
	20 Вт	45		120		15	800 Вт	20	1200 Вт	40	2400 Вт	60	3500 Вт
	<b>36 Вт</b>	25		66		15		20		40		60	
	40 Вт	22		60		15		20		40		60	
	<b>58 Вт</b>	16		42		10		15		30		43	
	65 Вт	13		37		10		15		30		43	
	80 Вт	11		30		10		15		30		43	
	115 Вт	7		20		5		7		14		20	
	2 x <b>18 Вт</b>	56	2000 Вт	148	5300 Вт	30	1100 Вт	46	1650 Вт	80	2900 Вт	123	4450 Вт
	4 x <b>18 Вт</b>	28		74		16	-	24	-	44	-	68	-
2 или 4 лампы С последовательной компенсацией	2 x <b>36 Вт</b>	28		74		16	1500 Вт	24	2400 Вт	44	3800 Вт	68	5900 Вт
	2 x <b>58 Вт</b>	17		45		10		16		27		42	
	2 x 65 Вт	15		40		10		16		27		42	
	2 x 80 Вт	12		33		9		13		22		34	
	2 x 115 Вт	8		23		6		10		16		25	
	2 x <b>58 Вт</b>	13		34		12		19		38		57	
<b>Люминесцентные лампы с электронным балластом</b>													
1 или 2 лампы	<b>18 Вт</b>	80	1450 Вт	212	3800 Вт	74	1300 Вт	111	2000 Вт	222	4000 Вт	333	6000 Вт
	<b>36 Вт</b>	40	-	106	-	38	-	58	-	117	-	176	-
	<b>58 Вт</b>	26	1550 Вт	69	4000 Вт	25	1400 Вт	37	2200 Вт	74	4400 Вт	111	6600 Вт
	2 x <b>18 Вт</b>	40		106		36		55		111		166	
	2 x <b>36 Вт</b>	20		53		20		30		60		90	
	2 x <b>58 Вт</b>	13		34		12		19		38		57	

**Рис. N51** : Макс. число светильников для каждого реле, в зависимости от типа, мощности и конфигурации лампы (продолжение на следующей странице)

## 4 Осветительные сети

Тип лампы	Мощность лампы и емкость конденсатора компенсации реактивной мощности	Макс. число светильников для однофазной цепи 230 В и максимальная выходная мощность в цепи												
		Импульсное реле TL				Контактор СТ								
		16 А		32 А		16 А		25 А		40 А		63 А		
Компактные люминисцентные лампы														
С внешним электронным балл. сопротивлением	5 Вт	240	1200 Вт	630	3150 Вт	210	1050 Вт	330	1650 Вт	670	3350 Вт	Не проверено		
	7 Вт	171	-	457	-	150	-	222	-	478	-			
	9 Вт	138	1450 Вт	366	3800 Вт	122	1300 Вт	194	2000 Вт	383	4000 Вт			
	11 Вт	118		318		104		163		327				
	18 Вт	77		202		66		105		216				
	26 Вт	55		146		50		76		153				
Со встроенным электронным балл. сопротивлением (замена ламп накаливания)	5 Вт	170	850 Вт	390	1950 Вт	160	800 Вт	230	1150 Вт	470	2350 Вт	710	3550 Вт	
	7 Вт	121	-	285	-	114	-	164	-	335	-	514	-	
	9 Вт	100	1050 Вт	233	2400 Вт	94	900 Вт	133	1300 Вт	266	2600 Вт	411	3950 Вт	
	11 Вт	86		200		78		109		222		340		
	18 Вт	55		127		48		69		138		213		
	26 Вт	40		92		34		50		100		151		
Ртутные лампы высокого давления с ферромагнитным балластным сопротивлением без зажигающего														
Натриевые лампы высокого давления с ферромагн. балл. сопротивлением и встроенным зажигателем (3)														
Без компенсации (1)	50 Вт		Не проверено Мало используется				15	750 Вт	20	1000 Вт	34	1700 Вт	53	2650 Вт
	80 Вт						10	-	15	-	27	-	40	-
	125 / 110 Вт (3)						8	1000 Вт	10	1600 Вт	20	2800 Вт	28	4200 Вт
	250 / 220 Вт (3)						4		6		10		15	
	400 / 350 Вт (3)						2		4		6		10	
	700 Вт						1		2		4		6	
С параллельной компенсацией (2)	50 Вт	7 μF					10	500 Вт	15	750 Вт	28	1400 Вт	43	2150 Вт
	80 Вт	8 μF					9	-	13	-	25	-	38	-
	125 / 110 Вт (3)	10 μF					9	1400 Вт	10	1600 Вт	20	3500 Вт	30	5000 Вт
	250 / 220 Вт (3)	18 μF					4		6		11		17	
	400 / 350 Вт (3)	25 μF					3		4		8		12	
	700 Вт	40 μF					2		2		5		7	
	1000 Вт	60 μF					0		1		3		5	
Low-pressure sodium vapour lamps with ferromagnetic ballast with external ignitor														
Без компенсации (1)	35 Вт		Не проверено Мало используется				5	270 Вт	9	320 Вт	14	500 Вт	24	850 Вт
	55 Вт						5	-	9	-	14	-	24	-
	90 Вт						3	360 Вт	6	720 Вт	9	1100 Вт	19	1800 Вт
	135 Вт						2		4		6		10	
	180 Вт						2		4		6		10	
С параллельной компенсацией (2)	35 Вт	20 μF	38	1350 Вт	102	3600 Вт	3	100 Вт	5	175 Вт	10	350 Вт	15	550 Вт
	55 Вт	20 μF	24		63		3	-	5	-	10	-	15	-
	90 Вт	26 μF	15		40		2	180 Вт	4	360 Вт	8	720 Вт	11	1100 Вт
	135 Вт	40 μF	10		26		1		2		5		7	
	180 Вт	45 μF	7		18		1		2		4		6	
Натриевые лампы высокого давления														
Лампы с иодидами металлов														
С ферромагн. балл. сопротивлением, с внешним зажигателем, без компенсации (1)	35 Вт		Не проверено Мало используется				16	600 Вт	24	850 Вт	42	1450 Вт	64	2250 Вт
	70 Вт						8		12	-	20	-	32	-
	150 Вт						4		7	1200 Вт	13	2000 Вт	18	3200 Вт
	250 Вт						2		4		8		11	
	400 Вт						1		3		5		8	
	1000 Вт						0		1		2		3	
С ферромагн. балл. сопротивлением, с внешним зажигателем и параллельной компенсацией (2)	35 Вт	6 μF	34	1200 Вт	88	3100 Вт	12	450 Вт	18	650 Вт	31	1100 Вт	50	1750 Вт
	70 Вт	12 μF	17	-	45	-	6	-	9	-	16	-	25	-
	150 Вт	20 μF	8	1350 Вт	22	3400 Вт	4	1000 Вт	6	2000 Вт	10	4000 Вт	15	6000 Вт
	250 Вт	32 μF	5		13		3		4		7		10	
	400 Вт	45 μF	3		8		2		3		5		7	
	1000 Вт	60 μF	1		3		1		2		3		5	
	2000 Вт	85 μF	0		1		0		1		2		3	
С электронным балластным сопротивлением	35 Вт		38	1350 Вт	87	3100 Вт	24	850 Вт	38	1350 Вт	68	2400 Вт	102	3600 Вт
	70 Вт		29	-	77	-	18	-	29	-	51	-	76	-
	150 Вт		14	2200 Вт	33	5000 Вт	9	1350 Вт	14	2200 Вт	26	4000 Вт	40	6000 Вт

- (1) Цели с ферромагнитными балластными сопротивлениями без компенсации потребляют в два раза больший ток при одинаковой полезной мощности лампы. Это объясняет малое число ламп в этой конфигурации.
- (2) Общая емкость конденсаторов коррекции коэффициента мощности, подключенных параллельно основной цепи, ограничивает число ламп, которое может быть подключено к контактору. Общая емкость за модульным контактором на номинальный ток 16, 25, 40 или 63 А не должна превышать 75, 100, 200 или 300 μF, соответственно. Следует учитывать эти пределы при расчете максимального допустимого числа ламп, если значения емкости отличаются от указанных в таблице.
- (3) Ртутные лампы высокого давления без зажигающего (мощностью 125, 250 и 400 Вт) постепенно заменяются натриевыми лампами высокого давления с внутренним зажигающим и мощностью 110, 220 и 350 Вт, соответственно.

**Рис. N51 :** Максимальное число светильников для каждого реле, в зависимости от типа, мощности и конфигурации лампы (окончание)

N37



### Защита осветительных сетей: Максимальное число ламп и номинальный ток автоматического выключателя в зависимости от его время-токовой характеристики, типа и единичной мощности лампы

При включении разрядных ламп (включая их балластное сопротивление) пусковой ток, потребляемый каждой лампой, может быть порядка:

■ 25 x номинальный ток цепи в течение первых 3 мс

■ 7 x номинальный ток цепи в течение последующих 2 с

Для люминесцентных ламп с высокочастотным электронным управляющим дросселем, номинальные параметры устройства защиты должны быть рассчитаны на 25 x номинальный ток в течение 250-350 мкс.

Однако, из-за сопротивления цепи общий пусковой ток для выключателя меньше суммы всех пусковых токов отдельных ламп при прямом подсоединении к выключателю.

Таблицы ниже (см. **Рис. N52 – N58**) составлены с учетом следующего:

■ Кабели цепей имеют длину 20 м от распределительного устройства до первой лампы и 7 м между каждым дополнительным осветительным оборудованием.

■ Номинальный ток выключателя рассчитан на защиту осветительной сети с учетом поперечного сечения кабеля и предотвращения ложных срабатываний при включении ламп.

■ Время-токовая характеристика выключателя (кривая срабатывания) (C = уставка мгновенного отключения 5 - 10 In, D = уставка мгновенного отключения 10 - 14 In).

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания C и D																			
14/18	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
14 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
14 x3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10
14 x4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
18 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
18 x4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10
21/24	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
21/24 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
28	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
28 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10
35/36/39	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
35/36 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10
38/39 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10
40/42	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
40/42 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	16
49/50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
49/50 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16
54/55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10
54/55 x2	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16
60	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10

N38

**Рис. N52** : Люминесцентные лампы с электронным балластом - Vac = 230 В

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания C и D																			
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
13	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
16	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
17	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
18	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
21	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
23	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
25	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10

**Рис. N53** : Компактные люминесцентные лампы - Vac = 230 В

## 4 Осветительные сети

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ном. ток выключателя (А) Кривая срабатывания С																				
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
80	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16
125	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20	20
250	6	10	10	16	16	16	16	16	16	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	6	16	20	25	25	32	32	32	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63	63
1000	16	32	40	50	50	50	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ном. ток выключателя (А) Кривая срабатывания D																				
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
80	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16
125	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20	20
250	6	6	10	10	10	10	16	16	16	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	6	10	16	16	20	20	25	25	25	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63
1000	10	20	25	32	40	40	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. N54 : Ртутные лампы высокого давления (с ферромагнитным балластным сопротивлением и компенсацией реакт. мощности) -  $V_{ac} = 230\text{ В}$

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ном. ток выключателя (А) Кривая срабатывания С																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
18	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
26	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
35/36	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10
91	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16
131	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20
135	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	20	20	20
180	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	20	20	20	20	25	25	25	25
Электронный балласт																				
36	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
66	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
91	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16
Ном. ток выключателя (А) Кривая срабатывания D																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
18	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
26	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
35/36	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10
91	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16
131	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20
135	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	20	20	20
180	6	6	6	6	10	10	10	10	16	16	16	16	20	20	20	20	25	25	25	25
Электронный балласт																				
36	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
55	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
66	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
91	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16

Рис. N55 : Натриевые лампы низкого давления (с компенсацией реакт. мощности) -  $V_{ac} = 230\text{ В}$

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания C																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16
100	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16
150	6	6	10	10	10	10	10	10	6	16	16	16	16	16	16	20	20	20	25	25
250	6	10	16	16	16	20	20	20	20	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	10	16	20	25	32	32	32	32	32	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63
1000	16	32	40	50	50	50	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Электронный балласт																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10
100	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания D																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16
100	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16
150	6	6	6	6	6	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	20	20	20	25	25
250	6	6	10	10	16	16	16	16	16	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	6	10	16	16	20	20	25	25	25	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63
1000	10	20	32	32	40	40	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Электронный балласт																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
50	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10
100	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16

Рис. N56 : Натриевые лампы высокого давления (с компенсацией реакт. мощности) - Vac 230 В

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания C																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16
150	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	20	20	20	25	25
250	6	10	16	16	16	20	20	20	20	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	6	16	20	25	32	32	32	32	32	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63
1000	16	32	40	50	50	50	50	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
1800/2000	25	50	63	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Электронный балласт																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10
150	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20	20	20
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания D																				
Ферромагнитное балластное сопротивление																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	16	16	16
150	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	20	20	20	25	25
250	6	6	10	10	16	16	16	16	16	20	20	25	25	25	32	32	32	32	40	40
400	6	10	16	16	20	20	25	25	25	32	32	40	40	40	50	50	50	50	63	63
1000	16	20	32	32	40	50	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1800	16	32	40	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	20	32	40	50	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Электронный балласт																				
35	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
70	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	10	10
150	6	6	6	6	6	6	6	10	10	10	16	16	16	16	16	16	16	20	20	20

Рис. N57 : Металлогалогенные лампы (с компенсацией реакт. мощности) - Vac = 230 В

Мощность лампы (Вт)	Число ламп на цепь																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания C																				
1800	16	32	40	50	50	50	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	16	32	40	50	50	50	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ном. ток выключателя(A) Кривая срабатывания D																				
1800	16	20	32	32	32	32	50	63	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	16	25	32	32	32	32	50	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. N58 : Металлогалогенные лампы (с ферромагнитным балластным сопротивлением и компенсацией реакт. мощности) - Vac = 400 В

Перегрузка нейтрали

**Риск**  
На установках, где, например, много люминесцентных ламп с электронными балластами, включенных между фазами и нейтралью, высокий процент токов гармоник, кратных трем, может вызвать перегрузку нейтрали. **Рис. N59** ниже дает обзор типовых значений токов гармоник, кратных трем, в таких осветительных сетях.

Тип лампы	Станд. мощность	Режим регулировки	Тип. уровень гарм. 3
Лампа накаливания с диммером	100 Вт	Диммер	5 - 45 %
Галогенная лампа ELV	25 Вт	Электронный трансформатор ELV	5 %
Люминесцентная лампа	100 Вт	Магн. балл. сопрот.	10 %
	< 25 Вт	Электронный балласт	85 %
	> 25 Вт	+ PFC	30 %
Разрядная лампа	100 Вт	Магн. балл. сопрот.	10 %
		Эл. балл. сопрот.	30 %

Рис. N59 : Обзор типовых значений гармоник, кратных 3-м в осветительных сетях

Решение

Во-первых, использование нейтрального провода малого сечения должно быть запрещено, как это предписывается стандартом IEC 60364, Раздел 523-5-3.  
Что касается устройств защиты максимального тока, необходимо установить 4-полюсные выключатели с защищенной нейтралью (за исключением системы TN-C, для которой защитный нейтральный проводник PEN не должен отключаться). Устройство этого типа также может использоваться для размыкания всех полюсов, необходимых для питания светильников, подключенных на линейное напряжение, в случае КЗ.  
Поэтому, выключатель должен одновременно разъединять цепи фаз и нейтрали.

Токи утечки на землю

**Риск**  
При включении питания, емкости электронных балластных сопротивлений относительно земли вызывают пиковые токи утечки, которые могут приводить к ложным срабатываниям УЗО.

Два решения

Использование УЗО, отстроенных от этого типа импульсного тока, рекомендуется и даже необходимо при оснащении существующей установки (см. **Рис. N60**).  
Для новой установки важно обеспечить полупроводниковые или гибридные регуляторы (контакты или выключатели с дистанционным управлением) для снижения таких импульсных токов (включение при прохождении напряжения через нуль).

Перенапряжения

**Риск**  
Как указывается в предыдущих разделах, включение осветительной сети сопровождается переходным процессом со значительным перенапряжением. Такое перенапряжение вызывает значительные колебания напряжения на зажимах присоединенных к сети ЭП. Эти колебания напряжения могут нарушать работу чувствительных ЭП (микрокомпьютеры, регуляторы температуры и т.д.).

Решение

Рекомендуется разделить питание таких чувствительных ЭП от питания осветительных цепей.

Чувствительность осветительных приборов к резким отклонениям напряжения в сети

Кратковременные перерывы питания

**Риск**  
Разрядным лампам требуется несколько минут для загорания после отключения их питания.  
**Решение**  
Необходимо обеспечить частичное «аварийное» освещение с помощью ламп мгновенного включения (лампы накаливания, или люминесцентные лампы, или разрядные лампы «горячего перезапуска») согласно требованиям техники безопасности. В зависимости от действующих норм, цепь питания таких ламп обычно отделяется от главной (рабочей) осветительной сети.

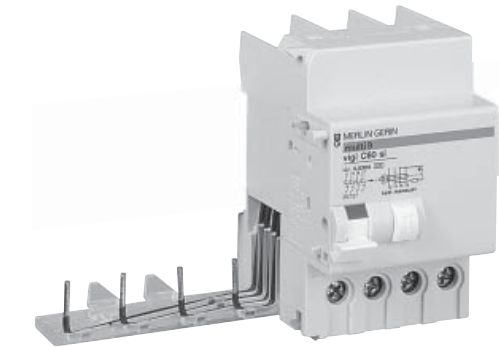


Рис. N60 : УЗО с защитой от импульсных токов (тип s.i) (Merlin Gerin)

### Колебания напряжения

#### ■ Риск

Большинство осветительных устройств (за исключением ламп, запитываемых через электронное балластное сопротивление), чувствительно к резким колебаниям напряжения питания. Такие колебания вызывают мигание ламп, что неприятно для пользователей и может даже вызывать значительные проблемы. Такие проблемы зависят от частоты колебаний и их величины.

Стандарт IEC 61000-2-2 («уровни совместимости для кондуктивных помех низкой частоты») указывает максимальную допустимую величину колебаний напряжения как функцию от числа колебаний в секунду или минуту.

Такие колебания напряжения вызваны главным образом переменными нагрузками высокой мощности (электродуговые печи, сварочные аппараты, пуск электродвигателей).

#### ■ Решение

Могут использоваться специальные методы для снижения колебаний напряжения. Тем не менее, рекомендуется, при возможности, запитывать осветительные сети через отдельную линию питания. Использование электронных балластных сопротивлений (дресселей) рекомендуется для специальных объектов (больницы, специальные помещения, участки контроля деталей, компьютерные залы и т.д.).

### Разработки устройств управления и защиты

Использование регуляторов освещенности расширяется. Ограничения по зажиганию снижаются, а снижение рабочих характеристик устройств управления и защиты становится менее значимой проблемой. Внедряются новые устройства защиты, приспособленные к ограничениям по осветительным цепям, например, выключатели и модульные дифференциальные выключатели от компании Merlin Gerin со специальной защитой, например, выключатели ID и Vigi. Новые разработки устройств управления и защиты обеспечивают дистанционное управление, круглосуточное регулирование, управление освещением, снижение потребления электроэнергии и т.д.

## 4.4 Освещение общественных мест

### Рабочее освещение

Нормы, определяющие минимальные требования для общественных зданий в большинстве европейских стран:

■ Установки, обеспечивающие освещение общественных мест, должны обеспечиваться отдельными устройствами управления и защиты, независимыми от установок, обеспечивающих освещение других объектов

■ Нарушение питания в оконечной осветительной сети (например, перегорание предохранителя или срабатывание выключателя) не должно приводить к полному отключению освещения объекта, на котором может находиться более 50 человек.

■ Защита посредством УЗО должна осуществляться несколькими устройствами, а не одним устройством на все цепи.

### Аварийное освещение и другие системы

Под аварийным освещением понимается освещение, которое включается при отказе нормального освещения.

**Аварийное освещение разделяется на следующие типы (EN-1838):**

#### Аварийное освещение

Служит для обеспечения безопасной эвакуации людей из аварийной зоны или обеспечения завершения опасной работы до эвакуации из такой зоны. Оно предназначено для освещения путей эвакуации и может использоваться в безопасной ситуации в качестве нормального или вспомогательного освещения. Аварийное освещение подразделяется на следующие типы:

**Аварийное освещение путей эвакуации**  
Служит для обозначения путей эвакуации и безопасной эвакуации людей по таким путям.

**Аварийное освещение в публичных местах**  
Служит для предотвращения паники и обеспечения освещения для доступа людей к возможным путям эвакуации.

### Аварийное освещение и предупредительные знаки для путей эвакуации

Аварийное освещение и предупредительные знаки для путей эвакуации имеют важное значение при разработке аварийных систем. Оптимальное решение обеспечивает повышение уровней

безопасности и эффективность действий в аварийных ситуациях.

Стандарт EN 1838 («Назначение освещения. Аварийное освещение») определяет основные принципы аварийного освещения для путей эвакуации:

«Освещение путей эвакуации служит для безопасной эвакуации людей, обеспечивая достаточную видимость и направление на пути эвакуации...»

Из этого положения следует простой вывод:

Предупредительные знаки и освещение путей эвакуации должны разделяться.

### Функции и работа осветительных устройств

Технические требования на изготовления определяются стандартом EN 60598-2-22, «Специальные требования — Осветительные устройства для аварийного освещения», который должен использоваться вместе со стандартом EN 60598-1, «Осветительные устройства - Часть 1: Общие требования и испытания».

#### Длительность

Основное требование состоит в определении длительности аварийного освещения. Как правило, это 1 час, но в некоторых странах законодательными техническими нормами установлены другие требования к длительности.

#### Работа

Следует разделять следующие типы аварийных осветительных устройств:

- Осветительные устройства, не требующие техобслуживания
  - Лампа включается только при отказе рабочего освещения
  - Лампа запитывается от аккумуляторной батареи в течение отказа
  - Батарея автоматически перезаряжается после восстановления сетевого питания
- Осветительные устройства, требующие техобслуживания
  - Лампа может включаться для работы в непрерывном режиме
  - Требуется отдельный источник питания, особенно для питания лампы, которая может отключаться при отсутствии людей на объекте
  - Лампа запитывается от аккумуляторной батареи в течение отказа.

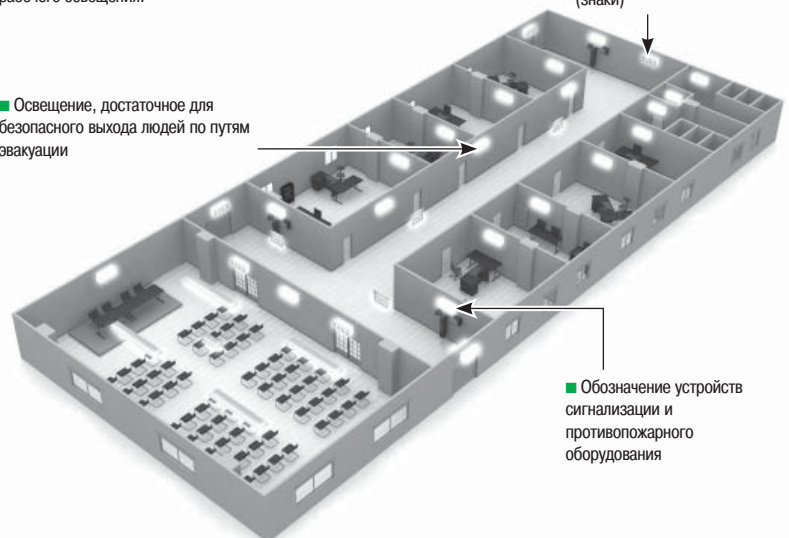
### Конструкция

Объединение аварийного и рабочего освещения должно выполняться в строгом соответствии с нормами проектирования здания или объекта. Должны соблюдаться все нормы и законы для обеспечения разработки системы, соответствующей стандарту (см. **Рис. N61**).

Основные функции системы аварийного освещения при отказе рабочего освещения:

- Освещение, достаточное для безопасного выхода людей по путям эвакуации

- Обозначение путей эвакуации (знаки)



**Рис. N61** : Основные функции системы аварийного освещения

### Европейские нормы

Проектирование систем аварийного освещения регулируется рядом законодательных норм, которые обновляются и вводятся на основе документов, публикуемых по требованию органов, отвечающих за европейские и международные технические нормы и правила. Каждая страна имеет собственные законы и нормы в дополнение к европейским нормам для отдельных секторов. В основном они определяют объекты, которые должны обеспечиваться аварийным освещением, а также соответствующие технические требования. Задача разработчика состоит в обеспечении соответствия проекта таким нормам.

