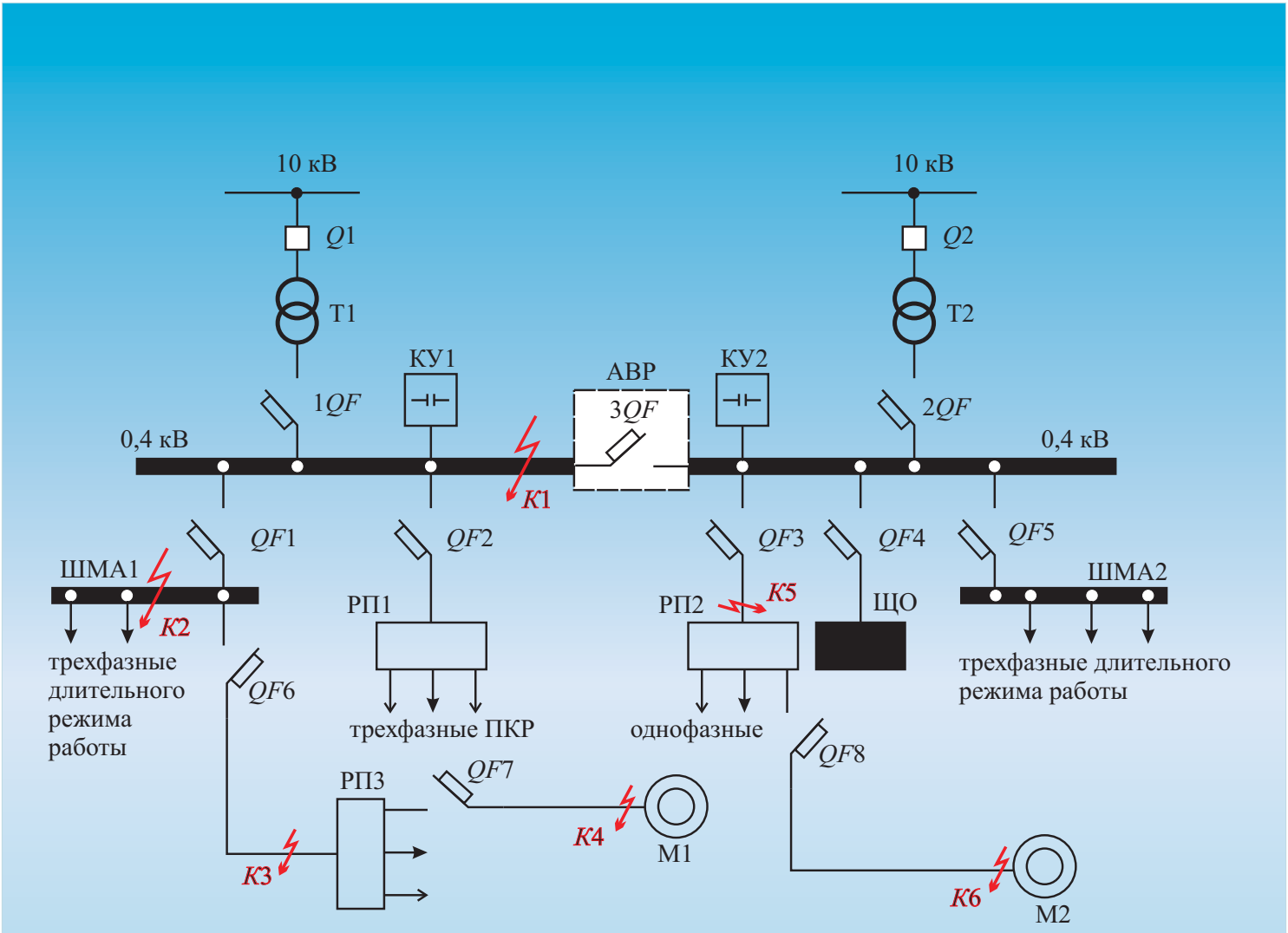
Библиотека СОК



А.В. Кабышев

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Ч.2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**»

А.В. Кабышев

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ
Часть 2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В

Рекомендовано в качестве учебного пособия

Издательство
Томского политехнического университета
2009

УДК 621.31.031(075.8)
ББК 31.279.1я73
К12

Кабышев А.В.

К12 Электроснабжение объектов. Ч. 2. Расчет токов короткого замыкания в электроустановках до 1000 В: учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009 – 168с.

Изложены основные положения построения электрических сетей напряжением до 1000 В и методы расчета в них токов симметричных и несимметричных коротких замыканий, необходимых для выбора аппаратуры, защит и проводников. В сетях данного класса напряжения эти вопросы неразрывно связаны и должны решаться совместно. Системы заземления электрических сетей рассмотрены с учетом требований ПУЭ седьмого издания. Для лучшего усвоения материала основные положения иллюстрируются численными примерами.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140200 – «Электроэнергетика» (магистерские программы «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения» и «Возобновляемые источники энергии»), специальности 140211 – «Электроснабжение».

ББК 31.279.1я73
УДК 621.31.031(075.8)

Рецензенты

Технический директор ОАО «Томский электроламповый завод», г. Томск
А.И. Прудников

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ высоких напряжений
Ф.В. Конусов

© А.В. Кабышев, 2009
© Томский политехнический университет, 2009
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. СХЕМЫ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ, ИХ ОСОБЕННОСТИ 7
   1.1. Режимы заземления нейтрали в сетях до 1000 В 7
      1.1.1. Сеть TN–C 11
      1.1.2. Сеть TN–S.....12
      1.1.3. Сеть TN–C–S.....13
      1.1.4. Сеть TT 13
      1.1.5. Сеть IT.....15
      1.1.6. Краткие рекомендации по выбору сетей.....16
   1.2. Схемы силовых сетей напряжением до 1000 В 17
      1.2.1. Радиальные схемы 17
      1.2.2. Магистральные схемы.....20
      1.2.3. Смешанные схемы 23
   1.3. Схемы осветительных сетей 25
      1.3.1. Питающая и распределительная сети освещения 25
      1.3.2. Групповая сеть освещения.....26
      1.3.3. Расчет сетей осветительных установок.....31
   1.4. Схемы питания передвижных электроприемников 34
   1.5. Система уравнивания потенциалов на вводе в здания 39
   1.6. Сети защитного заземления.....42
   1.7. Тестовые и расчетные задания по построению цеховых сетей.....44
      1.7.1. Тестовые задания.....44
      1.7.2. Расчетные и графические задания 62

2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1000 В 74
   2.1. Цель и особенности расчетов 74
   2.2. Сопротивления элементов схемы замещения.....75
   2.3. Приведение сопротивлений к расчетному напряжению 88
   2.4. Расчет токов междуфазного короткого замыкания при питании от энергосистемы.....91
      2.4.1. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания.....91
      2.4.2. Определение ударных токов короткого замыкания.....92
      2.4.3. Влияние электродвигателей на токи короткого замыкания.....93
      2.4.4. Тепловой импульс тока короткого замыкания.....94

2.4.5. Распределение тока короткого замыкания по параллельно включенным элементам сети....96
2.4.6. Расчет напряжений при коротких замыканиях 100
2.5. Расчет токов однофазного короткого замыкания при питании от энергосистемы....101
2.5.1. Расчет активного и индуктивного сопротивлений силовых кабелей 101
2.5.2. Сопротивления силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ с разными схемами соединения обмоток....111
2.5.3. Расчет однофазного металлического короткого замыкания....120
2.5.4. Расчет однофазного короткого замыкания через переходные сопротивления 124
2.6. Расчет токов короткого замыкания при питании от аварийных генераторов 126
2.7. Влияние нагрузки на ток короткого замыкания....127
2.8. Несимметричные короткие замыкания за трансформаторами....130
2.9. Тестовые и расчетные задания по определению токов короткого замыкания....133
2.9.1. Тестовые задания....133
2.9.2. Расчетные задания....150
Библиографический список....164
Приложение 1....165
Приложение 2....167

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети напряжением 0,4 кВ являются наиболее распространенными. Они применяются на всех производственных объектах и во многом определяют надежность работы электроустановок и предприятия в целом. Построение этих сетей определяется технологией производства, требованиями надежности электроснабжения приемников, удобством и безопасностью обслуживания, технико-экономическими показателями, а также требованиями защиты и автоматики.