### EN 1838

Важным документом на европейском уровне в отношении аварийного освещения является стандарт EN 1838, «Назначение освещения. Аварийное освещение». Этот стандарт устанавливает требования и ограничения в отношении функционирования систем аварийного освещения.

### Нормы CEN и CENELEC

Нормы CEN и CENELEC определяют стандартные условия, особо значимые для эксплуатации и проектирования. Ряд норм касается аварийных ситуаций. Разграничиваются нормы для осветительных устройств и нормы для электроустановок.

### EN 60598-2-22 и EN-60598-1

Устройства аварийного освещения определяются европейским стандартом EN 60598-2-22 («Специальные требования — Устройства аварийного освещения»), который основан на стандарте EN-60598-1, «осветительные устройства - Часть 1: Общие требования и испытания».

# 5 Асинхронные двигатели

Асинхронный двигатель надежен в эксплуатации и имеет широкое применение. 95% двигателей, установленных во всем мире, являются асинхронными. Поэтому защита таких двигателей является важным вопросом во многих областях применения.

Последствия несоответствующей защиты двигателя включают в себя следующее:

- Для людей:
  - удушье из-за остановки двигателя вентилятора;
  - поражение электротоком из-за пробоя изоляции двигателя;
  - травма из-за невозможности остановки двигателя при срабатывании неправильно выполненной максимальной защиты.
- Для приводных машин и технологических процессов:
  - повреждение сцепных муфт для валов, осей из-за экстренного торможения двигателя;
  - производственные потери;
  - задержка изготовления.
- Для двигателя:
  - перегорание обмоток из-за экстренного торможения двигателя;
  - затраты на демонтаж и установку двигателя заново или замену двигателя;
  - затраты на ремонт двигателя.

Именно безопасность людей и имущества и уровни надежности и готовности зависят от выбора защитного оборудования.

С экономической точки зрения учитываются общие затраты по устранению повреждения; такие затраты растут по мере увеличения габаритов и мощности двигателя и усложнения доступа к нему для ремонта. Производственные потери – столь же важный фактор.

Конкретные рабочие характеристики двигателя определяют выбор цепей электропитания, требуемых для удовлетворительной работы.

В силу особых характеристик, присущих двигателю, цепи его питания налагают определенные ограничения, обычно не налагаемые на другие распределительные цепи, таких как:

- большой пусковой ток (см. **рис. N62**), в основном реактивный, который может стать причиной значительного снижения напряжения;
- большое число и частота запусков;
- большой пусковой ток означает, что устройства защиты от перегрузки должны иметь рабочие характеристики, предотвращающие отключение в период запуска.

## 5.1 Функции защиты в цепи двигателя

Стандартные функции:

- Основные функции, включая:
  - отключение для обслуживания;
  - управление двигателем (местное или дистанционное);
  - защита от КЗ;
  - защита от перегрузки.
- Дополнительные средства защиты, включая:
  - тепловую защиту посредством непосредственного измерения температуры обмотки;
  - тепловую защиту посредством косвенного измерения температуры обмотки;
  - непрерывный контроль сопротивления изоляции;
  - специальные функции защиты двигателя.
- Специальные устройства управления, включая:
  - электромеханические пускатели;
  - устройства защиты и управления;
  - контроллеры (устройства) плавного пуска;
  - регулируемые приводы.

### Основные функции

#### Отключение

Необходимо полное или частичное отключение двигателя от сети питания для обеспечения безопасности персонала при проведении техобслуживания. Эта функция выполняется разъединителями. Могут использоваться и другие устройства, предназначенные для обеспечения отключения, такие как разъединители/выключатели.

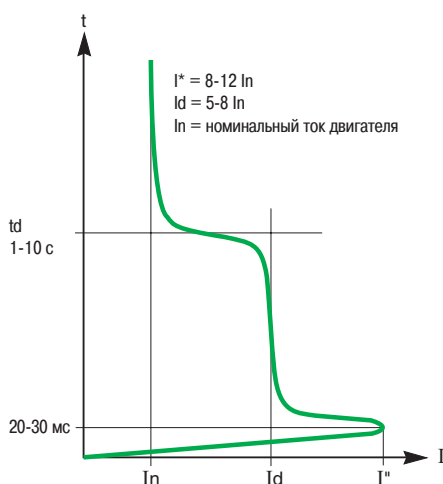
#### Управление двигателем

Функция управления двигателем состоит во включении и отключении тока в цепи двигателя. В случае ручного управления эта функция может выполняться автоматическими выключателями или выключателями нагрузки в цепи двигателя. В случае дистанционного управления эта функция выполняется контакторами или пускателями.

Функция управления может также инициироваться другими средствами:

- защитой от перегрузки;
- дополнительной защитой;
- отключением при снижении напряжения (требуется для многих машин).

Функция управления может также выполняться специальными устройствами управления.



**Рис. N62:** Характеристики пускового тока асинхронного двигателя (прямой пуск)



### Защита от коротких замыканий (КЗ)

#### ■ Междофазное КЗ

Этот тип повреждения внутри машины крайне редок. Как правило, его причиной является механическое повреждение кабеля, питающего двигатель.

#### ■ Замыкание фазы на землю

Ухудшение состояния изоляции обмотки является основной причиной. Ток такого повреждения зависит от системы заземления. Для системы заземления TN характерен очень высокий ток повреждения и в большинстве случаев повреждается двигатель. Для других систем заземления защита двигателя обеспечивается посредством защиты от замыкания на землю.

При выборе защиты от КЗ рекомендуется обратить особое внимание на предотвращение срабатывания защиты в период пуска двигателя. Ток включения (пусковой ток) стандартного двигателя в 6-8 раз выше его номинального тока; при повреждении он в 15 раз выше номинального тока. Поэтому пусковой ток не должен интерпретироваться системой защиты как ток повреждения. Кроме того, повреждение в цепи двигателя не должно нарушать работу других цепей. Следовательно селективность мгновенных защит должна обеспечиваться во всех частях электроустановки.

### Защита от перегрузки

Механические перегрузки из-за приводимых в движение узлов являются основными причинами перегрузки двигателя. Они приводят к току перегрузки и перегреву двигателя. Срок службы двигателя может сокращаться и в некоторых случаях двигатель может повреждаться. Поэтому необходимо обнаруживать перегрузку двигателя. Такая защита может обеспечиваться следующими средствами:

- специальным реле тепловой защиты;
- специальным термоманитным выключателем (автомат с комбинированным расцепителем) предназначенным для защиты двигателя;
- дополнительными средствами защиты (см. ниже), такими как тепловой датчик или электронное реле защиты от повреждения;
- устройствами плавного пуска или преобразователями частоты (см. ниже).

### Дополнительные средства защиты

- Тепловая защита путем непосредственного измерения температуры обмотки  
Обеспечивается термодатчиками, встроенными внутрь обмоток двигателя, и реле.
- Тепловая защита посредством косвенного определения температуры обмотки  
Обеспечивается микропроцессорным реле путем измерения тока и расчетом, учитывающим характеристики двигателей (т.е. термическую постоянную времени).
- Реле непрерывного контроля сопротивления изоляции или дифференциальным реле защиты от замыканий на землю  
Обеспечивают обнаружение и защиту от тока утечки на землю и замыкания на землю, позволяя проводить техобслуживания до выхода двигателя из строя.
- Специальные функции защиты двигателя  
Такие функции, как защита от затянувшегося пуска или торможения, защита от несимметрии, обрыва или неправильного чередования фаз, защита от замыкания на землю, защита от работы без нагрузки, сигнализация перегрева, коммуникация, могут быть обеспечены применением многофункциональных реле.

### Специальные устройства управления

- Электромеханические пускатели (звезда-треугольник, автотрансформатор, реостатные (роторные) пускатели)  
Как правило, используются при холостом ходе в течение пускового периода (насос, вентилятор, станок и т.д.).
- Преимущества  
Хорошее отношение «момент/ток», значительное снижение пускового тока.
- Недостатки  
Низкий момент при пуске, отсутствие средств регулирования, отключение питания при переходных процессах, требуется 6 жил кабеля.
- Устройства защиты и управления  
Обеспечивают основные перечисленные выше функции в рамках одного блока, а также некоторые дополнительные функции и возможность передачи данных. Кроме того, такие устройства обеспечивают сохранение работоспособности в случае КЗ.
- Устройства плавного пуска и торможения  
Используются для насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров.
- Преимущества  
Ограничение пика тока, падения напряжения, механических напряжений при пуске двигателя, встроенная тепловая защита, компактность, возможность передачи данных.
- Недостатки  
Низкий момент в течение пускового периода; повышенное тепловыделение.

## ■ Преобразователи частоты

Используются для насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров, машин с большим моментом нагрузки, машин с большой инерцией.

## □ Преимущества

Непрерывное регулирование скорости (как правило, в диапазоне 2-130% от номинальной скорости), возможность работы на повышенных скоростях, регулирование ускорения и торможения, высокий момент при пуске и останове, низкий пусковой ток; встроенная тепловая защита, возможность передачи данных.

## □ Недостатки

Повышенное тепловыделение, габариты, стоимость.

## 5.2 Стандарты

Управление и защита двигателя могут обеспечиваться различными способами:

## ■ Посредством использования устройств защиты от КЗ и электромеханических устройств, таких как:

□ электромеханические пускатели по стандарту МЭК 60947-4-1;

□ полупроводниковые пускатели по стандарту МЭК 60947-4-2;

□ регулируемые приводы по стандарту МЭК 61800.

## ■ Посредством использования одного устройства управления и контроля, выполняющего все основные функции, по стандарту МЭК 60947-6-2.

В данном документе рассматриваются только цепи двигателя, включая сопутствующие электромеханические устройства, такие как пускатели и средства защиты от КЗ. Устройства по стандарту 60947-6-2, полупроводниковые пускатели и регулируемые приводы рассматриваются только со специальной точки зрения.

Цель двигателя должна соответствовать требованиям МЭК 60947-4-1 и, главным образом, рассматривается в следующих аспектах:

## ■ координация между устройствами цепи двигателя МЭК 60947-6-2;

## ■ класс отключения тепловых реле;

## ■ категория использования контакторов;

## ■ координация уровней изоляции.

**Примечание:** первый и последний пункты выполняются для всех устройств по стандарту МЭК 60947-4-1, поскольку они обеспечивают непрерывность работы.

## Стандартизация группы «выключатель + контактор + тепловое реле»

### Категории использования коммутационных устройств

Стандарты серии МЭК 60947 определяют категорию использования в соответствии с областью применения коммутационных устройств (см. Рис. № 63). Каждая категория использования характеризуется одним или несколькими параметрами условий эксплуатации, такими как:

## ■ Токи

## ■ Напряжения

## ■ Коэффициент мощности или постоянная времени

## ■ И, в случае необходимости, другие условия эксплуатации

Ток	Категория использования	Типичная область применения
Переменный ток	AC-1	Неиндуктивные или слабо индуктивные нагрузки, печи сопротивления. Распределительная сеть (освещение, генераторы и т. д.)
	AC-2	Электродвигатель с фазным ротором: пуск, отключение. Мощное оборудование (подъемник, транспортер, дробильное оборудование, линия прокатки)
	AC-3	Электродвигатель с короткозамкнутым ротором: пуск, отключение вращающихся двигателей. Управление двигателем (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, конвейеры, прессы и т. д.)
	AC-4	Электродвигатель с короткозамкнутым ротором: пуск, торможение противотключением, толчковый режим. Мощное оборудование (подъемник, транспортер, дробильное оборудование, линия прокатки)
Постоянный ток	DC-1	Неиндуктивные или слабо индуктивные нагрузки, печи сопротивления.
	DC-3	Двигатели параллельного возбуждения: пуск, торможение противотключением, толчковый режим, динамическое отключение.
	DC-5	Двигатели последовательного возбуждения: пуск, торможение противотключением, толчковый режим, динамическое отключение.

\* Под торможением противотключением подразумевается остановка или быстрое реверсирование двигателя путем переключения питающих соединений двигателя во время его работы. Под толчковым режимом подразумевается кратковременное однократное или повторное возбуждение двигателя с целью незначительных смещений приводимого механизма.

**Рис. N63** : категории использования коммутационных устройств в зависимости от областей применения в соответствии со стандартом МЭК 60947-1

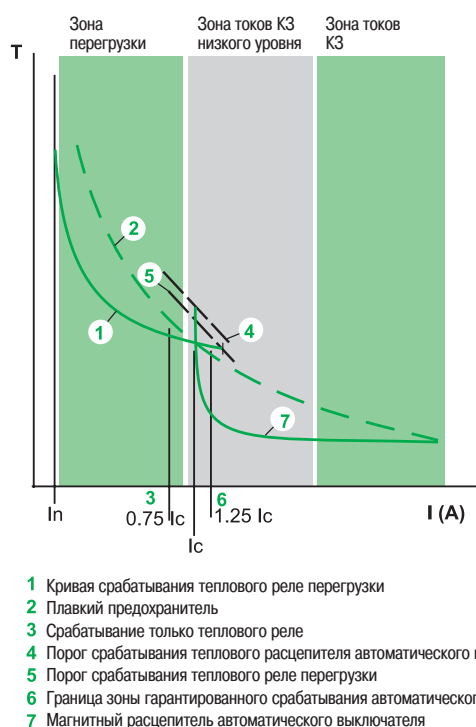
Необходимо также учесть следующее:

- Условия подключения и отключения цепи
- Тип нагрузки (электродвигатель с короткозамкнутым ротором, электродвигатель с фазным ротором, активная нагрузка)
- Условия включения и отключения нагрузки (вращающийся двигатель, остановленный двигатель, пуск двигателя, торможение противовключением и т.д.)

### Координация между автоматическими выключателями и контакторами

Координация является наиболее эффективной комбинацией различных защит (от перегрузок, коротких замыканий) и контактора. Пускатель электродвигателя представляет собой совокупность защит и контактор, соответствующих определенной мощности нагрузки. Данное устройство обеспечивает наилучшую защиту подключенного к нему оборудования (см. **Рис. № 64**).

При этом одновременно достигаются две цели – уменьшается как количество оборудования, так и стоимость технического обслуживания, поскольку различные защиты взаимно дополняют друг друга.



**Рис. N64** : Основы координации

### Имеются различные типы координации

Стандарт МЭК 60947-4-1 определяет два типа координации (тип 1 и тип 2), которые устанавливают максимально допустимые пределы ухудшения рабочих параметров коммутационного устройства в случае короткого замыкания.

#### ■ Координация по типу 1:

Наиболее распространенный тип координации. В случае короткого замыкания контактор или пускатель не должен представлять угрозу для персонала и для установки. После короткого замыкания допускается ухудшение рабочих характеристик пускателя, рабочее состояние пускателя может быть восстановлено после ремонта или замены некоторых частей.

#### ■ Координация по типу 2:

Высокоэффективное решение. В случае короткого замыкания контактор или пускатель не должен представлять угрозу для персонала и для установки. При этом допускается незначительное сваривание контактов пускателя или контактора с условием, что оно может быть легко устранено. В этом случае производитель должен определить мероприятия, необходимые для технического обслуживания устройства.

#### ■ Предложение некоторых производителей:

Наиболее эффективным решением является **“Полная координация”**.

В случае короткого замыкания контактор или пускатель не должен представлять угрозу для персонала и для установки и сохранять работоспособность. Не допускается возможность сваривания контактов пускателя или контактора. При этом включение пускателя может происходить немедленно.

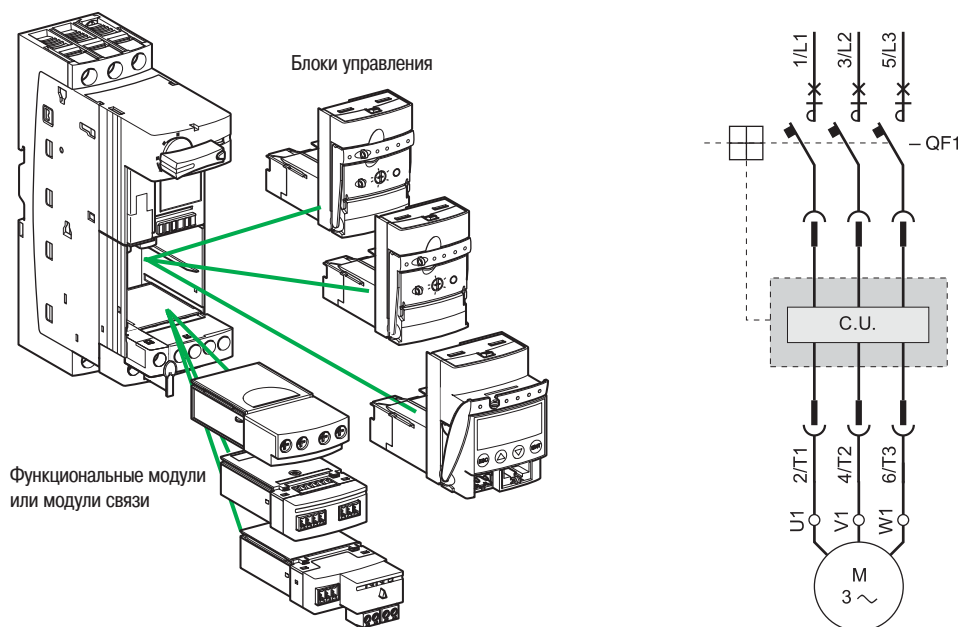
### Пускатели-контроллеры

Пускатели-контроллеры разработаны, чтобы выполнять функции управления и защиты (от перегрузок и коротких замыканий) одновременно. Кроме того, они позволяют выполнять операции управления в случае короткого замыкания.

Они могут также обеспечить дополнительные функции, такие как изоляция, что максимально расширяет возможности пускателя. Данные устройства соответствуют стандарту МЭК 60947-6-2, который, в частности, определяет технические характеристики и категории использования пускателей-контроллеров (наряду со стандартами МЭК 60947-1 и 60947-4-1).

Защитные функции, выполняемые пускателями-контроллерами, объединены и скоординированы таким способом, что данное устройство может нормально функционировать в диапазоне токов вплоть до рабочей отключающей способности  $I_{cs}$  пускателя-контроллера. Независимо от того, сколько дополнительных модулей входит в состав единого устройства, его технические характеристики не изменяются. Кроме того, гарантируется «полная» координация всех защитных функций, что обеспечивает пользователю оптимальную защиту, которую легко выбрать и применить.

Хотя пускатель-контроллер представляет собой единое устройство, его модульная конструкция обеспечивает большую гибкость, чем традиционный пускатель, состоящий из сборки «выключатель + контактор + тепловое реле». Типичным представителем устройства, описанного выше, является пускатель-контроллер «TeSys U» (см. **Рис. №65**).



**Рис. N65 :** Пример модульного пускателя-контроллера TeSys U

У пускателя-контроллера TeSys U с базовым блоком на 32 А можно в любое время заменить модуль управления и защиты, при этом диапазон токовых уставок будет составлять от 0,15 А до 32 А. Кроме того, при установке дополнительных модулей, появляются новые функциональные возможности, такие как:

- Силовой блок: блок реверса, ограничитель
- Управление
- функциональные модули: аварийно-предупредительная сигнализация, индикация нагрузки двигателя, автоматический возврат в исходное состояние и т.д.
- модули связи: AS-I, Modbus, Profibus, Can-Open, и т.д.
- модули дополнительных контактов: дополнительные контакты.

Возможные функции связи (см. Рис. № 66).

Возможные функции:	Стандартные блоки управления	Усовершенствованные блоки управления	Многофункциональные блоки управления
Состояние пускателя			
Аварийно-предупредительная сигнализация			
Сигнализация тепловой перегрузки			
Удаленный перезапуск по сети связи			
Индикация нагрузки двигателя			
Дифференциация аварийного события			
Установка параметров и наличие защитных функций			
Функция «Log file»			
Функция «Monitoring»			
Управление пуском и остановкой			

Информация, передаваемая по сети связи (Modbus) для указанной функции

Рис. N66 : Функции связи Tesys U

Какой тип координации выбрать?

Тип координации зависит от параметров эксплуатации и должен выбираться для (оптимального) удовлетворения потребностей пользователя с учетом стоимости установки.

■ Тип 1  
Коммутационное устройство может быть непригодно для дальнейшей эксплуатации после короткого замыкания без ремонта или замены комплектующих.  
Применяется, когда не требуется непрерывная работа установки, и она может быть снова запущена в работу после замены неисправных частей.  
В этом случае необходимо доступное и квалифицированное техническое обслуживание.  
Преимуществом является снижение стоимости коммутационного устройства.

■ Тип 2  
Необходим только мелкий ремонт после короткого замыкания для дальнейшего использования.  
Может применяться, когда требуется непрерывная работа установки.  
В случае, если требуется немедленный старт двигателя после короткого замыкания, необходима «Полная координация». В этом случае техническое обслуживание не требуется. Различные типы координаций, предлагаемые в каталогах производителей, упрощают пользователям выбор оборудования и гарантируют, что пускатель соответствует стандартам.

5.3 Области применения

Система управления и защиты двигателя может включать один, два, три или четыре различных устройства, которые выполняют одну или несколько функций.

**В случае комбинации нескольких устройств координация между ними важна для обеспечения оптимизированной защиты двигателя.**

Для защиты цепи двигателя необходимо учитывать многие параметры, которые зависят:

- от области применения (типа машины, безопасности работы, числа включений и т.д.);
- от требуемой непрерывности работы;
- от действующих норм техники безопасности.

Требуется обеспечение разнообразных электротехнических функций:

- Пуск, нормальный режим работы и останов без внезапного отключения с выполнением требований к управлению, число включений, требования к долговечности и правила техники безопасности (аварийные остановы), а также защита цепи и двигателя, отключение для обеспечения безопасности персонала при проведении техобслуживания.

Основные схемы защиты: автоматический выключатель + контактор + тепловое реле

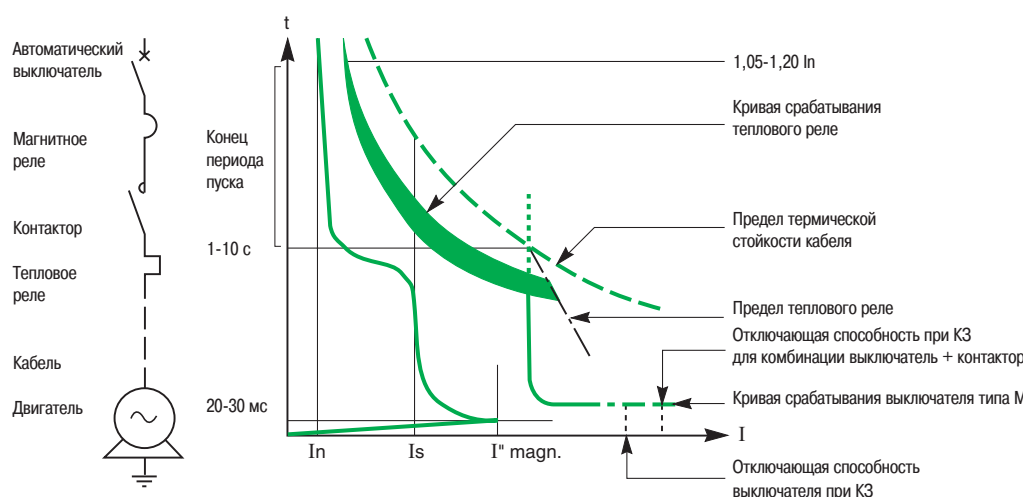
**Преимущества**  
Комбинация устройств облегчает монтаж, эксплуатацию и техобслуживание:

- Сокращение объема техобслуживания: для автоматических выключателей не требуется замена перегоревших предохранителей, не требуется хранение запчастей (различных размеров и типов).
- Улучшение непрерывности работы: установка может включаться сразу после устранения повреждения и проверки пускателя.
- Возможность легкой установки дополнительных устройств, иногда требуемых для цепи двигателя.
- Гарантированное отключение всех трех фаз (тем самым предотвращается возможность режима однофазного включения).

Среди возможных методов защиты двигателя комбинация «автоматический выключатель + контактор + тепловое реле» обеспечивает значительные преимущества

(1) Комбинация контактора с тепловым реле часто называется пускатель

- Возможность отключения тока полной нагрузки (с помощью выключателя) в случае повреждения контактора, например, срабатывание контактов.
- Блокировка.
- Разнообразные средства дистанционной индикации.
- Повышенная степень защиты пускателя в случае перегрузки по току и, в частности, при КЗ через сопротивление (1), с токами приблизительно в 30 раз выше  $I_n$  двигателя (см. **рис. N67**).
- Возможность добавления УЗО:
- предотвращение риска пожара (чувствительность 500 мА);
- защита от выхода двигателя из строя (короткое замыкание пластин магнитопровода) за счет раннего обнаружения токов утечки на землю (чувствительность 300 мА - 30 А).



**Рис. N67:** Характеристики отключения для комбинации «автоматический выключатель + контактор + тепловое реле» (1)

## Заключение

Комбинация «автоматический выключатель + контактор + тепловое реле» для управления и защиты цепей двигателя позволяет обеспечить:

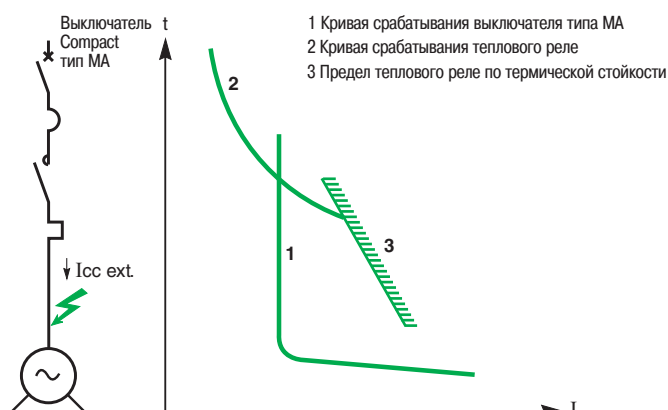
- Снижение объема техобслуживания установки. Как правило, такое снижение требуется для предприятий сферы обслуживания, малых и средних промышленных предприятий.
- Дополнительные функции, предусмотренные техническим заданием.
- Технические требования на отключение нагрузки для проведения техобслуживания.

## Основные элементы правильной координации

### «выключатель + пускатель»

Стандарты точно определяют элементы, которые необходимо учесть для обеспечения соответствующей координации типа 2:

- Абсолютная совместимость теплового реле пускателя и электромагнитного расцепителя выключателя. На **рис. N68** тепловое реле защищено, если его предельная граница по термической стойкости расположена справа от кривой срабатывания электромагнитного расцепителя выключателя. В случае использования автоматического выключателя, имеющего как электромагнитную, так и тепловую защиту, координация должна быть обеспечена проектировщиком.



(1) В большинстве случаев короткие замыкания возникают в двигателе, так что ток ограничивается кабелем и проводкой пускателя. Такие короткие замыкания называются замыканиями через сопротивление.

**Рис. N68:** Предел теплового реле по термической стойкости должен быть справа от кривой срабатывания электромагнитного расцепителя выключателя

Невозможно рассчитать отключающую способность при КЗ для комбинации выключатель + контактор. Только лабораторные испытания, проводимые изготовителями, позволяют определить это значение. Так, компания Schneider Electric приводит соответствующую таблицу для комбинации выключателей Multi 9 и Compact типа MA, с различными типами пускателей.

■ Отключающая способность контактора должна быть выше, чем ток уставки электромагнитного расцепителя выключателя.

■ При коротком замыкании поведение контактора и его теплового реле должно соответствовать требованиям выбранного типа координации.

### Отключающая способность при коротком замыкании для комбинации «автоматический выключатель + контактор»

Отключающая способность при КЗ, которая должна сравниваться с ожидаемым током КЗ, определяется следующим образом:

■ Как отключающая способность комбинации «выключатель + контактор», если выключатель расположен в непосредственной близости от контактора (см. **рис. N69**) в одной секции шкафа управления двигателем. Короткое замыкание за комбинацией ограничивается, в некоторой степени, полными сопротивлениями контактора и теплового реле. Поэтому, такая комбинация может использоваться в цепи, для которой ожидаемый уровень тока КЗ превышает номинальную отключающую способность при КЗ для выключателя. Эта возможность часто представляет значительное экономическое преимущество.

■ Или как отключающая способность только выключателя в случае, когда контактор отделен от выключателя (см. **рис. N70**) при существовании риска короткого замыкания между контактором и выключателем.

### Выбор электромагнитного расцепителя мгновенного действия для выключателя

Уставка срабатывания этого расцепителя не должна быть меньше  $12 I_n$  для предотвращения внезапного отключения из-за первого пика тока при пуске.

### Дополнительные средства защиты

Дополнительные средства защиты включают в себя:

- тепловые датчики в двигателе (обмотки, подшипники, каналы охлаждающего воздуха и т.д.);
- многофункциональные устройства защиты (совокупность функций);
- устройства защиты от однофазного замыкания на корпус двигателя.

#### Тепловые датчики

Используются для обнаружения ненормального повышения температуры в двигателе путем непосредственного измерения. Как правило, эти датчики встроены в обмотки статора (для низковольтных двигателей). Сигналы датчиков обрабатываются соответствующим управляющим устройством, отключающим контактор или выключатель (см. **рис. N71**).

#### Многофункциональное реле защиты двигателя от повреждения

Многофункциональное реле, связанное с рядом датчиков и блоками индикации, обеспечивает защиту двигателя и приводной машины. Выполняет функции защиты в следующих случаях:

- тепловая перегрузка;
- экстренное торможение двигателя или затянувшийся пуск;
- перегрев;
- несимметрия фазных токов, обрыв одной фазы, обратное вращение;
- замыкание на землю (при наличии УЗО);
- холостой ход, затянутый пуск.

Основные преимущества:

- комплексная защита, обеспечение надежного эффективного и непрерывного контроля/управления;
- эффективный контроль всех технологических режимов двигателя;
- сигнализация и индикация;
- возможность передачи данных по сети связи.

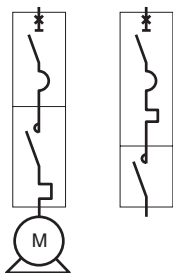
Пример: реле LR6 Telemecanique с функцией непрерывного контроля/управления и связью по шине или блок контроля неисправностей LUCM и модуль связи для TeSys модели U.

### Превентивная защита для длительно простаивающих двигателей

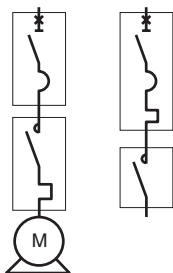
Эта защита связана с непрерывным контролем уровня сопротивления изоляции простаивающего двигателя. Такой контроль позволяет предотвратить отрицательные последствия повреждения изоляции в процессе работы, включая:

- отказ при запуске или ненадлежащая работа двигателя, используемого в аварийных системах;
- производственные потери.

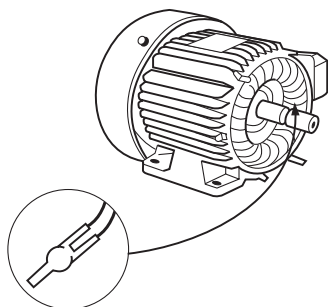
Этот тип защиты необходим для редко используемых двигателей часто находящихся в условиях высокой влажности и/или содержания пыли. Такая защита предотвращает выход двигателя из строя из-за замыкания на землю при пуске (одно из наиболее частых повреждений) путем предупреждения о необходимости техобслуживания для восстановления двигателя до удовлетворительного рабочего состояния.



**Рис. N69:** Выключатель и контактор, установленные в непосредственной близости



**Рис. 70:** Выключатель и контактор, установленные отдельно



**Рис. N71:** Защита от перегрева с помощью тепловых датчиков

N52



Пример применения:

Система противопожарной защиты, «спринклерные» насосы, ирригационные насосы для сезонных работ и т.д.

Пример: реле Vigilohm SM21 (Merlin Gerin) обеспечивает непрерывный контроль изоляции двигателя а также звуковую и визуальную сигнализацию любого ненормального снижения уровня сопротивления изоляции. Кроме того, при необходимости реле может предотвращать любую попытку запуска двигателя (см. **рис. N72**).

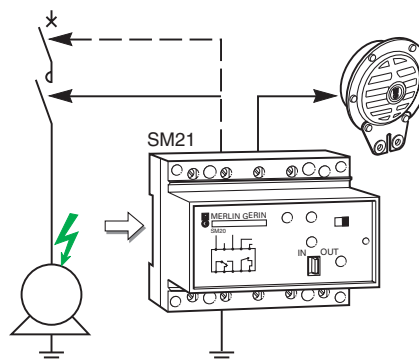


Рис. N72: Превентивная защита длительно простаивающих двигателей

### Устройства защиты, реагирующие на малые токи

Дифференциальные устройства защиты нулевой последовательности (УЗО) могут обладать высокой чувствительностью и обнаруживать низкие значения тока утечки на землю при повреждении изоляции (физическое повреждение, загрязнение, чрезмерная влажность и т.д.). Некоторые модели УЗО (с сухими контактами, специального назначения) обеспечивают:

- Предотвращение выхода двигателя из строя при межвитковых коротких замыканиях в обмотке статора. Такое устройство защиты может обнаруживать медленно развивающееся повреждение при токах утечки в диапазоне 300 мА – 30А с учетом характеристик двигателя (чувствительность: приблизительно 5%  $I_n$ ).
- Снижение риска пожара: чувствительность  $\leq 500$  мА.

Например, реле RH99M (Merlin Gerin) обеспечивает (см. **рис. N73**):

- 5 уровней чувствительности (0,3, 1, 3, 10, 30 А);
- селективность или возможность учета конкретного режима работы за счет трех возможных выдержек времени (0, 90, 250 мс);
- автоматическое отключение при повреждении цепи от ТТНП до реле;
- защиту от ложных отключений;
- чувствительность к постоянной составляющей тока замыкания: класс А.

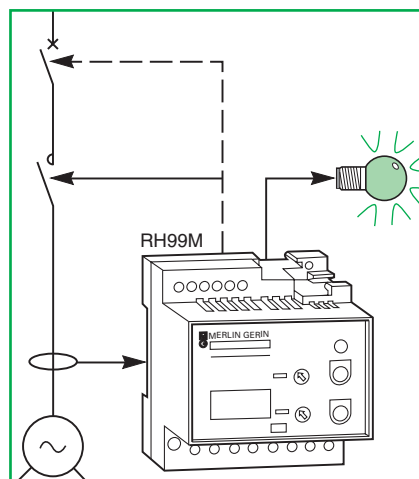


Рис. N73: Пример использования реле RH99M



Важность ограничения снижения напряжения на двигателе при пуске

Для того, чтобы двигатель запускался и достигал номинальной скорости за соответствующее время, момент двигателя должен превышать момент нагрузки как минимум на 70%. Однако, пусковой ток намного превышает ток двигателя при полной нагрузке. В результате, отмечается крайне высокий уровень снижения напряжения, момент двигателя значительно уменьшается (момент двигателя пропорционален  $U^2$ ), что может привести (в крайнем случае) к невозможности запуска двигателя.

Пример:

- При напряжении 400 В, поддерживаемом на зажимах двигателя, его момент в 2,1 раза превышает момент нагрузки.
- При снижении напряжения на 10% при пуске момент двигателя составит  $2,1 \times 0,9^2 = 1,7$  раз выше момента нагрузки, и двигатель нормально выйдет на свои номинальные обороты.
- При снижении напряжения на 15% при пуске момент двигателя составит  $2,1 \times 0,85^2 = 1,5$  раз выше момента нагрузки – время пуска двигателя будет выше нормы.

Как правило, рекомендуемое максимально допустимое отклонение напряжения от номинального при пуске двигателя составляет 10%  $U_n$ .

5.4 Максимальные мощности двигателей, питающихся от низковольтной сети

Нарушения, возникающие в низковольтных распределительных сетях при прямом пуске мощных двигателей переменного тока, могут создавать значительные проблемы для соседних потребителей. Поэтому большинство электрических сетей общего пользования установило строгие правила, направленные на ограничение таких нарушений до допустимых уровней. Величина возмущения, создаваемого данным двигателем, зависит от «прочности» сети, т.е. от уровня тока КЗ в соответствующей точке. Чем выше ток КЗ, тем «прочнее» сеть и меньше возмущение (главным образом отклонение или колебание напряжения), испытываемое соседними потребителями. Типовые значения максимального допустимого пускового тока и соответствующие значения максимальной номинальной мощности для двигателей с питанием непосредственно от сети приводятся на **рис. N74** и **Рис. N75** (эти значения применяются для распределительных сетей многих стран).

Тип двигателя	Местоположение	Максимальный пусковой ток (А)	
		Воздушная сеть	Подземная кабельная сеть
Однофазный	Жилые помещения	45	45
	Другие помещения	100	200
Трёхфазный	Жилые помещения	60	60
	Другие помещения	125	250

Рис. N74: Максимальные допустимые значения пускового тока для низковольтных двигателей с питанием непосредственно от сети (230/240В)

Местоположение	Тип двигателя	400 В, 3 фазы	
		Прямой пуск при полной нагрузке (кВт)	Другие методы пуска (кВт)
Жилые помещения	230 В (кВт), 1 фаза	5.5	11
Другое	Воздушная линия	11	22
	Подземная кабельная сеть	22	45

Рис. N75: Максимальные допустимые значения номинальной мощности для низковольтных двигателей с прямым пуском

Поскольку даже в зонах питания только от одной сети НН существуют как «слабые» участки сети, так и «сильные», рекомендуется заключать соглашение с поставщиком электроэнергии перед приобретением двигателей под новый проект.

Существуют другие (но, как правило, большей стоимости) альтернативные методы пуска, которые снижают большие пусковые токи двигателей до приемлемых уровней; например, пускатель с переключением со «звезды» на «треугольник», двигатели с фазным ротором, устройства плавного пуска и т.д.

5.5 Компенсация реактивной мощности

Вопросы компенсации реактивной мощности рассмотрены в разделе L.

Содержание		
1	<b>Жилые помещения и коттеджи</b>	<b>P2</b>
	1.1 Общие положения	P2
	1.2 Элементы распределительных щитов	P2
	1.3 Защита людей	P4
	1.4 Силовые цепи	P6
	1.5 Защита от перенапряжений и грозовых разрядов	P7
2	<b>Ванные и душевые комнаты</b>	<b>P8</b>
	2.1 Классификация зон	P8
	2.2 Уравнивание потенциалов	P11
	2.3 Требования, предусмотренные для каждой зоны	P11
3	<b>Советы по устройству электроустановок для специальных помещений и зон</b>	<b>P12</b>

Жилые помещения предъявляют к электроустановкам высокие требования по безопасности и надёжности

В сетях общего пользования нейтральная точка обмотки низкого напряжения понижающего распределительного трансформатора обычно заземляется.  
Все наружные токоведущие части должны быть соединены друг с другом и заземлены.

Качество электрооборудования, используемого в жилых помещениях, обычно гарантируется знаком соответствия, расположенным на передней части каждого устройства.

## 1.1 Общие положения

### Стандарты

В большинстве стран правила устройства (проектирования и монтажа) электроустановок для жилых и сходных с ними помещений регулируются региональными обязательными для строгого соблюдения нормативами и/или техническими требованиями. Соответствующим международным стандартом является МЭК 60364.

### Электрическая сеть

В подавляющем большинстве сетей общего пользования нейтральная точка обмотки низкого напряжения понижающего распределительного трансформатора заземляется.

В силу этого, защита людей от поражения электрическим током строится на принципе, описанном в главе F. Принимаемые меры зависят от того, какая система заземления используется: TT, TN или IT.

Для установок, заземлённых по системе TT и IT необходимы устройства защитного отключения (УЗО). В установках, заземлённых по схеме TN, мгновенные расцепители при КЗ или устройства защитного отключения (УЗО) могут обеспечивать защиту от косвенного прикосновения. Для обеспечения защиты переносных электроприемников, а также для улучшения защиты от пожара, вызванного перегрузками и замыканиями в электросети, должны использоваться УЗО.

## 1.2 Элементы распределительных щитов (см. рис. P1)

В распределительных щитах (в жилых помещениях, как правило, бывает только один из них) обычно ставится счётчик(и), а в некоторых случаях (особенно когда организациями электроснабжения подписывается применение схемы заземления TT и/или ставятся тарифные условия, ограничивающие максимально допустимый потребляемый ток) – дифференциальный автоматический выключатель - ограничитель, который отключает питание при повышенном токе. Абонент электросети обладает свободным доступом к этому выключателю.

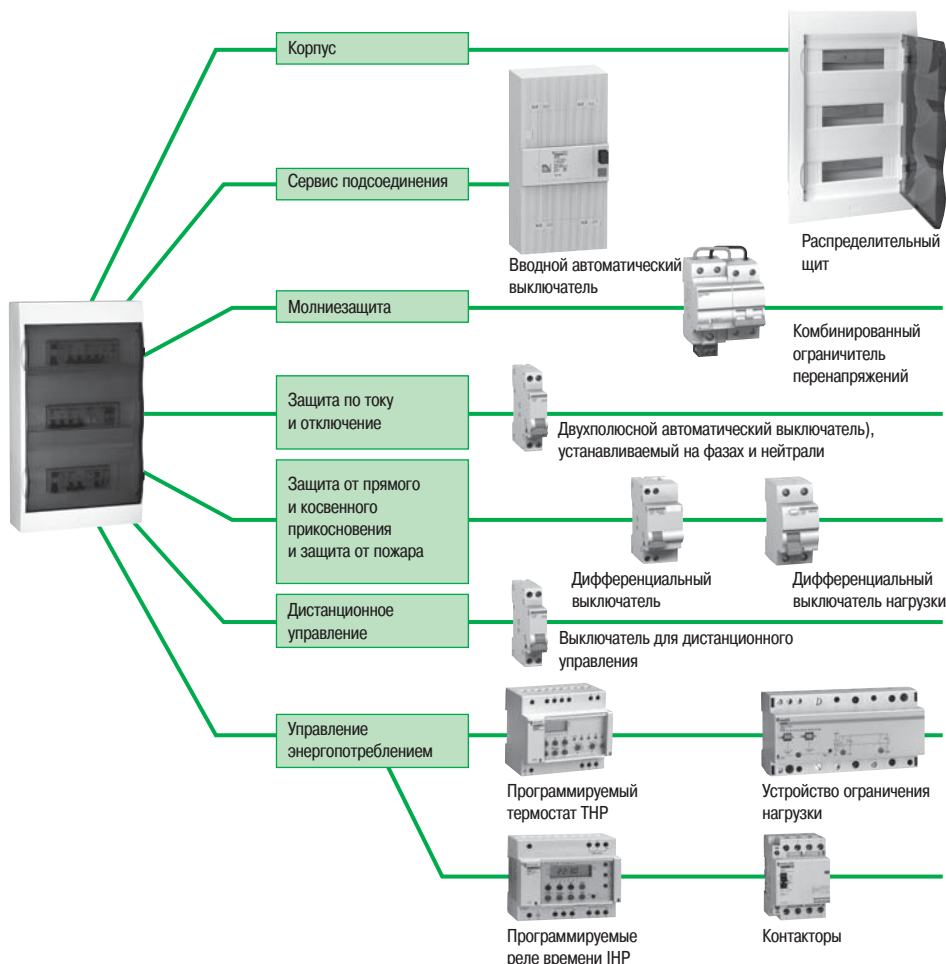


Рис. P1: Функции, реализуемые в абонентском щитке



Рис. P3: Вводной автоматический выключатель

Установки, заземлённые по системе «TN», поставщик электроэнергии обычно защищает с помощью герметичных плавких предохранителей, включаемых в цепь непосредственно перед входными зажимами счётчика (счётчиков) (см. рис. P2). У абонента нет доступа к этим предохранителям.

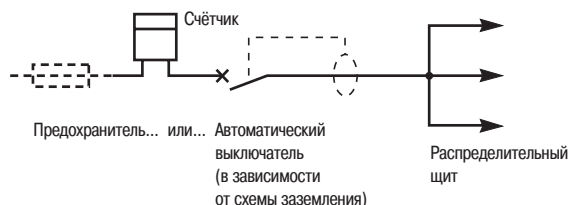


Рис. P2: Компоненты контрольно-распределительного щита

## Вводной автоматический выключатель (см. рис. P3)

Абоненту разрешается, при необходимости, включать/отключать этот выключатель (например, повторно включать его, если потребляемый ток превысил допустимый предел; отключать его в аварийных ситуациях или для отключения силовых цепей).

Номинальный ток нулевой последовательности вводного автоматического выключателя для защиты от замыканий на землю должен быть 300 мА.

Если используется схема заземления «TT», сопротивление заземляющего электрода должно быть менее  $166 \text{ Ом}$   $R = \frac{50 \text{ В}}{300 \text{ мА}} = 166 \text{ Ом}$ . На практике, сопротивление заземляющего электрода любой новой электроустановки должно быть менее  $80 \text{ Ом}$  ( $\frac{R}{2}$ ).

## Контрольно-распределительный щит (абонентский блок) (см. рис. P4)

В щит входят:

- панель для монтажа (при необходимости) автоматического выключателя электропитания и другого дополнительного контрольного оборудования (при необходимости);
- распределительная панель для крепления 1, 2 или 3 рядов (24 устройств типа Multi 9 или подобных автоматических выключателей, или блоков предохранителей и т. п.);
- монтажные материалы для крепления неподвижных проводников, рейки для крепления автоматических выключателей, основания предохранителей, нулевая и заземляющая шины и т. д.;
- кабельные лотки или трубы, проложенные по поверхности или в кабельных желобах, смонтированных в стену.

**Внимание:** чтобы в будущем в систему было легче вносить изменения, все соответствующие документы (фотографии, схемы, графики и т. п.) рекомендуется держать в доступном месте, близком к распределительному щиту.

Щит должен устанавливаться на такой высоте, чтобы рукоятки приборов, шкалы и индикаторы счётчиков были на расстоянии 1 — 1,8 м от пола (при наличии людей с физическими недостатками или пожилых людей — на расстоянии 1,3 м от пола).

## Ограничители перенапряжений

В установках низкого напряжения, содержащих чувствительное (например, электронное) оборудование, настоятельно рекомендуется применять ограничители перенапряжений, включаемые в питающую цепь системы.

Эти устройства должны автоматически отключаться от системы в случае замыкания или защищаться автоматическим выключателем. В случае жилых помещений, использование дифференциального автоматического выключателя на 300 мА типа S (т.е. с небольшой выдержкой времени) обеспечит эффективную защиту от замыкания на землю, и в то же время такой выключатель не будет без надобности отключаться каждый раз, когда срабатывает ограничитель перенапряжений.

## Сопротивление заземляющего электрода

В случаях, когда сопротивление заземления превышает 80 Ом, надо установить одно или несколько устройств защиты (УЗО) номиналом в 30 мА.



Рис. P4: Контрольно-распределительный щит

Если, при системе заземления «TT», величины сопротивления заземляющего электрода в 80 Ом достичь не удаётся, надо установить УЗО номиналом в 30 мА, чтобы обеспечить защиту от замыканий на землю.

При использовании системы заземления типа «ТТ», соответствующие стандарты для обеспечения защиты людей предписывают применение УЗО

## 1.3 Защита людей

В системах с заземлением типа «ТТ» защита людей обеспечивается следующими мерами:

- Защита от опасности косвенного прикосновения - устройствами защитного отключения (УЗО) (см. рис. Р5 ) средней чувствительности (300 мА) на вводе установки (входящими в состав вводного автоматического выключателя или питающей линии распределительного щита). У абонента должно быть установлено заземляющее устройство, к которому должны подсоединяться защитные заземляющие провода РЕ от открытых проводящих частей всех электроприборов и электрооборудования с классом изоляции I, а также от заземляющих контактов всех розеток.
- Если автоматический выключатель на вводе не включает УЗО, то для обеспечения безопасности людей все оборудование и цепи должны иметь класс изоляции II (на участке сети от ввода до первого УЗО). Если корпус распределительного щита металлический, все части, находящиеся под напряжением должны иметь двойную изоляцию (путём применения дополнительных зазоров или изоляции, использования крышек), а проводка надёжно закреплена.
- Обязательная защита цепей розеток, цепей питания ванных комнат, помещений для стирки чувствительными УЗО номиналом в 30 мА (все подробности применения УЗО для этих целей даны в пункте 3 этой главы).