Многочисленные и разнообразные местные производственные факторы в большой степени определяют систему проводки сети 0,4 кВ, влияют на ее конфигурацию и схему.

Широкая номенклатура современного электротехнического оборудования и проводниково-кабельной продукции определяет уровень технической оснащенности таких сетей. В настоящее время получили распространение понижающие трансформаторы 10(6)/0,4 кВ большой мощности (1000, 1600, 2500 кВА), что привело к увеличению токов короткого замыкания (КЗ) и опасности поражения электрическим током при авариях. Внедряются новые типы защитных аппаратов, способных отключать эти токи, а также ограничивать их максимальное значение, уменьшать термическое и электродинамическое действие на защищаемые сети и аппаратуру.

Требования к техническим мерам защиты регламентируются двумя основополагающими нормативными документами: правилами устройства электроустановок и комплексом стандартов ГОСТ Р 50571. Согласно этим документам безопасное и надежное функционирование электроустановок в сетях 0,4 кВ зависит от способа заземления нейтрали трансформатора на подстанции и открытых проводящих частей у потребителя, от устройства нейтрального проводника в электроустановке. Эти факторы определяют: условия безопасности работы в электрических сетях (защита от поражения электрическим током), значения перенапряжений и способы их ограничения, электромагнитную совместимость в нормальном режиме работы и при коротких замыканиях, пожаробезопасность (вероятность возникновения пожаров при коротких замыканиях), токи при однофазных замыканиях на землю, повреждаемость и выбор оборудования, бесперебойность электроснабжения потребителей, проектирование и эксплуатацию сети. Выбору и принятию технических решений по реализации перечисленных позиций должен предшествовать расчет токов в нормальном режиме эксплуатации и при коротких замыканиях.

Точность определения последних будет определяться принятыми допущениями, учтенными сопротивлениями элементов цепи короткого замыкания, режимом работы схемы.

Цель данного пособия – оказать обучающимся практическую помощь при построении схем сетей 0,4 кВ и расчету в них токов короткого замыкания, необходимых для выбора аппаратуры, защит и проводников. В сетях данного напряжения эти вопросы неразрывно связаны и должны решаться совместно.

Пособие содержит два раздела и охватывает вопросы распределения электроэнергии в промышленных сетях 0,4 кВ с учетом концентрации нагрузок, мощности и характера работы отдельных электроприемников, а также методы определения токов симметричных и несимметричных коротких замыканий. Наличие данного пособия не освобождает студентов от необходимости использования другой технической литературы при детальной проработке отдельных вопросов изложенных тем.

В *первом разделе* приведены сведения о режимах заземления нейтрали в сетях до 1000 В, их преимуществах и существенных недостатках, даны краткие рекомендации по выбору сети с тем или иным типом системы заземления. Рассмотрены схемы силовых и осветительных сетей, схемы питания передвижных электроприемников, система уравнивания потенциалов на вводе в здания и выполнение сетей защитного заземления.

Второй раздел посвящен определению токов короткого замыкания в сетях и электроустановках до 1000 В. Даны методы расчета коротких замыканий при различных условиях и режимах работы систем электроснабжения. Показано, как учесть токоограничивающее действие электрической дуги в месте повреждения, какие значения токов принять для выбора аппаратуры и защит. Рассмотрен анализ несимметричных режимов трехфазных электрических цепей и параметры элементов, составляющих распределительные сети, по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей. Включен материал о влиянии нагрузки на токи короткого замыкания и распределение тока КЗ по параллельно включенным элементам системы электроснабжения.

Рассматриваемые в пособии вопросы проиллюстрированы практическими расчетами и примерами, способствующими усвоению материала. С целью закрепления и углубленного самостоятельного изучения теоретического материала по каждому из разделов приведены тестовые, расчетные и графические задания. По вопросам, которые изложены только частично, по тексту даются ссылки на соответствующую литературу.