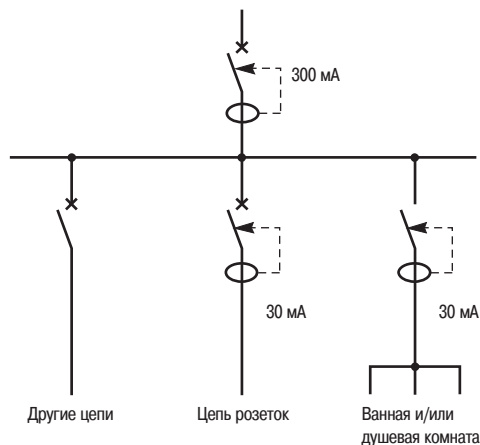


Рис. Р5: Система с вводным автоматическим выключателем, имеющим встроенную дифференциальную защиту

### Вводной автоматический выключатель с модулем УЗО мгновенного действия

В этом случае:

- пробой изоляции на землю может привести к отключению всей установки;
- если в системе установлен ограничитель перенапряжений, его срабатывание (т.е. отвод импульса перенапряжения в землю) может быть воспринято УЗО как замыкание на землю, вследствие чего оно отключит установку

#### Оборудование, рекомендуемое компанией Merlin Gerin:

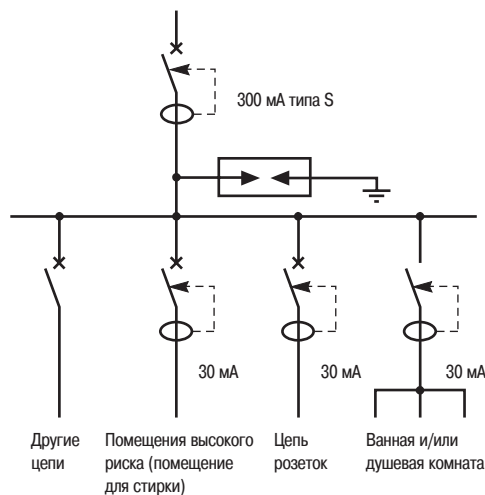
- Вводной автоматический выключатель с встроенным УЗО на 300 мА.
- В цепях питания розеток – УЗО на 30 мА (к примеру, дифференциальный автоматический выключатель 1P + N типа DPN N Vigi).
- В цепях питания ванных, душевых, помещений для стирки (освещение, отопление, розетки) – УЗО на 30 мА (к примеру, дифференциальный выключатель нагрузки типа ID).

### Вводной автоматический выключатель с модулем УЗО, имеющем выдержку времени (типа S)

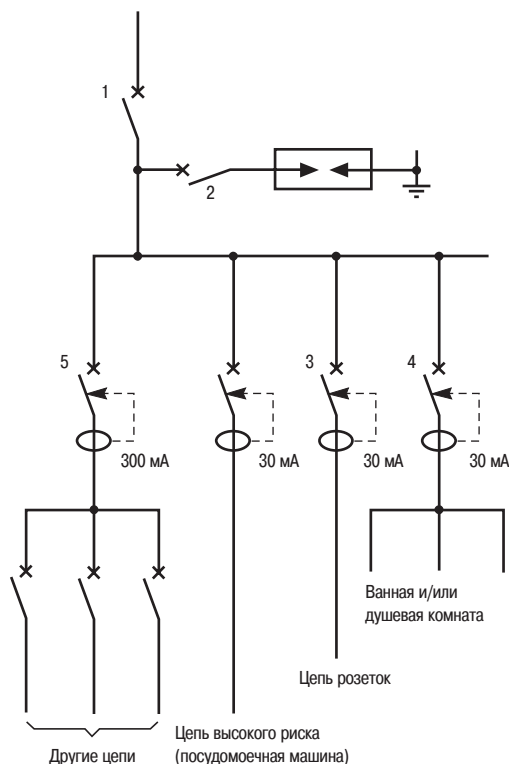
Этот тип автоматического выключателя защищает от замыкания на землю, но благодаря небольшой выдержке времени позволяет работать нижестоящим УЗО, оставаясь при этом во включенном состоянии. Таким образом, в случаях грозových разрядов или при других перенапряжениях отключение вводного автоматического выключателя такого типа и его последствия (к примеру, размораживание холодильника) становятся менее вероятными. Ток разряда на землю через ограничитель перенапряжений не вызовет отключение выключателя типа S.

**Оборудование, рекомендуемое компанией Merlin Gerin (см. рис. P6):**

- Вводной автоматический выключатель с модулем УЗО на 300 мА типа S.
- В цепях питания стиральных и посудомоечных машин – УЗО на 30 мА (к примеру, дифференциальный автоматический выключатель 1P + N типа Vigi).
- В цепях питания ванных, душевых, помещений для стирки (освещение, отопление, розетки) – УЗО на 30 мА (к примеру, дифференциальный выключатель нагрузки типа ID clic).



**Рис. P6:** Установка с вводным автоматическим выключателем в состав которого входит модуль УЗО с небольшой выдержкой времени (тип S)



**Рис. P7:** Система с вводным автоматическим выключателем без УЗО

## Вводной автоматический выключатель без УЗО

В этом случае безопасность людей должна обеспечиваться:

- изоляцией класса II всех цепей до выходных зажимов УЗО;
  - все выходные цепи распределительного щита должны защищаться УЗО номиналом в 30 мА или 300 мА в зависимости от типа соответствующих цепей, как описано в главе F.
- Если ограничитель перенапряжений включается в сеть перед распределительным щитом (для защиты чувствительного электронного оборудования, такого как микропроцессорная техника, видеомониторы, телевизоры, электронные кассовые аппараты и т. п.), то в случае его отказа (который случается редко, но всегда возможен), это устройство обязательно должно автоматически отключаться от установки. В некоторых устройствах применяются заменяемые плавкие предохранители. Однако, рекомендуемый метод, как показано на Рис. P7 (поз. 2) – использование автоматического выключателя.

**Оборудование, рекомендуемое компанией Merlin Gerin:**

На рис. P7 цифрами обозначены:

1. Вводной автоматический выключатель без УЗО
2. Автоматическое отключающее устройство (если установлен ограничитель перенапряжений)
3. В каждой цепи, питающей одну или более розеток, – УЗО номиналом в 30 мА (к примеру, дифференциальный автоматический выключатель 1P + N типа Vigi)
4. В цепях питания ванных, душевых, помещений для стирки и т.п. (освещение, отопление, розетки) – УЗО номиналом в 30 мА (к примеру, дифференциальный выключатель нагрузки типа ID) или дифференциальный автоматический выключатель на 30 мА на каждой цепи
5. Во всех остальных цепях – УЗО на 300 мА (к примеру, дифференциальный выключатель нагрузки)

Распределение и разделение цепей обеспечивает удобство в работе и облегчает выявление места замыкания.

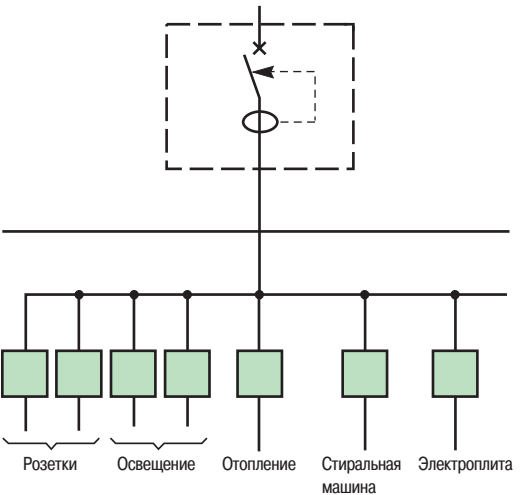


Рис. Р8: Подразделение цепей по типу использования

МЭК и большинство внутренних стандартов различных стран требуют включения защитного провода во все силовые цепи.

## 1.4 Силовые цепи

### Разделение на типы

Внутренние стандарты различных стран повсеместно рекомендуют разделять силовые цепи в соответствии с типом нагрузки (см. рис. Р8):

- не менее одной цепи для освещения; каждая цепь питает не более 8 точек;
- не менее одной цепи для розеток номиналом в 10/16 А; каждая цепь питает не более 8 розеток. Розетки могут быть одинарными и двойными (двойные розетки состоят из двух розеток номиналом в 10/16 А, монтируемых в общей рамке в углублённой в стену коробке).
- одна цепь для каждого бытового прибора такого типа, как водонагреватель, стиральная машина, посудомоечная машина, электроплита, холодильник и т. п. На рис. Р9 приведено рекомендуемое количество розеток (10/16 А или подобных) и неподвижных точек освещения в соответствии с назначением соответствующих комнат жилого помещения

Назначение комнаты	Наибольшее кол-во неподвиж. точек освещ.	Наименьшее кол-во розеток на 10/16 А
Жилая комната	1	5
Спальня, комната отдыха, кабинет, столовая	1	3
Кухня	2	4 (1)
Ванная, душевая	2	1 или 2
Прихожая, кладовая	1	1
Туалет, складское помещение	1	-
Помещение для стирки	-	1

(1) 2 из них – над рабочей поверхностью, а одна – для специальной цепи: дополнительно устанавливаются отдельная розетка на 16 или 20 А для плиты и соединительная коробка или розетка для специальной цепи на 32 А

Рис. Р9: Рекомендуемое минимальное количество точек освещения и точек электропитания в жилых помещениях

### Защитные провода

МЭК и большинство внутренних стандартов различных стран требуют наличия в каждой цепи защитного проводника. Это особенно рекомендуется при использовании бытовых приборов и оборудования, с классом изоляции I, что бывает чаще всего. При вводе системы в эксплуатацию защитные проводники должны соединять заземляющий контакт в каждой из розеток и клеммы заземления оборудования класса I с главной заземляющей шиной на вводе установки. Кроме того, контактные отверстия розеток на 10/16 А (или подобного номинала) должны быть снабжены защитными шторками.








### Сечения проводников (см. рис. Р10)

Сечения проводников и максимально допустимый ток соответствующего защитного устройства зависят от величины тока цепи, температуры среды, типа электроустановки и влияния соседних цепей (см. главу G). Кроме того, проводники фазных проводов, нулевого провода и защитных проводов каждой конкретной цепи должны все быть равного сечения (если эти проводники делаются из одинакового материала, т.е. все из меди или все из алюминия).



Рис. Р10: Автоматический выключатель 1 фаза + N

На **рис. P11** приведены сечения проводников, требующиеся для повсеместно используемых бытовых приборов. Защитные устройства типа «1 фаза + N» соответствуют требованиям по отключению, а также, по сечению подключаемых проводников.

Тип цепи: однофазная, 230 В 1 фаза + N или 1 фаза + N + PE		Сечение проводников	Максимальная мощность	Защитное устройство	
Неподвижный источник света		1.5 мм <sup>2</sup> (2.5 мм <sup>2</sup> )	2,300 Вт	Автомат. выключатель	16 А
10/16 А		2.5 мм <sup>2</sup> (4 мм <sup>2</sup> )	4,600 Вт	Автомат. выключатель	25 А
Цепи с индивидуальной нагрузкой Водонагреватель		2.5 мм <sup>2</sup> (4 мм <sup>2</sup> )	4,600 Вт	Автомат. выключатель	25 А
Посудомоечная машина		2.5 мм <sup>2</sup> (4 мм <sup>2</sup> )	4,600 Вт	Автомат. выключатель	25 А
Стиральная машина		2.5 мм <sup>2</sup> (4 мм <sup>2</sup> )	4,600 Вт	Автомат. выключатель	25 А
Электроплита или электроплитка <sup>(1)</sup>		6 мм <sup>2</sup> (10 мм <sup>2</sup> )	7,300 Вт	Автомат. выключатель	40 А
Электрический обогреватель		1.5 мм <sup>2</sup> (2.5 мм <sup>2</sup> )	2,300 Вт	Автомат. выключатель	16 А
				Предохранитель	10 А

(1) В трёхфазной цепи напряжением 230/400 В сечение медных проводников равно 4 мм<sup>2</sup>, а алюминиевых — 6 мм<sup>2</sup>. Защита обеспечивается автоматическим выключателем на 32 А или предохранителями на 25 А.

**Рис. P11:** Сечение проводников и номинальный ток защитных устройств в домашних электроустановках (в скобках указано сечение алюминиевых проводников)

## 1.5 Защита от перенапряжений и грозовых разрядов

Выбор ограничителя перенапряжений описан в главе J.

### Правила

Надо соблюдать три основных правила:

- 1 - Для установки ограничителя перенапряжений надо обязательно применять три отдельных провода, каждый длиной не более 50 см:
  - провод, подсоединяемый к автоматическому выключателю ограничителя и находящийся под напряжением;
  - провод от автоматического выключателя к ограничителю перенапряжений;
  - провод от ограничителя перенапряжений к заземляющей шине главного распределительного щита (не путать с главным заземляющим проводником электроустановки).

Заземляющая шина главного распределительного щита должна находиться в том же шкафу, что и ограничитель перенапряжений.

- 2 - Необходимо использовать выключатель того типа, который рекомендует производитель ограничителя.

- 3 - Для обеспечения бесперебойности электроснабжения рекомендуется устанавливать автоматический выключатель с выдержкой времени.



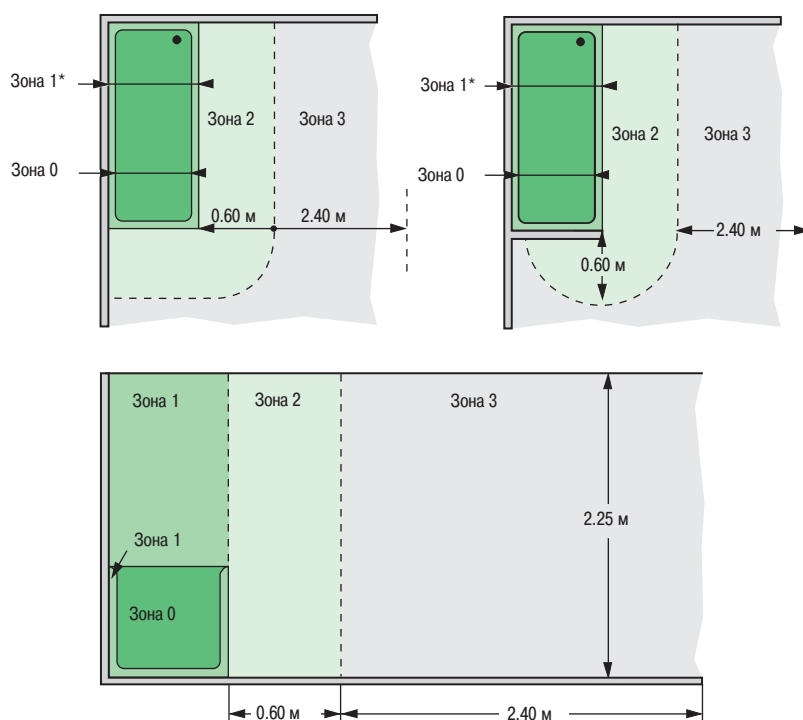
Поскольку человеческое тело при его увлажнении или погружении в воду обладает очень низким сопротивлением, ванные и душевые комнаты являются помещениями с повышенной опасностью. В силу этого, для данных помещений предусмотрены серьёзные меры предосторожности и действуют более строгие правила, чем для большинства прочих видов помещений. Данная область регулируется стандартом МЭК 60364-7-701.

Требуемые к соблюдению предосторожности базируются на трёх принципах:

- Разграничение на зоны, обозначаемые как зоны 0, 1, 2 и 3, в которых размещение (или удаление из которых) какого-либо электрооборудования строго ограничено или запрещено, а если разрешено, то для него предусматриваются требования по электрической или механической защите.
- Обеспечение уравнивания потенциалов всех открытых проводящих частей и металлических частей неэлектрического назначения в соответствующих зонах.
- Строгое соблюдение требований, предусматриваемых для каждой из зон, приведенных в пункте 3.

### 2.1 Классификация зон

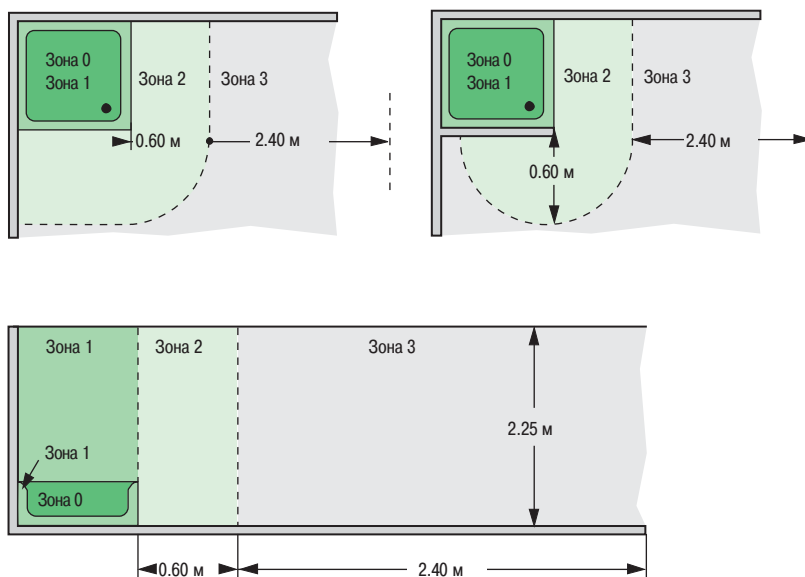
Разграничение на зоны 0, 1, 2 и 3, предусмотренное подпунктом 701.32 стандарта МЭК 60364-7-701, производится согласно следующим схемам (см. **рис. 12 -18** на этой и следующих страницах):



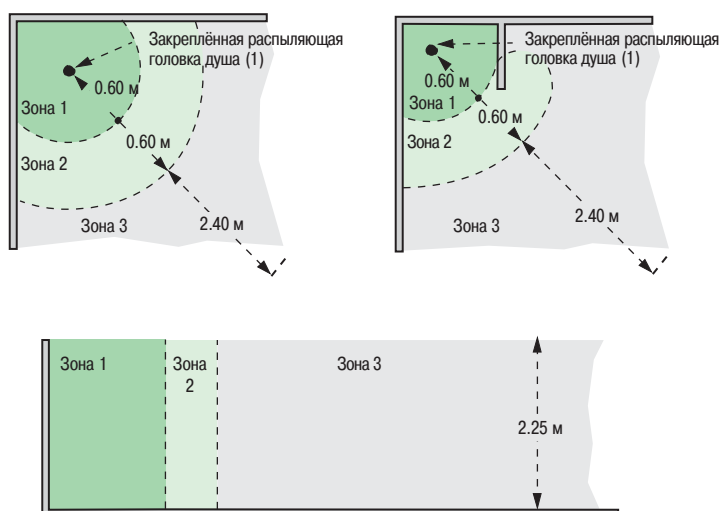
(\*) Зона 1 включает в себя пространство над ванной, как показано на вертикальной проекции.

**Рис. P12:** Разграничение на зоны 0, 1, 2 и 3 в зависимости от близости к ванне

## 2 Ванные и душевые комнаты

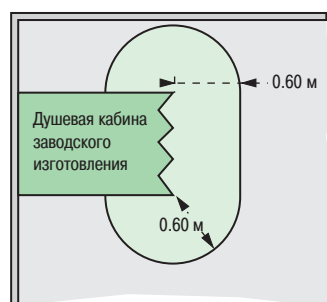


**Рис. P13:** Разграничение на зоны 0, 1, 2 и 3 в зависимости от близости к душу с поддоном для мытья



(1) Если распыляющая головка душа установлена на конце гибкого шланга, принимается, что радиус для определения границ зон начинается в точке прикрепления шланга к смесителю.

**Рис. P14:** Разграничение на зоны 0, 1, 2 и 3 в зависимости от близости к душу без поддона для мытья



**Рис. P15:** В пределах 60 см от дверного проёма в кабине душа не допускается установка никаких розеток и выключателей

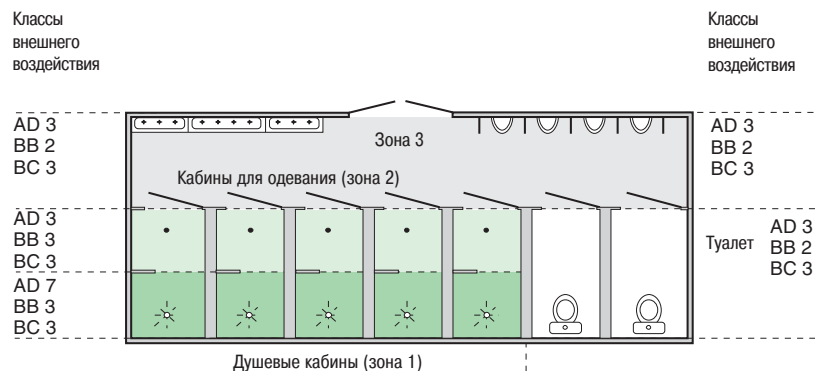


Рис. Р16 : Общие душевые со смежными душевыми кабинками и кабинками для одевания

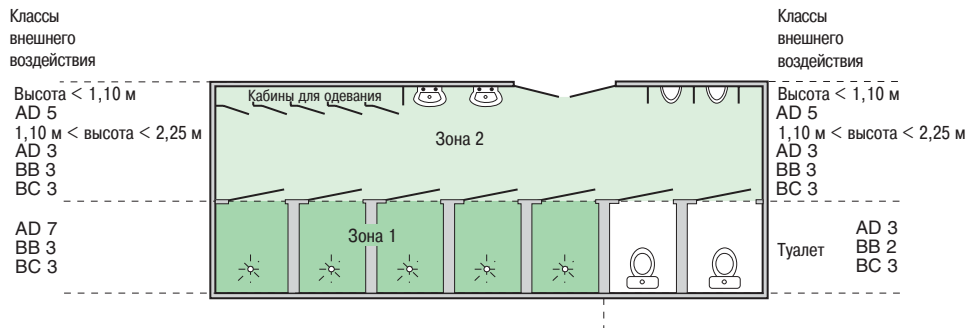
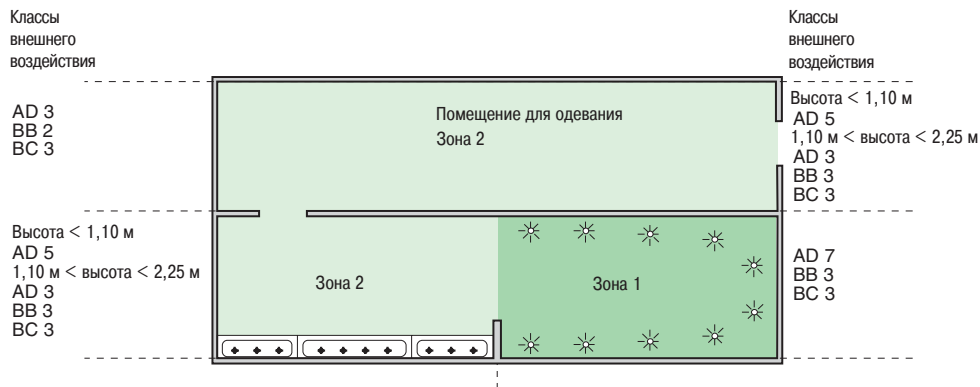


Рис. Р17: Общие душевые с отдалёнными друг от друга душевыми кабинками и кабинками для одевания



P10

Рис. Р18: Душевая с общими помещениями для принятия душа и одевания

Примечание: классы внешних воздействий (см. рис. Е46).

### 2.2 Уравнивание потенциалов (см. рис. 19)

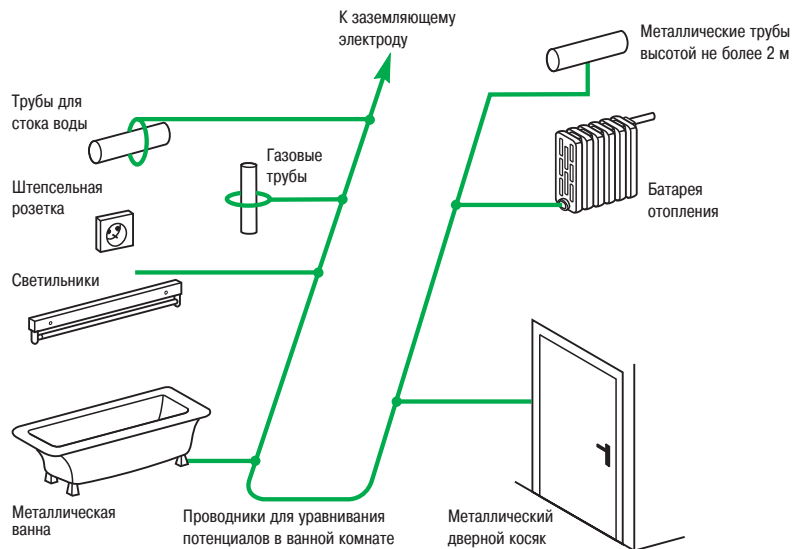


Рис. Р19: Дополнительное уравнивание потенциалов в ванной

### 2.3 Требования, предусмотренные для каждой зоны

В таблице пункта 3 описывается применение принципов, приведенных в предшествующем тексте и в аналогичных ситуациях.

# 3 Советы по устройству электроустановок для специальных помещений и зон

На **рис. P20** ниже представлены основные требования, предусматриваемые многими внутренними стандартами различных стран и международными стандартами.

**Внимание:** в скобках указаны соответствующие разделы стандарта МЭК 60364-7.

Размещение	Принципы защиты	Степень защиты IP	Провода и кабели	Коммутационное оборудование	Штепсельные розетки	Электроприборы
Жилые и прочие помещения	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ заземление системы TT или TN -S</li> <li>■ дифференциальная защита (УЗО)</li> <li>□ 300 мА, если сопротивление заземляющего электрода <math>\leq 80</math> Ом, мгновенное срабатывание или короткая выдержка времени (тип S)</li> <li>□ 30 мА, если сопротивление заземляющего электрода <math>\geq 500</math> Ом</li> <li>■ ограничитель перенапряжений на вводе если: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ питание подаётся по воздушной линии с неизолированными проводниками и если</li> <li>□ число ударов молнии на км<sup>2</sup> &gt; 25</li> </ul> </li> <li>■ защитный заземляющий провод (PE) во всех цепях</li> </ul>	20		<p>Ручяжки управления выключателями и похожими устройствами на распределительных панелях</p> <p>Монтаж на высоте от 1 м до 1.80 м от пола</p>	Защита УЗО номиналом в 30 мА	
Ванные и душевые комнаты (раздел 701)	Дополнительное уравнивание потенциалов в зонах 0, 1, 2 и 3					
Зона 0	Только безопасное сверхнизкое напряжение 12 В	27	Класс II, ограниченный строго до мин.			Специальные электроприборы
Зона 1	Безопасное сверхнизкое напряжение 12 В	25	Класс II, ограниченный строго до мин.			Спец. электроприборы Водонагреватель
Зона 2	Безопасное сверхнизкое напряжение 12 В или УЗО номиналом в 30 мА	24	Класс II, ограниченный строго до мин.			Спец. электроприборы Водонагреватель Светильники класса II
Зона 3		21		Только розетки, защищённые посредством: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ УЗО номиналом в 30 мА;</li> <li>■ разделительного трансформатора;</li> <li>■ безопасным напряжением 50 В</li> </ul>		
Бассейны для плавания (раздел 702)	Дополнительное уравнивание потенциалов в зонах 0, 1 и 2					
Зона 0	Безопасное сверхнизкое напряжение 12 В	28	Класс II, ограниченный строго до мин.			Спец. электроприборы
Зона 1		25	Класс II, ограниченный строго до мин.			Спец. электроприборы
Зона 2		22 (в помещ.) 24 (вне помещ.)		Только розетки, защищённые посредством: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ УЗО номиналом в 30 мА;</li> <li>■ разделительного трансформатора;</li> <li>■ безопасным напряжением 50 В</li> </ul>		
Сауны (раздел 703)		24	Класс II			Адаптированные к температуре
Рабочие места (раздел 704)	Нормированное предельное напряжение (UL), сниженное до 25 В	44	Защита от мех. воздействия		Защита УЗО ном. в 30 мА	
Сельскохозяйственные и садовые сооружения (раздел 705)	Нормированное предельное напряжение (UL), сниженное до 25 В Предотвращение пожаров УЗО номиналом в 500 мА	35			Защита УЗО ном. в 30 мА	
Тесные помещения из проводящих материалов (раздел 706)		2x				<p>Защита:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Переносных инструментов: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ безопасным напряжением;</li> <li>□ разделительным трансформатором</li> </ul> </li> <li>■ Ручных ламп: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ безопасным напряжением</li> </ul> </li> <li>■ Стационар. оборудования: <ul style="list-style-type: none"> <li>□ безопасным напряжением;</li> <li>□ разделительным трансформатором;</li> <li>□ УЗО номиналом в 30 мА;</li> <li>□ спец. дополнительным уравниванием потенциалов</li> </ul> </li> </ul>

**Рис. P20:** Основные требования, предусматриваемые многими внутренними стандартами различных стран и международными стандартами (окончание на следующей странице)

### 3 Советы по устройству электроустановок для специальных помещений и зон

Размещение	Принципы защиты	Степень защиты IP	Провода и кабели	Коммутационное оборудование	Штепсельные розетки	Электроприборы
Фонтаны (раздел 702)	Защита УЗО номиналом в 30 мА и уравниванием потенциалов всех открытых токопроводящих частей и металлических частей неэлектрического назначения					
Обработка информации (раздел 707)	Рекомендуется система заземления TN-S Система TT, если ток утечки ограничен Защитные проводники увеличенного сечения (для алюминия - не менее 10 мм <sup>2</sup> )					
Жилые автоприцепы на стоянках (раздел 708)		55	Гибкий кабель длиной 25 м		Штепсельные розетки должны устанавливаться на высоте 0,8 – 1,5 м от пола Защита цепей УЗО номиналом в 30 мА (одно на 6 розеток)	
Яхты и развлекательные суда (раздел 709)	Длина кабеля для питания развлекательных судов должна быть не более 25 м				Защита цепей УЗО номиналом в 30 мА (одно на 6 розеток)	
Медицинские помещения (раздел 710)	Уравнивание потенциалов медицинских систем, заземлённых их по системе IT				Защита УЗО номиналом в 30 мА	
Выставки, показы и стенды (раздел 711)	Системы заземления TT или TN-S	4x			Защита УЗО номиналом в 30 мА	
Бальнеотерапия (лечение ваннами)	Индивидуальные: см. раздел 701 (главы 0 и 1) Коллективные: см. раздел 702 (главы 0 и 1)					
Автозаправочные станции	Риск взрыва в зонах безопасности		Ограничиваются до минимума			
Транспортные средства	Защита УЗО или дополнительной изоляцией					
Внешние осветительные установки (раздел 714)		23			Защита УЗО номиналом в 30 мА	
Мобильные или транспортируемые энергоблоки (раздел 717)	Не разрешается применение внутри каких бы то ни было энергоблоков системы заземления TN-C				Для всех розеток, к которым подключается оборудование снаружи энергоблока должны использоваться УЗО номиналом в 30 мА	

Рис. P20: Основные требования, предусматриваемые многими внутренними стандартами различных стран и международными стандартами (окончание)



## Глава Q

# Рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости

Содержание		
1	Схемы распределения электроэнергии	Q2
2	Принципы исполнения систем заземления	Q3
3	<b>Конструктивное исполнение</b>	<b>Q5</b>
	3.1 Эквипотенциальные соединения внутри и вне зданий	Q5
	3.2 Улучшение условий эквипотенциальности	Q5
	3.3 Разделение кабелей	Q7
	3.4 Фальшполы	Q7
	3.5 Прокладка кабелей	Q8
	3.6 Применение экранированных кабелей	Q11
	3.7 Сети связи	Q11
	3.8 Ограничители перенапряжений	Q12
	3.9 Стандарты	Q15
4	<b>Механизмы электромагнитной связи и меры противодействия</b>	<b>Q16</b>
	4.1 Общие положения	Q16
	4.2 Гальваническая (кондуктивная) связь	Q17
	4.3 Емкостная связь	Q18
	4.4 Индуктивная связь	Q19
	4.5 Связь посредством излучения	Q20
5	<b>Рекомендации по электропроводке</b>	<b>Q22</b>
	5.1 Классы сигналов	Q22
	5.2 Рекомендации по электропроводке	Q22



# 1 Схемы распределения электроэнергии

Чтобы обеспечить электробезопасность людей и сохранность имущества, необходимо правильно выбрать систему заземления электрической установки. При этом необходимо учитывать влияние различных элементов электроустановки с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости. На **рис. Q1** приведены сводные основные характеристики.

Европейские стандарты (EN 50174-2, параграф 6.4 и EN 50310, параграф 6.3) рекомендуют применять систему заземления TN-S, которая создает наименьшее количество проблем с обеспечением электромагнитной совместимости для электроустановок, содержащих оборудование для обработки информации и телекоммуникационное оборудование.

	TT	TN-S	IT	TN-C
Степень безопасности людей	Хорошая (применение УЗО обязательно)	Хорошая Должна быть обеспечена непрерывность РЕ-проводника в пределах электроустановки		
Степень сохранности имущества	Хорошая	Недостаточная	Хорошая	Недостаточная
	Средняя величина токов короткого замыкания (менее нескольких десятков ампер)	Большой ток короткого замыкания (около 1 кА)	Низкий ток первого КЗ (менее нескольких десятков миллиампер), но большой ток второго КЗ	Большой ток короткого замыкания (около 1 кА)
Эксплуатационная готовность	Хорошая	Хорошая	Высокая	Хорошая
Степень электромагнитной совместимости	Хорошая - опасность перенапряжений - проблемы уравнивания потенциалов - необходимость управления устройствами с большими токами утечки	Отличная - отсутствие серьезных проблем уравнивания потенциалов - необходимость управления устройствами с большими токами утечки - большие токи короткого замыкания (помехи вследствие переходных процессов)	Недостаточная (следует избегать) - опасность перенапряжений - обычные фильтры и ограничители перенапряжений должны выдерживать межфазные напряжения - при наличии в сети конденсаторов УЗО подвержены ложным срабатываниям - эквивалентна системе TN для случая второго замыкания	Недостаточная (запрещается использовать) - общий нулевой рабочий и защитный (РЕ) проводник - циркуляция токов в открытых проводящих частях (наличие электромагнитных помех) - большие токи короткого замыкания (помехи вследствие переходных процессов)

Рис. Q1: Основные характеристики систем заземления

Когда электроустановка содержит оборудование большой мощности (электродвигатели, системы кондиционирования, лифтовое оборудование, элементы силовой электроники и др.), рекомендуется установить для таких электроустановок один или несколько специальных трансформаторов. Питание электроприемников установки должно осуществляться от главного распределителя по радиальной схеме.

Электронные системы (управления/контроля, регулирования, измерения и др.) должны питаться от специального трансформатора с системой заземления TN-S.

Эти рекомендации иллюстрируются ниже на **рис. Q2**.

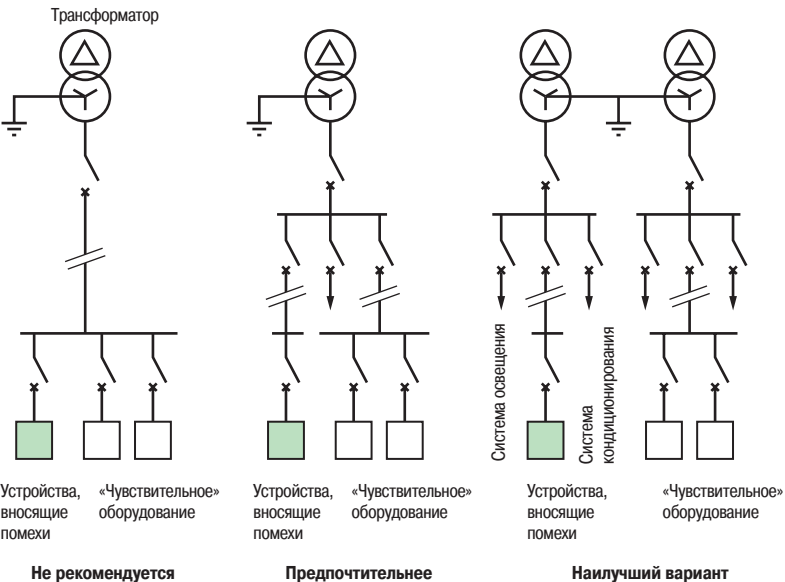


Рис. Q2: Рекомендации по разделению цепей

## 2 Принципы исполнения систем заземления

В данном разделе рассмотрены вопросы заземления и эквипотенциального соединения устройств обработки информации и других аналогичных устройств, электрически связанных между собой, для обмена сигналами.

Системы заземления предназначены для выполнения нескольких функций. Они могут функционировать отдельно или вместе и обеспечивать одну или несколько следующих функций:

- защиту людей от поражения электрическим током;
- защиту оборудования от повреждения электрическим током;
- нулевая точка отсчета потенциала для слаботочных сигналов;
- обеспечение требуемого уровня электромагнитной совместимости.

Система заземления обычно проектируется и устанавливается с целью обеспечить низкое сопротивление, способное отводить токи короткого замыкания и высокочастотные токи от электронных устройств и систем. Существуют различные системы заземления, и для некоторых из них требуется соблюдение специальных условий. Эти условия не всегда выполняются в типичных электроустановках. Представленные в данном разделе рекомендации предназначены именно для таких электроустановок.

Правильно выполненная система заземления и уравнивания потенциалов значительно улучшает электромагнитную совместимость и обеспечивает:

- улучшенную электромагнитную совместимость компьютерных и иных систем;
- соответствие требованиям электромагнитной совместимости директивы ЕЕС 89/336 (излучение помех и устойчивость к помехам);
- возможность надежной работы различного электрооборудования;
- высокий уровень систем безопасности и контроля доступа, а также надежность и/или эксплуатационную готовность системы.

В настоящее время признано, что использование независимых заземлителей, каждый из которых обслуживает отдельную сеть заземления, не только неприемлемо с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости, но и представляет серьезную угрозу для безопасности. Действующие в некоторых странах строительные нормы и правила запрещают применение таких систем.

Использование отдельной «чистой» системы заземления для электронного оборудования и «грязной» системы заземления для силового оборудования не рекомендуется с точки зрения обеспечения требуемой электромагнитной совместимости, даже если используется один заземлитель (рис. Q3 и рис. Q4). При разряде молнии в электроустановке возникнут высокочастотные возмущения, ток короткого замыкания и переходные токи. Возникшие в результате этого переходные напряжения приведут к повреждению или выходу электроустановки из строя. Если монтажные работы и работы по техническому обслуживанию проводятся должным образом, применение такого подхода допускается (для промышленной частоты 50 Гц), но обычно он неприемлем с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости и не рекомендуется для основного применения.

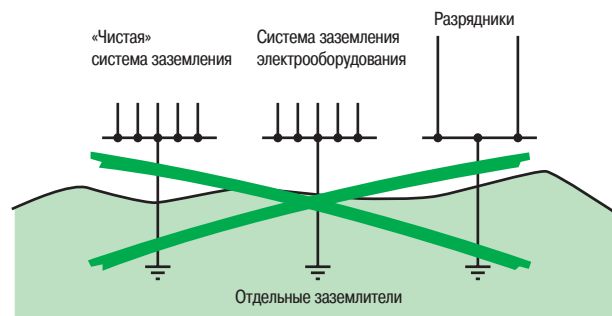


Рис. Q3: Применение независимых заземляющих электродов обычно неприемлемо с точки зрения безопасности и обеспечения электромагнитной совместимости

Q3

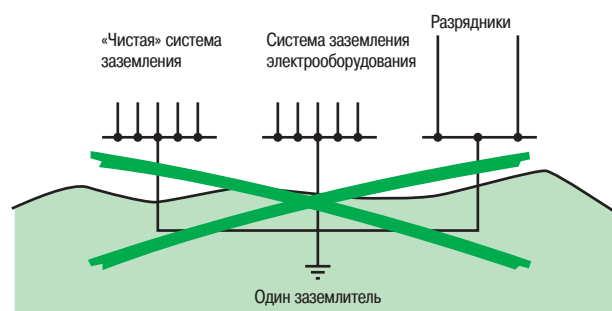


Рис. Q4: Электроустановка с одним заземляющим электродом

## 2 Принципы исполнения систем заземления

Рекомендуемое количество заземлителей - два или три (рис. Q5). Такой подход обеспечивает безопасность и электромагнитную совместимость. Это не исключает и другие конфигурации, которые допускаются, если гарантировано надлежащее обслуживание.

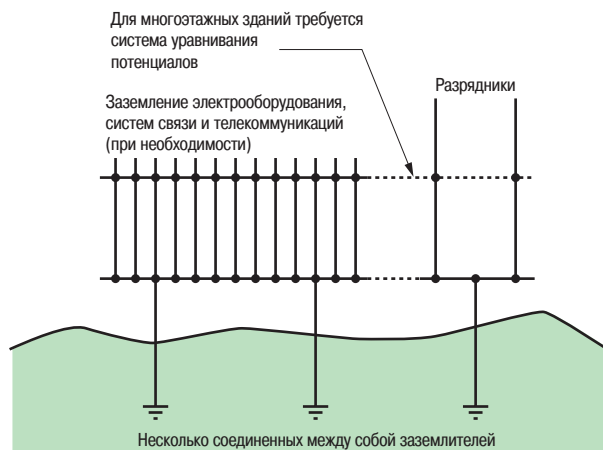


Рис. Q5: Электроустановка с несколькими соединенными между собой заземляющими электродами

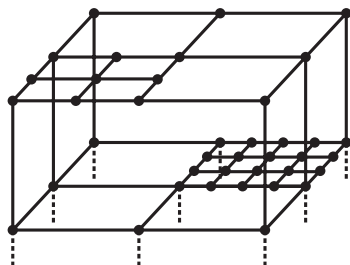


Рис. Q6: Каждый этаж имеет свою сетку заземления, и эти сетки соединены между собой в нескольких точках. Некоторые сетки цокольного этажа усилены для создание специальной зоны

В типовой электроустановке для многоэтажного здания каждый этаж должен иметь собственную сеть заземления (обычно в виде сетки), и все сетки должны быть соединены между собой и присоединены к заземлителю. Для обеспечения защиты от обрыва одного из проводников (чтобы ни одна из секций сети заземления не оказалась отсоединенной) требуются не менее двух соединений (избыточное резервирование).

На практике для получения более равномерного распределения токов используется более двух соединений. Это сглаживает различия в потенциалах и общем сопротивлении между различными этажами здания.

Много параллельных контуров тока имеют разные резонансные частоты. Если один из контуров имеет большое сопротивление, то он наверняка шунтируется другим контуром, имеющим другую резонансную частоту. В целом, в широком спектре частот (от десятков герц до мегагерц) наличие большого количества контуров приводит к системе с низким полным сопротивлением (рис. Q6).

Каждое помещение в здании должно иметь проводники системы заземления для эквипотенциального соединения устройств, систем, кабелепроводов и конструкций. Эту систему можно усилить с помощью металлических труб, лотков, опор, подставок и др. В специальных случаях, например в аппаратных серверных или в компьютерных помещениях для выравнивания потенциалов при соединении устройств коммуникационными кабелями можно усилить существующую сеть заземления дополнительными заземляющими проводниками или шинами и создать специальную зону (рис. Q6).

## 3.1 Эквипотенциальные соединения внутри и вне зданий

Основными целями заземления и эквипотенциального соединения являются:

■ Обеспечение электробезопасности

Посредством ограничения величины напряжения прикосновения и длины контура возврата токов короткого замыкания.

■ Обеспечение электромагнитной совместимости

Посредством устранения различий в потенциалах и использования эффекта экранирования.

В системе заземления неизбежно распространяются блуждающие токи. Невозможно устранить в электроустановке все источники помех. Также неизбежны замкнутые петли (контуры) заземления. Когда электроустановка оказывается под воздействием магнитного поля, например поля, созданного молнией, то в контурах, образованных различными проводниками, возникают различные разности потенциалов, а в системе заземления протекают токи. Поэтому система заземления оказывается под непосредственным влиянием любых внешних воздействий.

До тех пор пока эти токи протекают в системе заземления, а не в электронных цепях, они не наносят ущерб. Однако, если сети заземления не эквипотенциальны, например, когда они подсоединены к заземлителю «звездой» (т.е. радиально), то высокочастотные блуждающие токи будут протекать везде, где это возможно, в том числе в цепях управления. В результате возможны сбои в работе оборудования, оно может быть повреждено или даже уничтожено.

Единственным недорогим способом устранения токов в системе заземления и поддержания равенства потенциалов является соединение цепей заземления между собой. Это способствует уравниванию потенциалов в пределах системы заземления, но не устраняет необходимость применения защитных проводников. Для того, чтобы удовлетворить установленные нормативными документами требования обеспечения электробезопасности людей, между каждой единицей оборудования и клеммой заземления должны быть установлены защитные проводники достаточного сечения. Кроме того, за возможным исключением зданий со стальным каркасом, большое количество проводников, подключенных к ограничителям перенапряжений и устройствам системы молниезащиты должно быть непосредственно присоединено к заземлителю.

Основное различие между защитным проводником РЕ и кабелем, отходящим от ограничителя перенапряжений, состоит в том, что по первому проводнику внутренние токи «возвращаются» в нейтраль понижающего трансформатора, в то время как по второму проводнику внешний ток (по отношению к рассматриваемой электроустановке) поступает на заземлитель.

В здании рекомендуется соединять сеть заземления со всеми доступными проводящими конструкциями, а именно: металлическими балками, дверными коробками, трубами и др. Обычно достаточно соединить металлические кабель-каналы, кабельные лотки, трубы, вентиляционные трубопроводы в максимально возможном количестве точек. В местах, где установлено много оборудования, и размер ячеек сетки соединений превышает 4 метра, должен быть дополнительно проложен проводник для выравнивания потенциала. Сечение и тип проводника особого значения не имеют.

Крайне важно соединить между собой сети заземления зданий, имеющих общие кабельные соединения. Соединение между собой сетей заземления должно выполняться с использованием нескольких проводников и всех внутренних металлических конструкций этих зданий.

В отдельном здании различные сети заземления (электронного оборудования, компьютерной техники, телекоммуникационного оборудования и др.) должны быть обязательно соединены между собой и образовывать общую систему уравнивания потенциалов.

Эта система заземления должна быть, по возможности, сетчатой (рис. Q6). Если система заземления является эквипотенциальной, то различия потенциалов между взаимодействующими устройствами будут небольшими, и это позволит решить многие проблемы обеспечения электромагнитной совместимости. Также будет уменьшена разность потенциалов в случае пробоев изоляции или ударов молний.

Если нельзя обеспечить условия эквипотенциальности между зданиями, или если расстояние между зданиями превышает 10 метров, настоятельно рекомендуется использовать оптоволоконные кабели связи и гальванические развязки (разделительные трансформаторы) для систем измерений и связи.

Указанные меры являются обязательными, если в системе электропитания используется схема заземления IT или TN-C.

## 3.2 Улучшение условий эквипотенциальности

### Сети соединений (уравнивание потенциалов)

Хотя идеальная сеть соединений (уравнивание потенциалов) должна представлять собой металлический лист или металлическую сетку с мелкими ячейками, опыт показал: применение сети соединений с ячейками размером 3х3 м позволяет устранить большинство помех.

Примеры различных сетей соединений (уравнивание потенциалов) показаны на рис. Q7. Схема, удовлетворяющая минимальным требованиям, содержит проводник (например, медный кабель или медную шину), проложенный по периметру помещения.

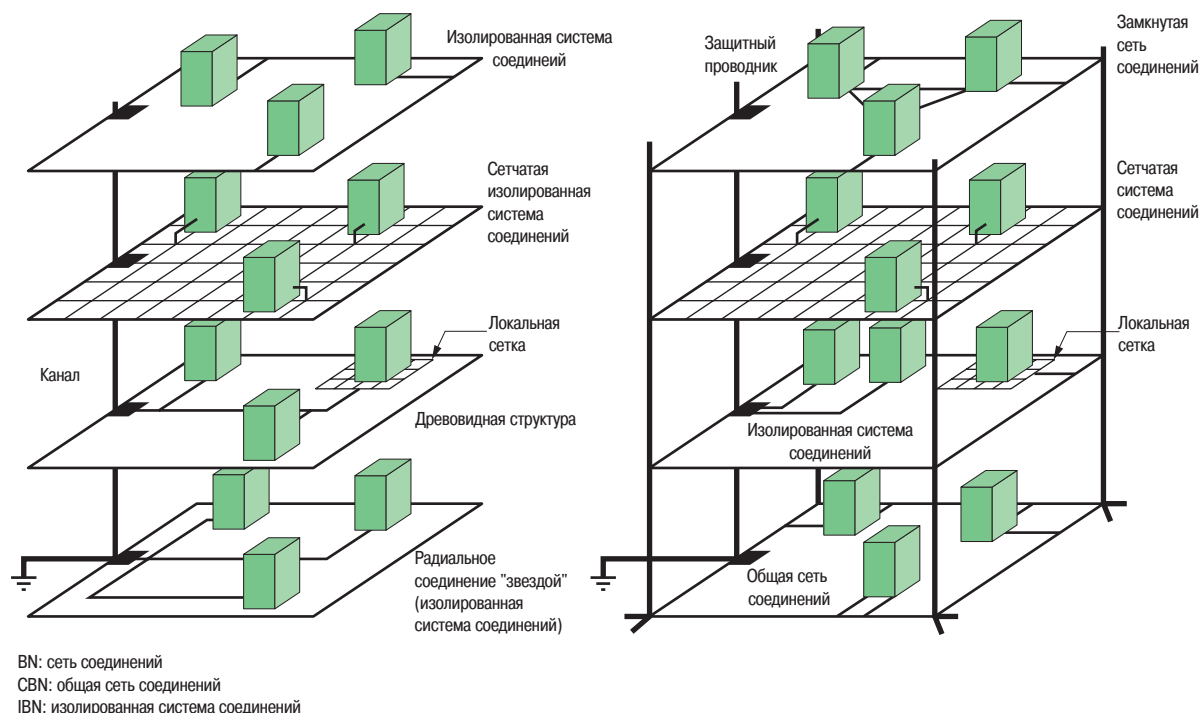


рис. Q7. Примеры сетей соединений

Длина соединений между элементом конструкции и сетью уравнивания потенциалов не должна превышать 50 см, и параллельно на определенном расстоянии от первого соединения должно быть установлено дополнительное соединение. Индуктивность соединения между заземляющей шиной электрического шкафа для размещения оборудования и сетью уравнивания потенциалов (см. ниже) должна быть менее 1 микрогенри (по возможности 0,5 микрогенри). Чтобы уменьшить взаимную индуктивность, можно, например, использовать один проводник длиной 50 см или два параллельных проводника длиной по 1 м, установленных на минимальном расстоянии друг от друга (не более 50 см).