1. СХЕМЫ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ, ИХ ОСОБЕННОСТИ

1.1. Режимы заземления нейтрали в сетях до 1000 В

Электрические сети делят по типам применяемых в них систем заземления. Под типом системы заземления понимается показатель, характеризующий отношение к земле нейтрали трансформатора на подстанции или генератора на электростанции (автономное электроснабжение), открытых проводящих частей у потребителя, а также устройство нейтрального проводника в электроустановке напряжением до 1000 В.

Режим заземления нейтрали и открытых проводящих частей обозначается двумя буквами: первая указывает режим заземления нейтрали источника питания (силового трансформатора 6–10/0,4 кВ), вторая – открытых проводящих частей. В обозначениях используются начальные буквы французских слов:

T (terre – земля) – заземлено;

N (neutre – нейтраль) – присоединено к нейтрали источника;

I (isole) – изолировано.

Международной Электротехнической Комиссией (стандарт IEC 60364 "Electrical installation of buildings") и ПУЭ (глава 1.7, седьмое издание) предусматриваются три режима заземления нейтрали и открытых проводящих частей:

TT – нейтраль источника и корпуса электрооборудования глухо заземлены (заземления могут быть и раздельными), рис. 1.1;

IT – нейтраль источника изолирована или заземлена через приборы или устройства, имеющие большое сопротивление; корпуса электрооборудования глухо заземлены (рис. 1.2);

TN – нейтраль источника глухо заземлена, корпуса электрооборудования присоединены к нейтральному проводу.

Режим **TN** может быть трех видов:

TN–C – нулевые рабочий и защитный проводники объединены (**C** – от английского слова combined – объединенный) на всем протяжении (рис. 1.3). Объединенный нулевой проводник называется **PEN** по первым буквам английских слов protective earth, neutral – защитная земля, нейтраль.

TN–S – нулевой рабочий проводник **N** и нулевой защитный проводник **PE** разделены (**S** – от английского слова separated – раздельный), рис. 1.4.

TN–C–S – нулевые рабочий и защитный проводники объединены на головных участках сети в проводник **PEN**, а далее разделены на проводники **N** и **PE** (рис. 1.5).

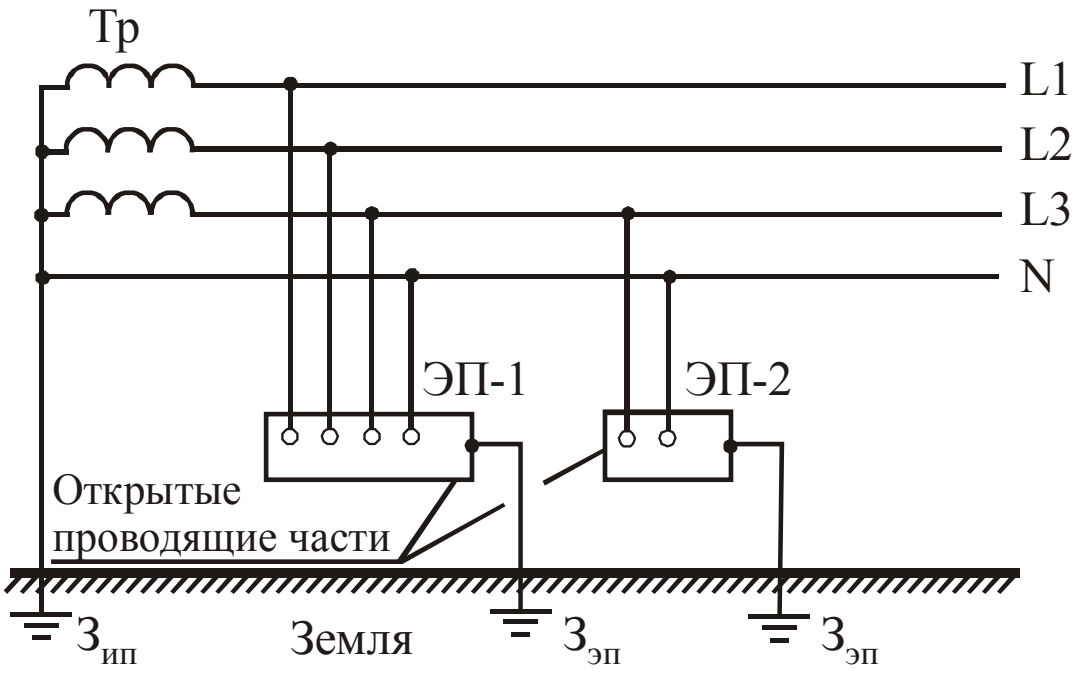


Рис. 1.1. Схема электрической сети с системой заземления типа ТТ

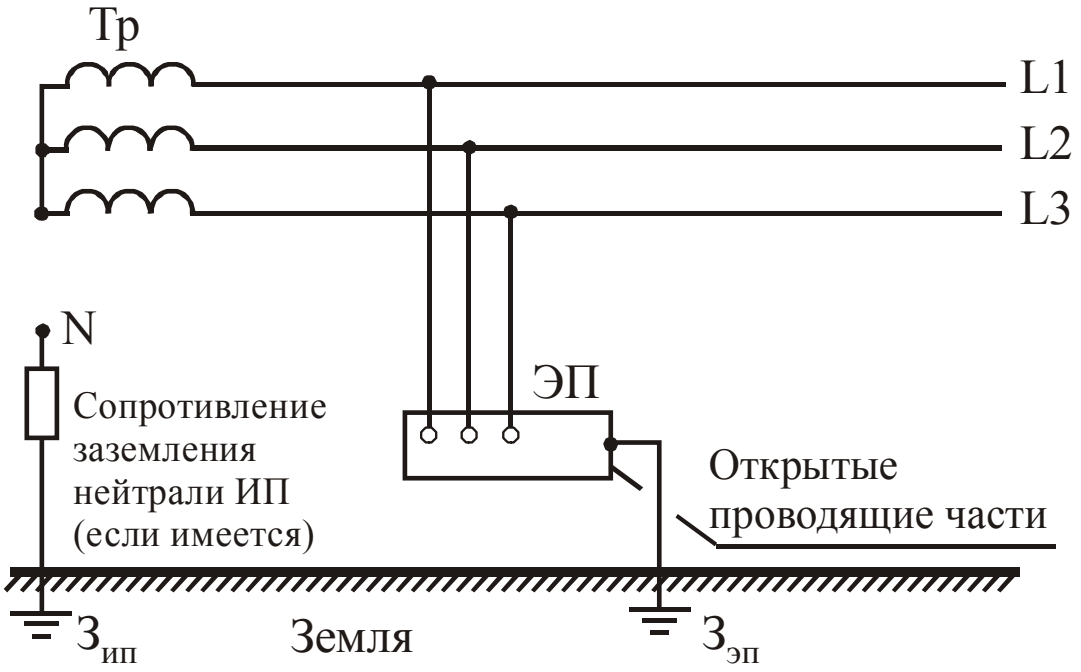


Рис. 1.2. Схема электрической сети с системой заземления типа IT