По возможности, соединение с сеткой должно выполняться в месте пересечения, что позволит разделить высокочастотные токи на четыре, не удлиняя это соединение. Профиль соединительных проводников не имеет особого значения, но плоский профиль предпочтительней. Кроме того, проводник должен быть как можно короче.

### Параллельный заземляющий проводник (РЕС)

Параллельный заземляющий проводник предназначен для того, чтобы уменьшить наводки при передаче сигнала по проводникам.

Параллельный заземляющий проводник должен быть рассчитан на большие токи, возникающие при коротких замыканиях или ударах молнии. Когда в качестве параллельного заземляющего проводника используется экранирующая оболочка кабеля, надо понимать, что она не способна выдерживать большие токи. В таком случае рекомендуется прокладывать этот кабель вдоль металлических элементов конструкции или кабелепроводов, которые для всего кабеля будут выполнять функцию параллельных заземляющих проводников. Другая возможность — проложить экранированный кабель рядом с большим параллельным заземляющим проводником, при этом на обоих концах и этот кабель и параллельный заземляющий проводник присоединяются к локальной клемме заземления соответствующего оборудования или устройства.

В случае очень больших расстояний рекомендуется применять дополнительные соединения параллельного заземляющего проводника с системой заземления на разных расстояниях между устройствами. Эти дополнительные соединения образуют более короткий обратный контур для токов помех, протекающих по параллельному заземляющему проводнику. Для U-образных кабельных лотков, экранирующих оболочек и труб дополнительные соединения должны быть внешними для того, чтобы обеспечить их отделение от внутренних цепей.

### Соединительные проводники

В качестве соединительных проводников могут применяться металлические полосы, плоские жгуты или круглые проводники. Для высокочастотных систем металлические полосы и плоские жгуты предпочтительней (из-за уменьшения поверхностного эффекта), поскольку круглый проводник имеет более высокий импеданс, чем плоский проводник такого же сечения. По возможности отношение длины к ширине не должно превышать 5.

### 3.3 Разделение кабелей

Физическое разделение силовых и слаботочных кабелей является очень важным для обеспечения электромагнитной совместимости, особенно, если слаботочные кабели не экранированы, или экранирующая оболочка не соединена с открытыми проводящими частями. Чувствительность электронного оборудования в значительной степени зависит от кабельной разводки.

Если отсутствует разделение кабелей (прокладка различных типов кабелей в разных секциях кабелепровода, минимальное расстояние между силовыми и слаботочными кабелями и др.), то электромагнитная связь является наиболее сильной. В таких условиях электронное оборудование оказывается чувствительным к электромагнитным помехам, распространяющимся по соответствующим кабелям.

Для больших номинальных мощностей настоятельно рекомендуется использовать шинопроводы, например, такие, как Canalis. Уровни излучаемых электромагнитных полей при использовании таких шинопроводов в 10-20 раз ниже по сравнению со стандартными кабелями или проводниками.

Следует учитывать рекомендации, изложенные в разделах «Прокладка кабелей» или «Рекомендации по электропроводке».

### 3.4 Фальшполы

Включение полов в сетчатую систему соединений способствует выравниванию потенциалов участка и, значит, рассеиванию и ослаблению помех от низкочастотных токов.

Экранирующий эффект фальшпола непосредственно связан с его эквипотенциальностью. Если между панелями пола плохой контакт (например, применяются антистатические резиновые уплотнения), или если нарушен контакт между опорными кронштейнами (из-за загрязнений, коррозии, плесени, или отсутствия опорных кронштейнов), необходимо использовать дополнительную эквипотенциальную сетку. В этом случае достаточно обеспечить надежные электрические соединения между опорными металлическими стойками. На рынке имеются в наличии небольшие пружинные зажимы для присоединения металлических стоек к эквипотенциальной сетке. В идеальном случае должна быть соединена каждая стойка, но часто оказывается достаточным соединить каждую вторую стойку по каждому направлению. В большинстве случаев приемлемой оказывается сетка с размером ячейки 1,5 x 2 м. Рекомендуемое сечение медного проводника – 10 мм<sup>2</sup> или более. Обычно используется плоский жгут. Для снижения коррозии рекомендуется использовать медь, покрытую оловом (рис. Q8).

Примерно раз в пять лет для панелей пола требуется профилактическое техническое обслуживание (в зависимости от типа панели пола и условий эксплуатации, включая влажность, пыль и коррозию). необходима чистка покрытия и конструктивных элементов с применением подходящего чистящего состава.

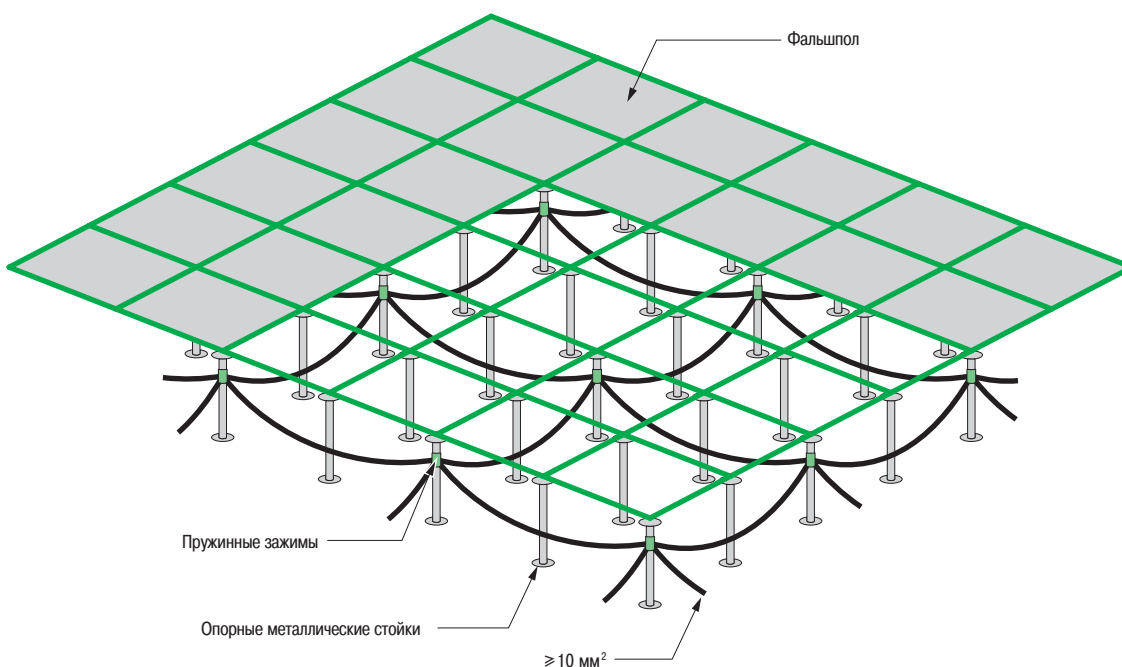


рис. Q8: Конструкция фальшпола

### 3.5 Прокладка кабелей

Выбор материалов и формы зависит от следующих факторов:

- интенсивности электромагнитных помех вдоль кабельных трасс (близость источников кондуктивных или излучаемых электромагнитных помех);
- разрешенного уровня кондуктивных или излучаемых электромагнитных помех;
- типа кабелей (экранированные, витые пары, оптоволоконные);
- способности оборудования, подключенного к электросети, выдерживать электромагнитные помехи;
- других ограничений, налагаемых окружающими условиями (химических, механических, климатических, противопожарных и др.);
- планируемых расширений системы электропроводки.

Кабелепроводы из неметаллических материалов пригодны для использования в следующих случаях:

- низкий уровень электромагнитных помех в окружающем пространстве;
- система электропроводки с низким уровнем излучений;
- ситуации, когда применения металлических кабелепроводов следует избегать (химические среды);
- системы с использованием оптоволоконных кабелей.

Для металлических кабелепроводов (лотков) именно форма (плоская, U-образная, трубчатая), а не поперечное сечение определяет импеданс. Замкнутые формы предпочтительней, чем открытые, поскольку снижают несимметричные помехи. Кабелепроводы часто имеют пазы для крепления кабеля - чем меньше, тем лучше. Пазы, вызывающие минимальные проблемы - те, которые вырезаются параллельно и на некотором расстоянии от кабелей. Пазы, вырезанные перпендикулярно кабелям, не рекомендуются (рис. Q9).

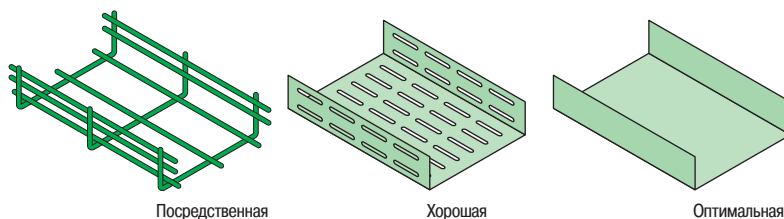


Рис. Q9: Эффективность различных типов металлических кабелепроводов (лотков)

В определенных случаях плохой, с точки зрения защищенности от электромагнитных помех, кабелепровод может оказаться подходящим, если электромагнитная среда является мало интенсивной, если используются экранированные или оптоволоконные кабели, или если применяются отдельные кабелепроводы для разных типов кабелей (силовых, передачи и обработки данных).

Рекомендуется предусматривать место внутри кабелепровода для определенного количества дополнительных кабелей. Высота кабелей должна быть ниже разделительных перегородок кабелепровода (как показано на рисунке ниже). Крышки также улучшают электромагнитную совместимость кабелепроводов.

В кабелепроводах U-образной формы магнитное поле уменьшается в двух углах. По этой причине глубокие кабелепроводы предпочтительней (рис. Q10).

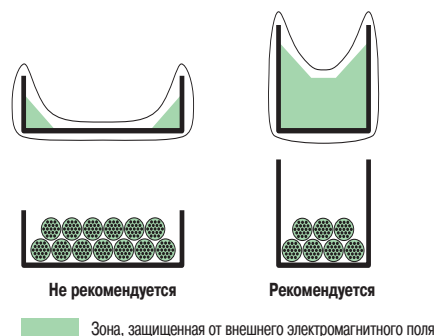


рис. Q10: Различные способы размещения кабелей

Различные типы кабелей (силовые и слаботочные) не должны устанавливаться в одной связке или в одном и том же кабелепроводе. Кабелепроводы не должны заполняться кабелями больше, чем наполовину.



### 3 Конструктивное исполнение

Рекомендуется осуществлять электромагнитное отделение кабелей одной группы от другой посредством экранирования или прокладки таких кабелей в разных кабельпроводах. Качество экранирования определяет расстояние между группами. Если экранирование не используется, должны поддерживаться достаточные расстояния (рис. Q11).

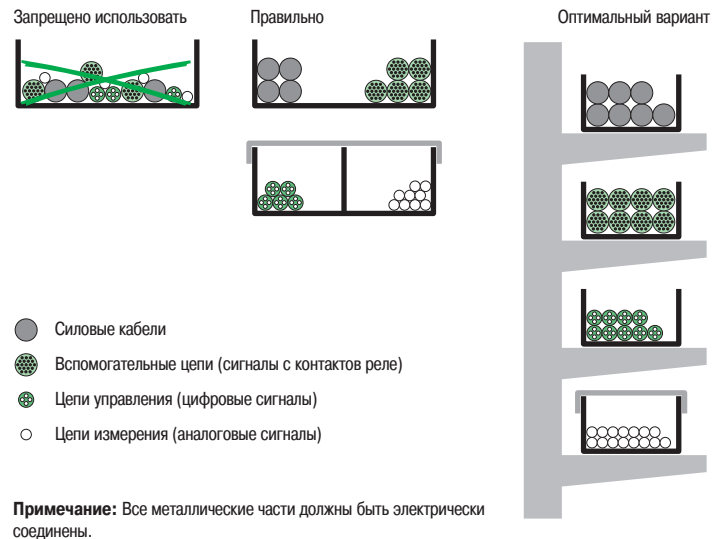


Рис. Q11: Рекомендации по прокладке групп кабелей в металлических кабельпроводах

Металлические элементы каркаса зданий можно использовать для обеспечения электромагнитной совместимости. Стальные балки (уголок, двутавр, U- и Т-образные) часто образуют непрерывную заземленную конструкцию с большими поперечными сечениями и поверхностями, к которым подведены многочисленные промежуточные заземляющие соединения. По возможности, кабели должны прокладываться вдоль таких балок. Размещение во внутренних углах предпочтительней, чем на наружных поверхностях (рис. Q12).

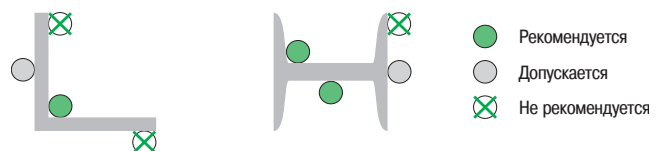


Рис. Q12: Рекомендации по прокладке кабелей в стальных балках

Оба конца металлических кабельпроводов должны всегда соединяться с локальными заземляющими электродами. Для очень длинных кабельпроводов рекомендуется использовать дополнительные соединения с системой заземления. По возможности, расстояние между этими соединениями должны быть неодинаковыми (для симметричных систем разводки) с тем, чтобы избежать резонанса на одинаковых частотах. Все соединения с системой заземления должны быть короткими.

Существуют металлические и неметаллические кабельпроводы. Металлические варианты обеспечивают улучшенные характеристики электромагнитной совместимости. Кабельпровод (лотки и коробки для кабелей, кабельные кронштейны и др.) должны от начала до конца представлять собой непрерывную проводящую металлическую конструкцию.

Алюминиевый кабельпровод имеет более низкое сопротивление по постоянному току, чем стальной кабельпровод того же размера, но импеданс ( $Z_t$ ) стали снижается при малых частотах, особенно когда сталь имеет высокую относительную магнитную проницаемость  $\mu$ . Следует соблюдать осторожность при одновременном использовании различных типов металлов, поскольку в определенных случаях не допускается непосредственный электрический контакт некоторых металлов. Несоблюдение этого правила может вызвать коррозию в месте контакта. С точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости это может быть недостатком.

В случаях, когда устройства, подключенные к кабельной системе, на основе незранированных кабелей, не подвергаются воздействию низкочастотных полей, электромагнитная совместимость неметаллических кабельпроводов может быть улучшена посредством добавления внутрь кабельпровода параллельного заземляющего проводника (ПЕС). Оба конца должны быть подсоединены к локальной системе заземления. Присоединения должны быть сделаны к металлической части, имеющей низкий импеданс (например, к большой металлической панели корпуса устройства). ПЕС-проводник должен выдерживать большие токи короткого замыкания.



## Практическая реализация

Если металлический кабелепровод состоит из нескольких коротких секций, следует обратить внимание на обеспечение его непрерывности посредством надлежащего соединения различных секций. Желательно, чтобы секции сваривались по всем кромкам. Клепанные, болтовые или резьбовые соединения разрешаются в том случае, если контактные поверхности проводят ток (отсутствует краска или изолирующие покрытия) и защищены от коррозии. Следует соблюдать установленные моменты затяжки с тем, чтобы обеспечить необходимое давление для получения плотного электрического контакта между двумя частями кабелепровода.

Если выбрана конкретная форма кабелепровода, она должна использоваться на всей его длине. Все внутренние соединения (между секциями кабелепровода) должны иметь низкое полное сопротивление. Соединение секций кабелепровода с помощью одного провода создает большое местное сопротивление, которое резко ухудшает его характеристики электромагнитной совместимости.

Начиная с частоты в несколько мегагерц, соединительный промежуток в 10 см между двумя секциями кабелепровода резко ухудшает его коэффициент затухания (более чем в 10 раз) (рис. Q13).

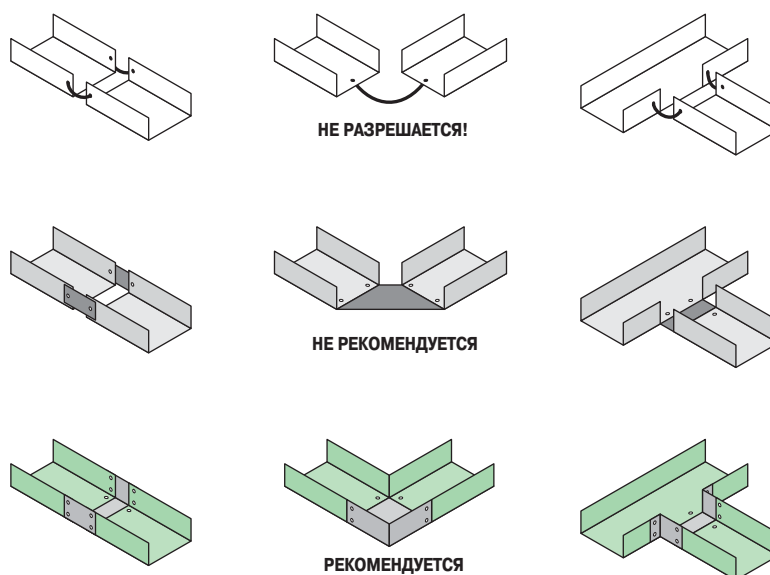


Рис. Q13: Сборка металлических кабелепроводов

Всякий раз, когда проводятся изменения или расширения кабельной системы, важно следить за тем, чтобы они выполнялись в соответствии с правилами обеспечения электромагнитной совместимости (например, никогда не заменяйте металлический кабелепровод пластмассовым!).

Крышки для металлических кабелепроводов должны отвечать тем же требованиям, что и сами кабелепроводы. Крышка должна иметь большое количество контактов по всей длине. Если это невозможно, она должна быть соединена с кабелепроводом по крайней мере на двух концах с помощью коротких соединений (например, плетеных или сетчатых проводников).

В случае прохождения кабелепроводов через стену (например, противопожарную перегородку), между их двумя частями должны использоваться соединения с низким полным сопротивлением (рис. Q14).

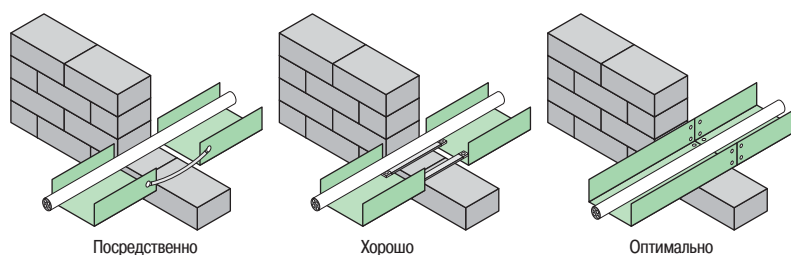


рис. Q14: Рекомендации для соединения частей металлического кабелепровода при прохождении через стену

### 3.6 Применение экранированных кабелей

Если решено использовать экранированные кабели, необходимо также определить каким образом будет соединяться экранирующая оболочка (тип заземления, соединителя, кабельного ввода), ибо в противном случае преимущества будут в значительной мере снижены. Для получения эффективного экранирования оболочка должна быть соединена по всему своему периметру. На **рис. Q15** показаны различные способы заземления экранирующей оболочки.

Для компьютерного оборудования и цифровых каналов связи экранирующая оболочка должна быть соединена на обоих концах кабеля.

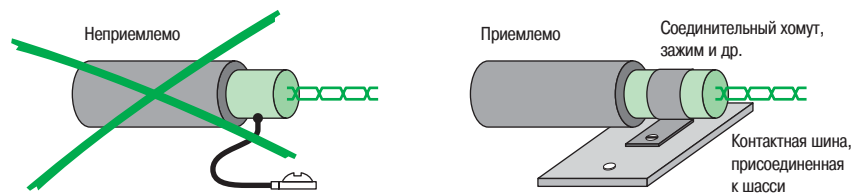
Соединение экранирующей оболочки является очень важным для обеспечения электромагнитной совместимости и следует обратить внимание на следующее.

Если экранированный кабель соединяет оборудование, расположенное в одной и той же зоне уравнивания потенциалов, экранирующая оболочка должна быть присоединена к открытым проводящим частям на обоих концах кабеля. Если соединяемое оборудование не расположено в одной и той же зоне уравнивания потенциалов, то имеется несколько возможных решений:

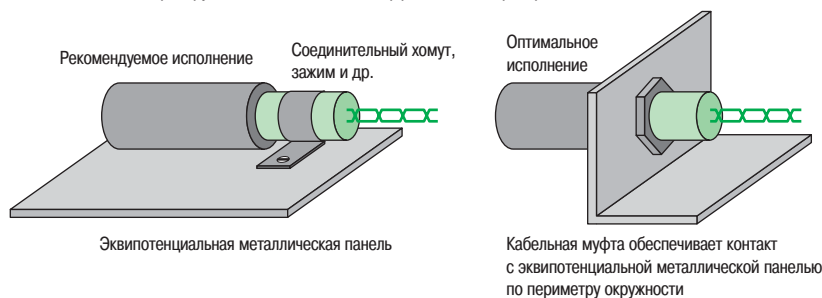
- Присоединение к открытым проводящим частям только одного конца является опасным. В случае пробоя изоляции напряжение на экранирующей оболочке может оказаться смертельным для оператора или привести к повреждению оборудования. Кроме того, при высоких частотах экранирование будет неэффективным.

- Присоединение к открытым проводящим частям обоих концов может быть также опасным при пробое изоляции. В экранирующей оболочке возникнет большой ток, который может ее разрушить. Для устранения этой проблемы рядом с экранированным кабелем необходимо проложить параллельный заземляющий проводник. Сечение этого проводника зависит от тока короткого замыкания в данной части электроустановки. Очевидно, что если в электроустановке используется сетчатая система заземления с достаточно мелкой сеткой, то эта проблема не возникает.

Все соединения должны осуществляться с металлом, очищенным от изоляции



Плохо соединенная экранирующая оболочка снижает эффективность экранирования



**рис. Q15:** Конструктивное исполнение экранированных кабелей

### 3.7 Сети связи

Сети связи покрывают большие расстояния и соединяют оборудование, установленное в помещениях, в которых могут использоваться распределительные сети с разными схемами заземления. Кроме того, если различные площадки не объединены системой уравнивания потенциалов, то между различными устройствами, подключенными к этим сетям, могут возникать большие переходные токи и значительные разности потенциалов. Как отмечалось выше, это может происходить при коротких замыканиях и ударах молний. Максимальное выдерживаемое напряжение (между токоведущими проводниками и открытыми проводящими частями) плат, установленных в персональных компьютерах и программируемых контроллерах, обычно не превышает 500 В. В лучшем случае, оно может достигать 1,5 кВ. В сетях с системой заземления TN-S и относительно небольших коммуникационных сетях такой уровень выдерживаемого напряжения является приемлемым. Однако, во всех случаях рекомендуется защита от ударов молний.

Важным параметром является тип используемого кабеля связи. Он должен быть пригоден для используемого типа передачи. Для создания надежного канала связи необходимо учитывать следующие параметры:

- волновое сопротивление;
- тип кабеля (витые пары или другие типы кабелей);
- активное и емкостное сопротивление на единицу длины;
- затухание сигнала на единицу длины;
- используемые типы экранирования.

Кроме того, важно применять симметричные (дифференциальные) каналы передачи, поскольку они обеспечивают более высокие характеристики с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости.

В условиях интенсивных электромагнитных воздействий или больших сетей связи между электроустановками, не являющимися эквипотенциальными или являющимися лишь частично эквипотенциальными, при использовании систем заземления IT, TT или TN-C настоятельно рекомендуется применять оптоволоконные линии связи.

По соображениям безопасности оптоволоконный кабель не должен иметь металлических частей (из-за риска поражения электрическим током в случае, если этот кабель соединяет два участка с разными потенциалами).

## 3.8 Применение ограничителей перенапряжений

### Соединения

Они должны быть как можно короче. Фактически, одна из существенных характеристик защиты оборудования - это максимальный уровень напряжения на входе, который оборудование может выдержать. Для защиты оборудования должен быть выбран соответствующий ограничитель перенапряжений (см. Рис. 16). Общая длина соединений определяется по формуле  $L = L1 + L2 + L3$ . Для высокочастотных токов полное сопротивление составляет примерно  $1 \mu\text{H}/\text{m}$

В соответствии с формулой  $\Delta U = L \frac{di}{dt}$

для импульса  $8/20 \mu\text{s}$  и тока  $8 \text{ kA}$  получаем пиковое напряжение  $1000 \text{ В}$  на метр кабеля.

$$\Delta U = 1 \cdot 10^{-6} \times \frac{8 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^{-6}} = 1,000 \text{ В}$$

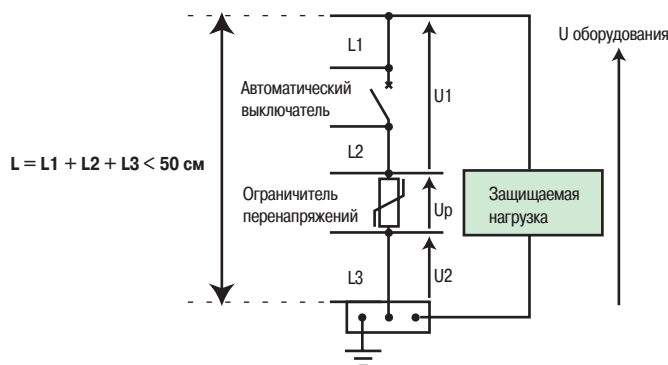


Рис. Q16 : Подключение ограничителя перенапряжений;  $L < 50 \text{ см}$

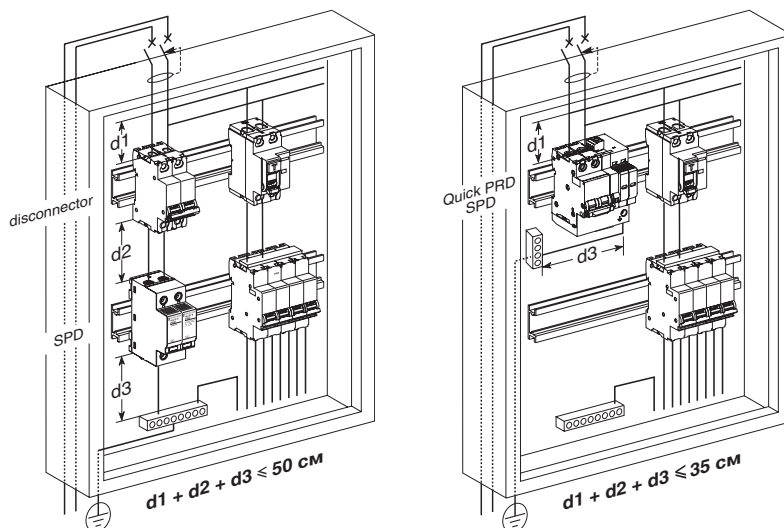
Следовательно, получаем:  $U_{\text{оборудования}} = U_p + U1 + U2$ .

Если  $L1 + L2 + L3 = 50 \text{ см}$ , то это приведет к перенапряжению  $500 \text{ В}$  для тока  $8 \text{ kA}$ .

#### Правила кабельной разводки

##### ■ Правило 1

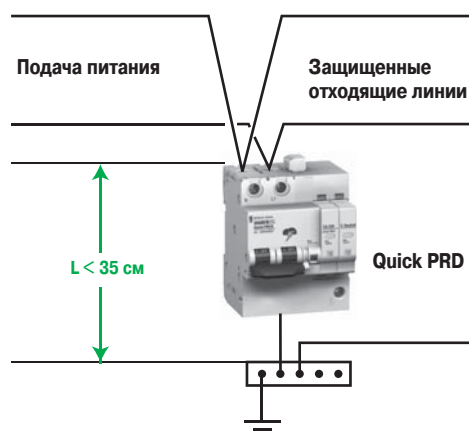
Первое правило, которое необходимо соблюдать, заключается в том, чтобы длина соединения между ограничителем перенапряжения и его автоматическим выключателем не превышала 50 см. Подключение ограничителя перенапряжений показано на **Рис. Q17**.



**Рис. Q17** : Устройство защиты от перенапряжений с отдельным и встроенным автоматическим выключателем.

##### ■ Правило 2

Отходящие линии, защищенные ограничителем перенапряжений, должны проходить справа от клемм ограничителя перенапряжений и автоматического выключателя (см. **Рис. Q18**).

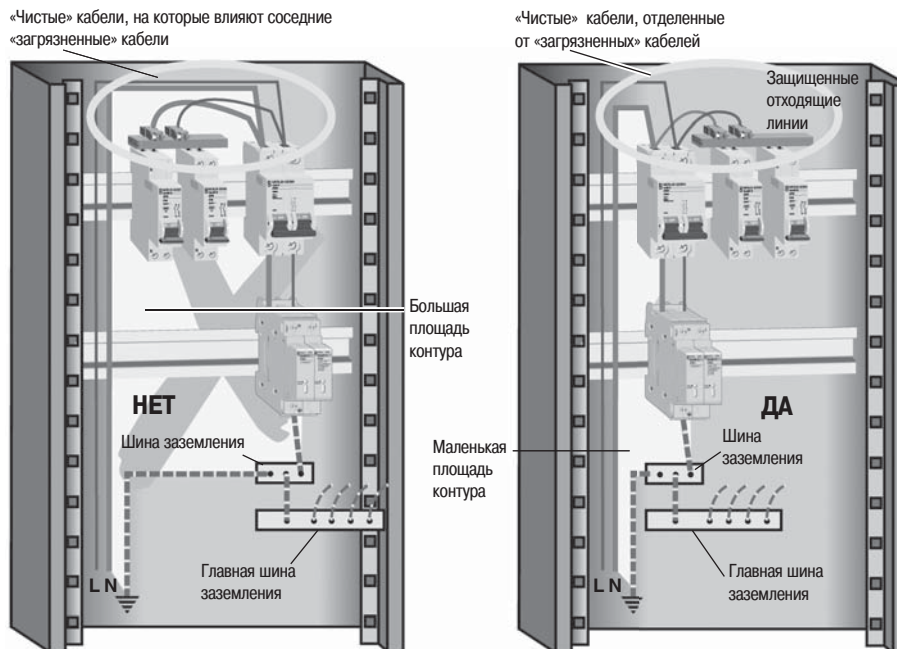


**Рис. Q18** : Подключение защищенных отходящих линий справа от клемм ограничителя перенапряжений.

Q13

### ■ Правило 3

Фазные проводники, а также нейтральный и заземляющий проводник входящей линии должны быть уложены вплотную друг к другу, чтобы уменьшить площадь контура (см. **Рис. Q19**).



**Рис. Q19** : Пример кабельной разводки в шкафу (с учетом правил 2, 3, 4, 5)

### ■ Правило 4

Входящие («загрязненные») проводники ограничителя перенапряжений должны быть удалены от отходящих («чистых») проводников, чтобы исключить влияние «загрязненных» линий на защищенные «чистые» линии (см. **Рис. Q19**).

### ■ Правило 5

Кабели должны быть уложены в одной плоскости вплотную к металлическому корпусу шкафа, чтобы минимизировать контуры, образуемые корпусом и таким образом улучшить экранирующий эффект корпуса. Если шкаф изготовлен из пластика и в нем необходимо разместить особо чувствительное оборудование, то данный шкаф необходимо заменить на металлический.

В любом случае, необходимо проверить, что металлические рамы и корпуса шкафов заземлены короткими проводниками.

Кроме того, если используются экранированные кабели, лишние отрезки («косички»), должны быть удалены, поскольку они уменьшают эффективность экранирования.

### 3.9 Разводка кабелей в шкафах (Рис. Q20)

Каждый шкаф должен обеспечиваться заземляющей шиной или заземленной металлической пластиной. Все экранированные кабели и внешние защитные проводники должны подсоединяться к этой точке. Любая металлическая пластина шкафа или DIN-рейка может использоваться в качестве точки заземления.

Пластмассовые шкафы не рекомендуются. В этом случае должна использоваться DIN-рейка в качестве точки заземления.

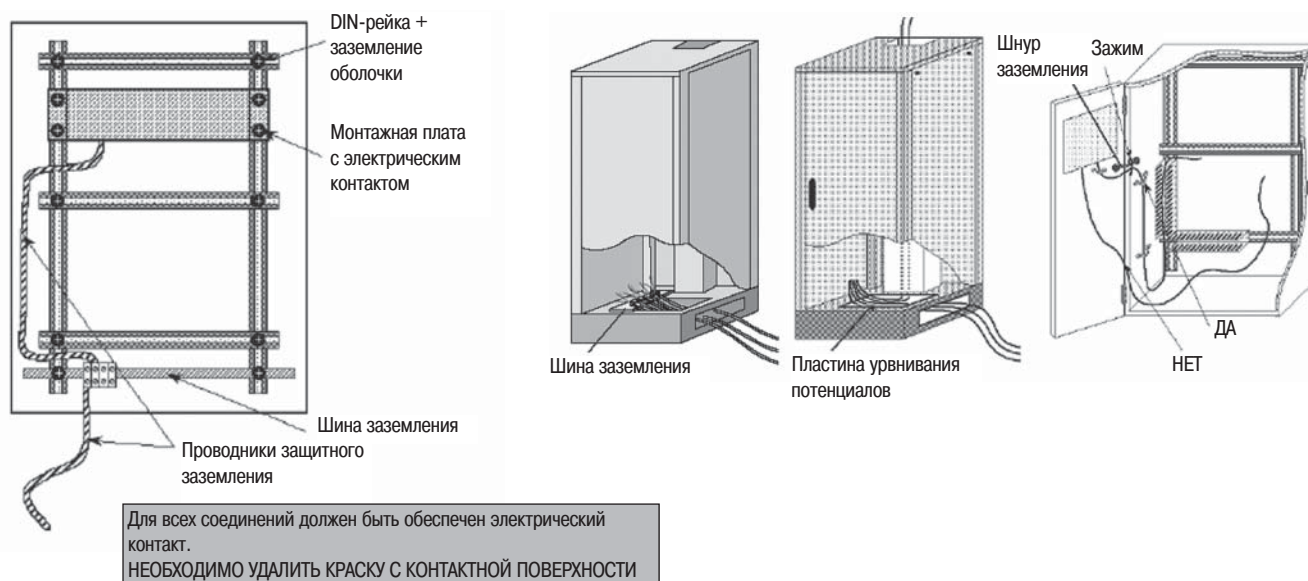


Рис. Q20 : Чувствительное оборудование должно подключаться через устройство защиты от импульсных перенапряжений

### 3.10 Стандарты

Следует указать нормы и рекомендации, которые должны быть учтены при инсталляции.

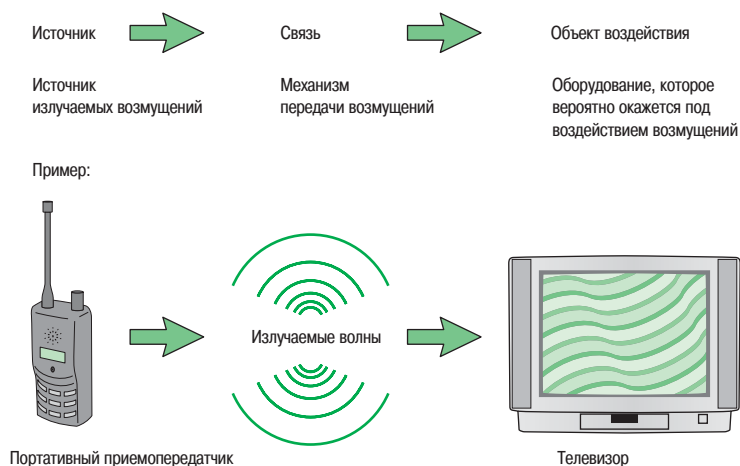
Ниже приводятся несколько документов, которые могут использоваться:

- EN 50174-1 Информационная техника – Монтаж кабелей. Часть 1: Спецификация и обеспечение качества
- EN 50174-2 Информационная техника – Монтаж кабелей. Часть 2: Планирование и методы монтажа в зданиях

## 4 Механизмы электромагнитной связи и меры противодействия

### 4.1 Общие положения

Пример воздействия электромагнитных возмущений показан ниже на **рис. Q21**.



**Рис. Q21:** Воздействие электромагнитных возмущений

Источниками возмущений являются:

- Радиочастотные излучения
  - беспроводные системы связи (радио и телевизионные передатчики, портативные; радиостанции, выключатели, радиотелефоны, устройства дистанционного управления)
  - радиолокаторы.
- Электрооборудование
  - мощное промышленное оборудование (индукционные печи, сварочные машины, системы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей);
  - офисное оборудование (компьютеры и электронные цепи, фотокопировальные машины, большие мониторы);
  - разрядные лампы (неоновые, флуоресцентные, импульсные и др.);
  - электромеханические устройства (реле, контакторы, электромагниты, устройства отключения тока).
- Энергосистемы
  - системы передачи и распределения электроэнергии;
  - системы электрического транспорта.
- Разряды молний.
- Электростатические разряды (ESD).

Потенциальными объектами воздействия являются:

- радио и телевизионные приемники, радиолокаторы, системы радиосвязи;
- аналоговые системы (сенсоры, системы измерений и сбора данных, усилители, мониторы);
- цифровые системы (компьютеры, системы передачи данных, периферийное оборудование).

Различными типами электромагнитной связи являются:

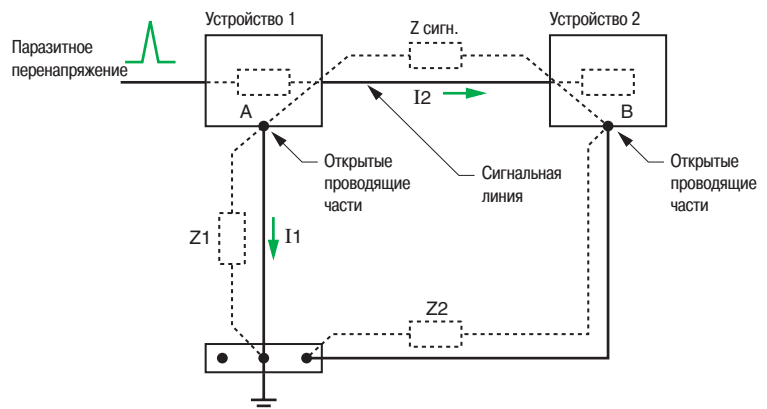
- гальваническая связь;
- емкостная связь;
- индуктивная связь;
- связь посредством излучения (между кабелями, между полем и кабелем, между антеннами).

### 4.2 Гальваническая (кондуктивная) связь

#### Описание

Два или более устройств соединены между собой источником питания и коммуникационными кабелями (рис. Q22). Когда по сопротивлениям цепей протекают внешние токи (токи молний, токи короткого замыкания, возмущения), между точками А и В, которые предположительно являются эквипотенциальными, возникает нежелательное напряжение. Это паразитное напряжение может создать помехи для слаботочных цепей или цепей передачи данных.

Все кабели, включая защитные проводники, имеют сопротивление (импеданс), особенно на высоких частотах.



Открытые проводящие части устройств 1 и 2 присоединены к общей клемме заземления через сопротивления Z1 и Z2.

Ток, вызванный паразитным перенапряжением, уходит на землю через Z1. Потенциал устройства 1 возрастает до величины  $Z1 \cdot I1$ . Разность потенциалов с устройством 2 (начальный потенциал которого равен нулю) приводит к появлению тока I2.

$$Z1 \cdot I1 = (Z_{\text{сигн.}} + Z2) \cdot I2 \quad \frac{I2}{I1} = \frac{Z1}{(Z_{\text{сигн.}} + Z2)}$$

Ток I2, протекающий по сигнальной линии, создает помехи для устройства 2.

Рис. Q22: Описание гальванической (кондуктивной) связи

#### Примеры (рис. Q23)

- Устройства, соединенные общим заземляющим проводником (например, PEN или PE) и подвергающиеся воздействию кратковременных или интенсивных изменений тока (ток повреждения, удар молнии, ток короткого замыкания, изменения нагрузки, цепи отключения, гармоники тока, батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности и др.).
- Общая обратная цепь для нескольких источников электрического напряжения.

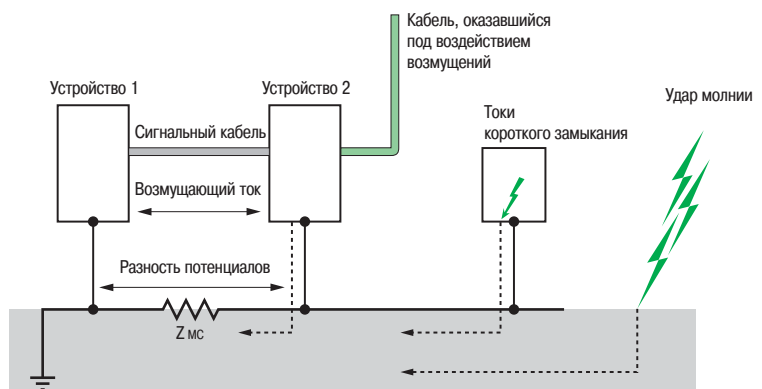


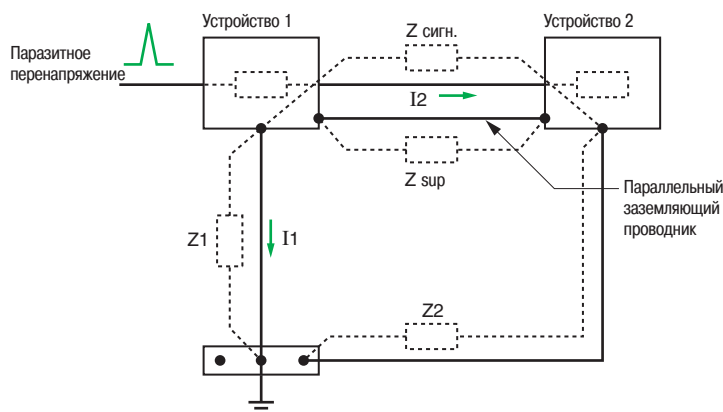
Рис. Q23: Пример гальванической связи



### Меры противодействия (рис. Q24)

Чтобы уменьшить влияние помех, передающихся по гальваническим связям (кондуктивным путем) нужно:

- уменьшать сопротивления:
- объединить заземляющие проводники системы уравнивания потенциалов в сетку;
- использовать короткие кабели или плоские жгуты, которые при равных сечениях имеют меньшее сопротивление по сравнению с кабелями круглого сечения;
- установить систему уравнивания потенциалов между устройствами.
- снизить уровень возмущающих токов посредством фильтрации гармоник и использования дросселей для ограничения токов замыкания на землю.



Если сопротивление параллельного заземляющего проводника ( $Z_{sup}$ ) является очень низким по сравнению с  $Z_{сигн.}$ , то в основном ток потечет через этот проводник, а не через сигнальную линию, как в предыдущем случае. Разность потенциалов между устройствами 1 и 2 становится очень низкой, и уровень помех снижается до допустимого.

Рис. Q24: Меры по уменьшению величины влияния кондуктивных помех

## 4.3 Емкостная связь

### Описание

Уровень возмущений зависит от скорости изменений напряжения ( $dv/dt$ ) и величины ёмкости связи между источником возмущений и объектом воздействия.

Емкостная связь усиливается:

- с частотой;
- с уменьшением расстояния между источником возмущений и объектом воздействия и увеличением длины параллельных кабелей;
- с высотой установки кабелей относительно заземленной поверхности;
- с входным сопротивлением цепи, подвергшейся воздействию возмущений (цепи с большим входным сопротивлением более уязвимы);
- с диэлектрической проницаемостью изоляции кабеля, подвергшегося воздействию возмущений (особенно для сильносвязанных пар).

На рис. Q25 показаны результаты емкостной связи между двумя кабелями.

### Примеры (рис. Q26)

- Близкорасположенные кабели, подверженные быстрым изменениям напряжения ( $dv/dt$ ).
- Включение флуоресцентных ламп.
- Часто включаемые источники питания (фотокопировальные машины и др.).
- Емкостная связь между первичными и вторичными обмотками трансформаторов.
- Наводки между кабелями.

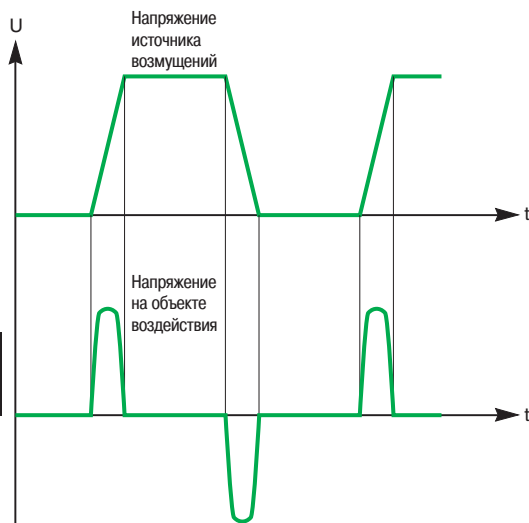


Рис. Q25: Типовой результат емкостной связи (емкостных наводок)

## 4 Механизмы электромагнитной связи и меры противодействия

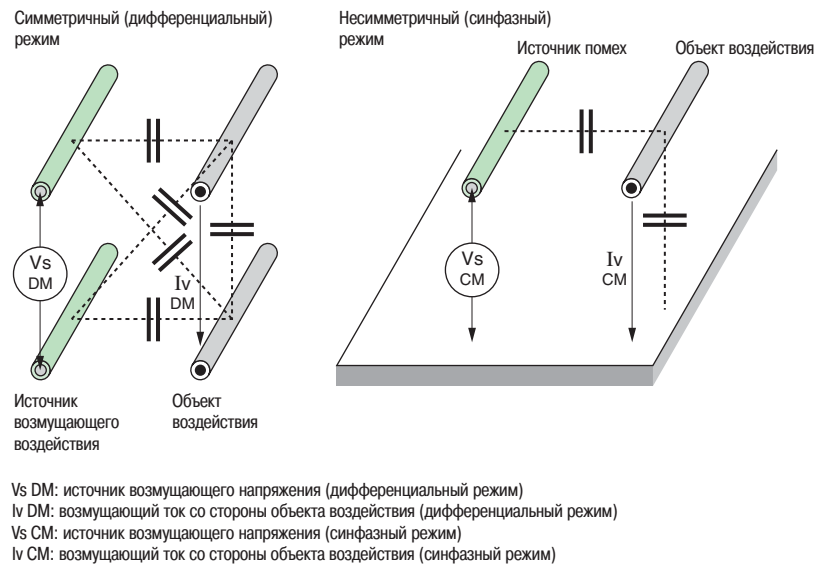


Рис. Q26: Пример емкостной связи

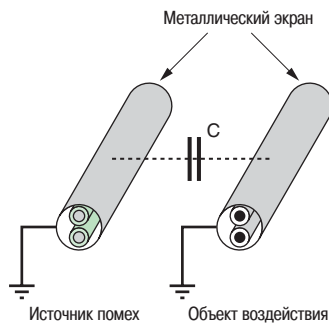


Рис. Q27: Использование экранов кабелей с перфорацией снижает емкостную связь

### Меры противодействия (рис. Q27)

- Максимальное ограничение длины параллельно проложенных кабелей-источников возмущений и кабелей-объектов воздействия.
- Увеличение расстояния между источником возмущений и объектом воздействия.
- При использовании двухпроводных линий прокладывать провода как можно ближе друг к другу.
- Размещение параллельного заземляющего проводника (РЕС) между источником возмущений и объектом воздействия.
- Использование двух- или четырехжильных кабелей, а не отдельных проводников.
- Использование симметричной передачи сигналов по правильно смонтированным симметричным системам проводников.
- Экранирование кабелей-источников возмущений, кабелей-объектов воздействия или и тех и других (экраны должны быть соединены).
- Снижение величины  $dv/dt$  источника возмущений путем увеличения, по возможности, времени нарастания сигнала.

### 4.4 Индуктивная связь

#### Описание

Источник помех и объект воздействия связаны магнитным полем. Уровень возмущений зависит от скорости изменения тока ( $di/dt$ ) и величины взаимной индуктивности.

Индуктивная связь усиливается:

- с частотой;
- с уменьшением расстояния между источником помех и объектом воздействия и увеличением длины параллельных кабелей;
- с увеличением высоты установки проводников относительно заземленной поверхности;
- с увеличением импеданса нагрузки цепи, генерирующей возмущения.

#### Примеры (рис. Q28)

- Близко расположенные кабели, подверженные быстрым изменениям тока ( $di/dt$ ).
- Короткие замыкания.
- Токи повреждения.
- Удары молний.
- Статические (полупроводниковые) устройства управления обмотками статора двигателей.
- Сварочные машины.
- Индукторы.

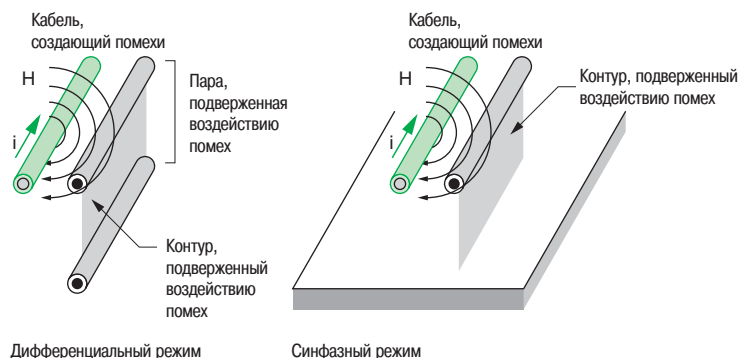


Рис. Q28. Пример индуктивной связи

### Меры противодействия

- Максимальное ограничение длины параллельно проложенных кабелей-источников возмущений и кабелей-объектов воздействия.
- Увеличение расстояния между источником возмущений и объектом воздействия.
- При использовании двухпроводных линий прокладывать провода как можно ближе друг к другу.
- Использование многожильных или соприкасающихся одножильных кабелей, предпочтительно с треугольной схемой укладки.
- Размещение параллельного заземляющего проводника (РЕС) между источником возмущений и объектом воздействия.
- Использование симметричных систем передачи по должным образом смонтированным симметричным системам электропроводки.
- Экранирование кабелей-источников возмущений, кабелей-объектов воздействия или и тех и других (экраны должны быть соединены).
- снижение величины  $dv/dt$  источника возмущений путем увеличения, по возможности, времени нарастания сигнала (с помощью последовательно включенных резисторов или РТС-резисторов на кабеле-источнике помех, ферритовых колец на кабеле-источнике помех и/или кабеле-объекте воздействия).

## 4.5 Связь посредством излучения

### Описание

Источник возмущений и объект воздействия связаны посредством среды, например, воздуха. Уровень возмущений зависит от мощности источника излучений и эффективности излучающей и принимающей антенн. Электромагнитное поле состоит из магнитного и электрического полей. При этом можно отдельно анализировать электрическую и магнитную составляющие.

В системах электропроводки связь электрического поля (E) и магнитного поля (H) осуществляется посредством проводов и контуров (рис. Q29).

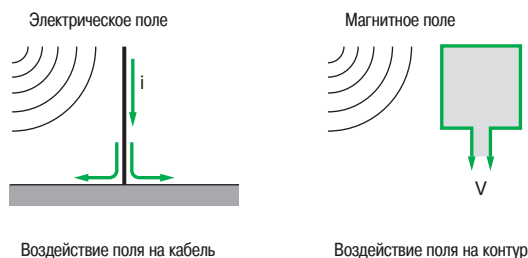


Рис. Q29: Различные виды воздействия поля

## 4 Механизмы электромагнитной связи и меры противодействия

Когда кабель подвергается воздействию переменного электрического поля, в нем генерируется ток. Это явление называется электрической наводкой в кабеле (связь «поле-проводник»).

Аналогичным образом, когда переменный магнитный поток пересекает контур, он наводит ЭДС, которая генерирует разность потенциалов между двумя концами этого контура. Это явление называется электромагнитной наводкой в контуре.

### Примеры (рис. Q30)

- Радиопередатчики (портативные приемопередатчики, радио и телевизионные передатчики, мобильные телефоны).
- Радиолокаторы.
- Системы зажигания автомобилей.
- Машины для дуговой сварки.
- Индукционные печи.
- Устройства коммутации силовых цепей.
- Электростатические разряды.
- Удары молний.

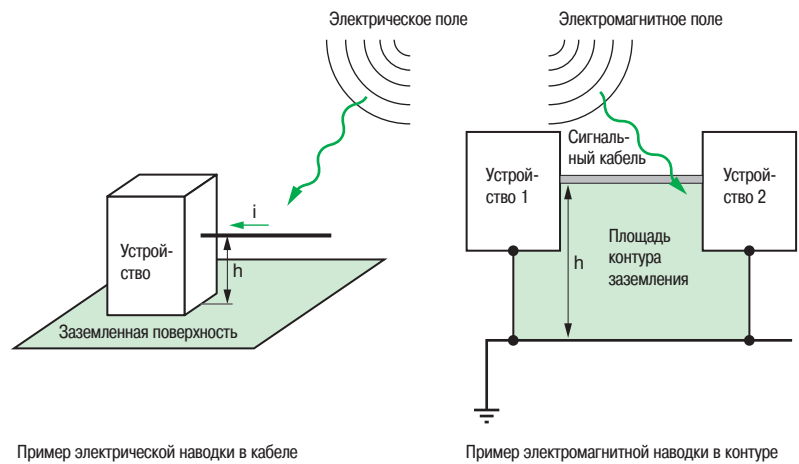


Рис. Q30. Примеры воздействий излучения

### Меры противодействия

Чтобы свести к минимуму последствия электромагнитных наводок, требуются меры, перечисленные ниже.

#### Для снижения наводок в кабеле:

- уменьшайте антенный эффект объекта воздействия, уменьшая высоту (h) прокладки кабеля относительно заземленной поверхности;
- помещайте кабель в непрерывный соединенный металлический кабелепровод (трубу, кабель-канал, короб);
- используйте экранированные кабели, которые надлежащим образом установлены и соединены;
- используйте параллельные заземляющие проводники;
- устанавливайте на кабеле-объекте воздействия фильтры или ферритовые кольца.

#### Для снижения наводок в контуре:

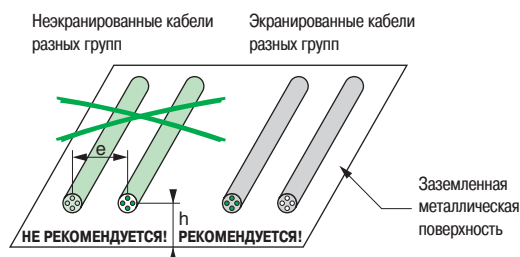
- уменьшайте площадь поверхности контура-объекта воздействия, уменьшая высоту установки (h) и длину кабеля. Используйте решения, предусмотренные для снижения электромагнитных наводок в кабеле. Используйте принцип клетки Фарадея.

Электромагнитные наводки можно устранить, используя принцип клетки Фарадея. Возможным решением является экранированный кабель, при этом оба конца экранирующей оболочки должны быть присоединены к металлическому корпусу устройства. Открытые проводящие части должны быть соединены для повышения эффективности на высоких частотах.

Электромагнитные наводки снижаются с увеличением расстояний и при использовании симметричных каналов передачи.

Q21

## 5.1 Классы сигналов (рис. Q31)



Риск перекрестных помех, если  $e < 3h$

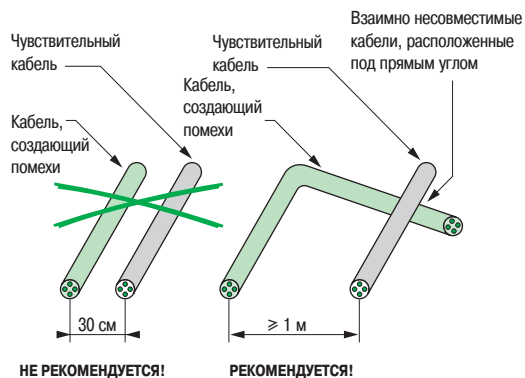
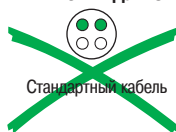
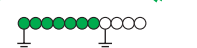


Рис. Q32: Рекомендации по размещению кабелей, передающих разные типы сигналов

НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ



Стандартный кабель

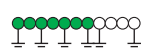


Неправильное применение плоского кабеля

РЕКОМЕНДУЕТСЯ



Две различные пары



Правильное применение плоского кабеля

- Цифровое соединение
- Аналоговая пара
- ⊥ Соединительные провода

Рис. Q33: Использование обычного и плоского кабелей

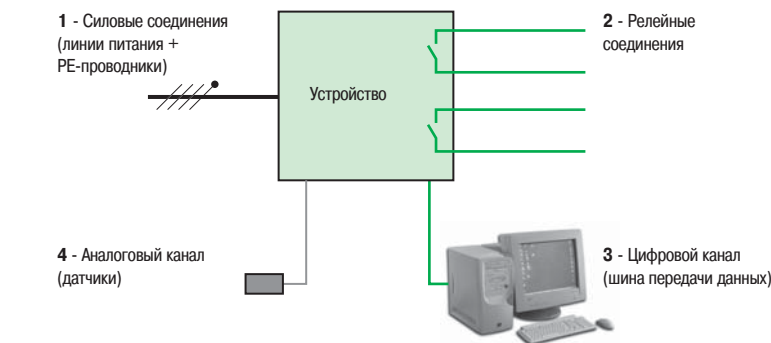


Рис. Q31: Цели передачи внутренних сигналов можно сгруппировать в четыре класса

Четыре класса цепей передачи внутренних сигналов:

### ■ Класс 1

Цепи сетевого питания, силовые цепи с высоким градиентом изменения тока ( $di/dt$ ), импульсные источники питания, устройства регулирования мощности. Данный класс – не очень чувствительный, но создает помехи для остальных классов.

### ■ Класс 2

Релейные контакты.

Этот класс – не очень чувствительный, но создает помехи для остальных классов (коммутация, образование дуги при размыкании контактов).

### ■ Класс 3

Цифровые каналы (высокочастотные коммутации).

Данный класс чувствителен к импульсным сигналам, но также создает помехи для следующего класса.

### ■ Класс 4

Аналоговые входные и выходные цепи (низкоуровневые измерения, схемы питания активных датчиков). Этот класс является чувствительным.

Чтобы облегчить распознавание и разделение кабелей разных классов рекомендуется использовать для каждого класса проводники определенного цвета. Это полезно при проектировании и устранении неисправностей.

## 5.2 Рекомендации по прокладке кабелей

Кабели, передающие различные типы сигналов, должны быть физически разделены (см. Рис. Q32 выше)

Кабели, создающие помехи (класс 1 и 2) должны быть размещены на некотором расстоянии от чувствительных кабелей (классы 3 и 4) (см. Рис. Q32 и Рис. Q33)

Как правило, если кабели проложены по металлической поверхности, то достаточно промежутка 10 см между кабелями (для уменьшения как симметричных, так и несимметричных помех). Если достаточно места, то промежуток между кабелями 30 см является предпочтительным. Если кабели должны пересечься, то пересечение должно быть сделано под прямым углом чтобы избежать перекрестных помех. Не требуется промежутка между кабелями если кабели разделены металлической перегородкой. При этом перегородка и сторонние проводящие части должны быть заземлены и их потенциал должен быть одинаков. Высота перегородки должна быть больше, чем диаметр кабелей.

## По кабелю должны передаваться сигналы одной группы (см. Рис. Q34)

Если необходимо использовать кабель для передачи сигналов разных групп, требуется внутреннее экранирование для ограничения перекрестных помех (в дифференциальном режиме). Для групп 1, 2 и 3 экранирующая оболочка (предпочтительно оплетка) должна быть соединена на каждом конце.

## Рекомендуется экранирование помехообразующих и чувствительных кабелей (см. Рис. Q35)

Экранирование служит в качестве защиты от высокочастотных помех в синфазном и дифференциальном режимах, если экран соединен на каждом конце с помощью кольцевого соединителя, кольцевой скобы или хомута. Использование обычного соединительного провода недостаточно.

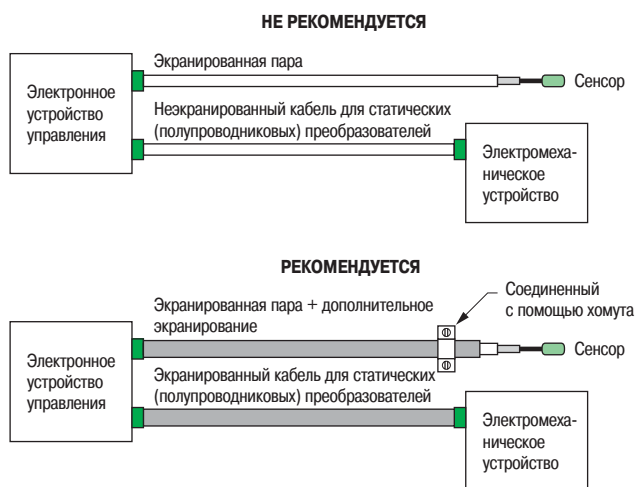


Рис. Q35 : Внутреннее и наружное экранирование помехообразующих и чувствительных кабелей

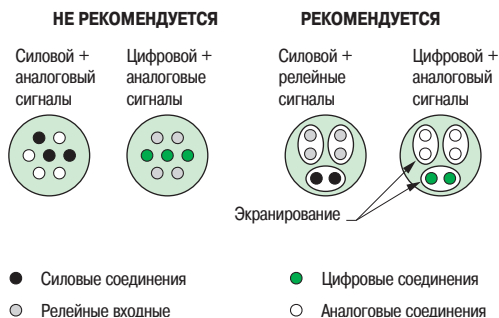


Рис. Q34 : Несовместимые сигналы = разные кабели

## Избегайте использования одного разъема для передачи сигнала разных групп (см. Рис. Q36)

Кроме случаев, когда это необходимо для групп 1 и 2 (дифференциальный режим). Если используется один разъем для аналоговых и цифровых сигналов, две группы должны разделяться минимум одной контактной группой (присоединенной к нулевому потенциалу) и используемой в качестве барьера.

## Все резервные проводники должны быть всегда соединены на каждом конце с системой уравнивания потенциалов (см. Рис. Q37)

Для группы 4 эти соединения не рекомендуются для линий с очень низкими уровнями напряжения и частоты (из-за риска создания шумов при частотах передачи вследствие магнитной индукции).

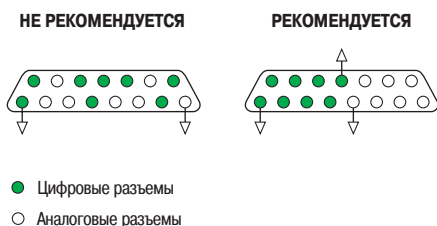


Рис. Q36 : Разделение применяется также к разъемам

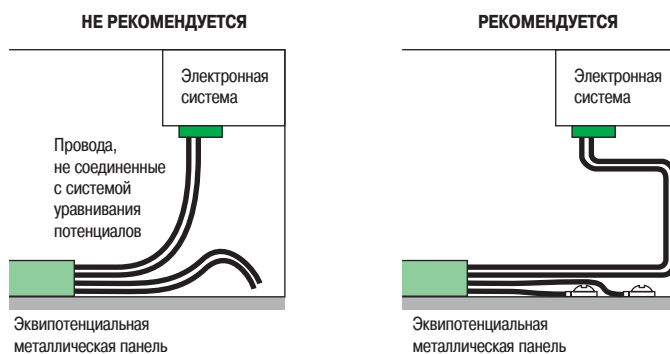
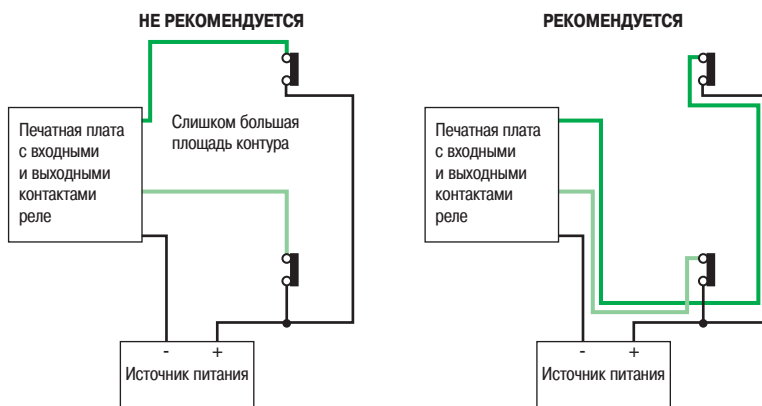


Рис. Q37 : Неиспользуемые проводники должны быть соединены с системой уравнивания потенциалов

**Два проводника должны располагаться как можно ближе друг к другу (см. Рис. Q38)**

Это особенно важно для низкоуровневых датчиков. Даже в случае релейных сигналов, вместе с активными проводниками должен использоваться, по крайней мере, один общий проводник на жгут проводников. Для аналоговых и цифровых сигналов минимальным требованием являются витые пары. Использование витой пары (в дифференциальном режиме) гарантирует, что два провода останутся вместе на протяжении всей длины кабеля.

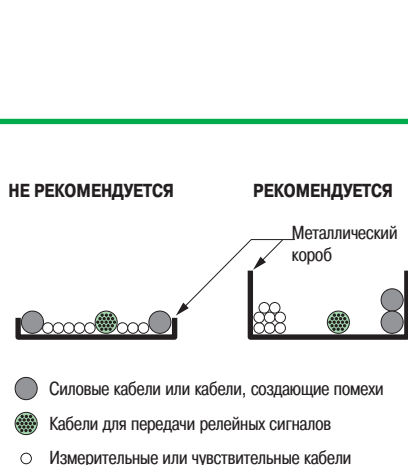


**Рис. Q38** : Два провода должны быть проложены как можно ближе друг к другу

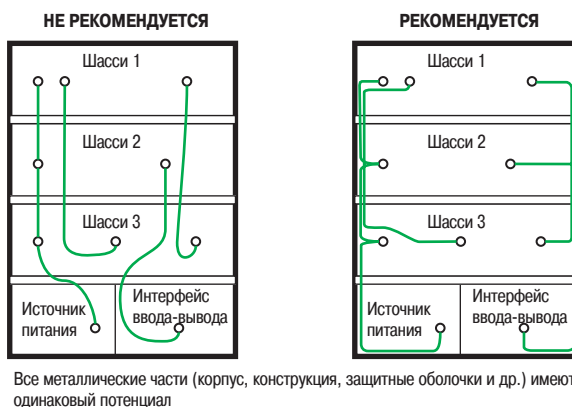
**Кабели Группы 1 не требуют экранирования при наличии фильтров**  
Но они должны состоять из витых пар в соответствии с предыдущим разделом.

**Кабели должны располагаться по всей длине непосредственно на соединенных металлических конструкциях (см. Рис. Q39)**

Например: крышки, металлические коробки, конструкции и т.д. Это обеспечивает надежное, недорогое и значительное ослабление помех (в фазном режиме) и ослабление наводок (в дифференциальном режиме). При этом все элементы металлических конструкций должны быть электрически связаны друг с другом.



**Рис. Q40** : Прокладка кабелей в коробах



**Рис. Q39** : Прокладка рабочих проводников непосредственно по соединенным металлическим конструкциям

**Использование металлического корпуса (с правильно соединенными конструктивными элементами) значительно улучшает внутреннюю электромагнитную совместимость (см. Рис. Q40)**

## Schneider Electric в странах СНГ

### Беларусь

#### Минск

220006, ул. Белорусская, 15, офис 9  
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34, 227 60 72

### Казахстан

#### Алматы

050050, ул. Табачнозаводская, 20  
Швейцарский центр  
Тел.: (727) 244 15 05 (многоканальный)  
Факс: (727) 244 15 06, 244 15 07

#### Астана

010000, ул. Бейбитшилик, 18  
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002», офис 402  
Тел.: (3172) 91 06 69  
Факс: (3172) 91 06 70

#### Атырау

060002, ул. Абая, 2-А  
Бизнес-центр «Сутас-С», офис 407  
Тел.: (3122) 32 31 91, 32 66 70  
Факс: (3122) 32 37 54

### Россия

#### Волгоград

400089, ул. Профсоюзная, 15, офис 12  
Тел.: (8442) 93 08 41

#### Воронеж

394026, пр-т Труда, 65, офис 267  
Тел.: (4732) 39 06 00  
Тел./факс: (4732) 39 06 01

#### Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104  
Офисы 311, 313  
Тел.: (343) 217 63 37  
Факс: (343) 217 63 38

#### Иркутск

664047, ул. 1-я Советская, 3 Б, офис 312  
Тел./факс: (3952) 29 00 07, 29 20 43

#### Казань

420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7  
Тел./факс: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

#### Калининград

236040, Гвардейский пр., 15  
Тел.: (4012) 53 59 53  
Факс: (4012) 57 60 79

#### Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268 В  
Офисы 316, 314  
Тел.: (861) 210 06 38, 210 14 45  
Факс: (861) 210 06 02

#### Красноярск

660021, ул. Горького, 3 А, офис 302  
Тел.: (3912) 56 80 95  
Факс: (3912) 56 80 96

#### Москва

129281, ул. Енисейская, 37  
Тел.: (495) 797 40 00  
Факс: (495) 797 40 02

#### Мурманск

183038, ул. Воровского, д. 5/23  
Конгресс-отель «Меридиан», офис 739  
Тел.: (8152) 28 86 90  
Факс: (8152) 28 87 30

#### Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, этаж 8  
Тел./факс: (831) 278 97 25, 278 97 26

### Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501  
Тел.: (383) 358 54 21  
Тел./факс: (383) 227 62 53

### Пермь

614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11  
Тел./факс: (342) 290 26 11 / 13 / 15

### Ростов-на-Дону

344002, ул. Социалистическая, 74, литера А  
Тел.: (863) 200 17 22, 200 17 23  
Факс: (863) 200 17 24

### Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27  
Тел./факс: (846) 266 41 41, 266 41 11

### Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, кор. 2 А  
Тел.: (812) 320 64 64  
Факс: (812) 320 64 63

### Сочи

354008, ул. Виноградная, 20 А, офис 54  
Тел.: (8622) 96 06 01, 96 06 02  
Факс: (8622) 96 06 02

### Уфа

450098, пр-т Октября, 132/3 (бизнес-центр КПД)  
Блок-секция № 3, этаж 9  
Тел.: (347) 279 98 29  
Факс: (347) 279 98 30

### Хабаровск

680000, ул. Муравьева-Амурского, 23, этаж 4  
Тел.: (4212) 30 64 70  
Факс: (4212) 30 46 66

### Украина

#### Днепропетровск

49000, ул. Глинки, 17, этаж 4  
Тел.: (380567) 90 08 88  
Факс: (380567) 90 09 99

#### Донецк

83087, ул. Инженерная, 1 В  
Тел.: (38062) 385 48 45, 385 48 65  
Факс: (38062) 385 49 23

#### Киев

03057, ул. Смоленская, 31-33, кор. 29  
Тел.: (38044) 538 14 70  
Факс: (38044) 538 14 71

#### Львов

79015, ул. Тургенева, 72, кор. 1  
Тел./факс: (38032) 298 85 85

#### Николаев

54030, ул. Никольская, 25  
Бизнес-центр «Александровский», офис 5  
Тел./факс: (380512) 58 24 67, 58 24 68

#### Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213  
Тел./факс: (38048) 728 65 55, 728 65 35

#### Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11  
Тел.: (380652) 44 38 26  
Факс: (380652) 54 81 14

#### Харьков

61070, ул. Академика Проскуры, 1  
Бизнес-центр «Telesens», офис 569  
Тел.: (38057) 719 07 79  
Факс: (38057) 719 07 49

### Центр поддержки клиентов

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)  
Тел.: (495) 797 32 32, факс: (495) 797 40 04  
ru.csc@ru.schneider-electric.com  
www.schneider-electric.ru