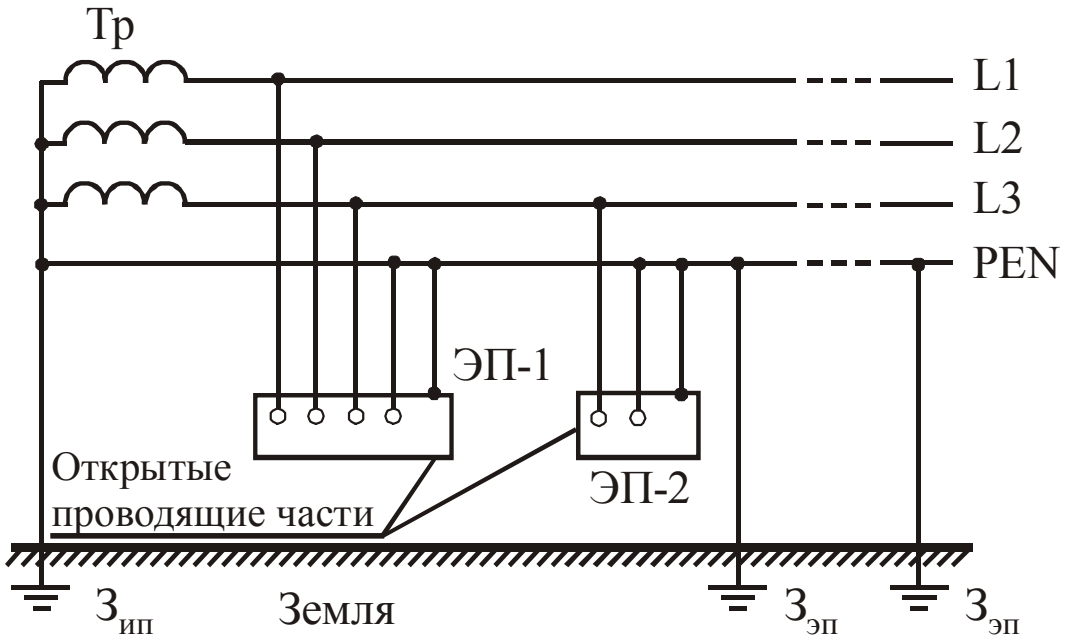


Рис. 1.3. Схема электрической сети с системой заземления типа TN–C

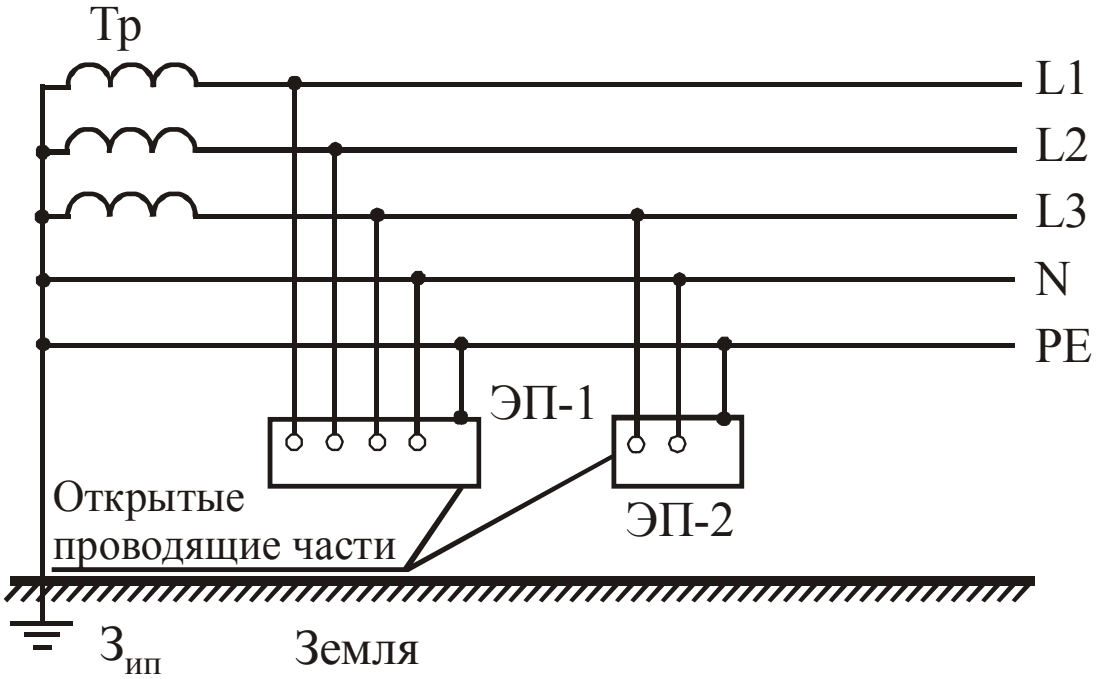


Рис. 1.4. Схема электрической сети с системой заземления типа TN–S

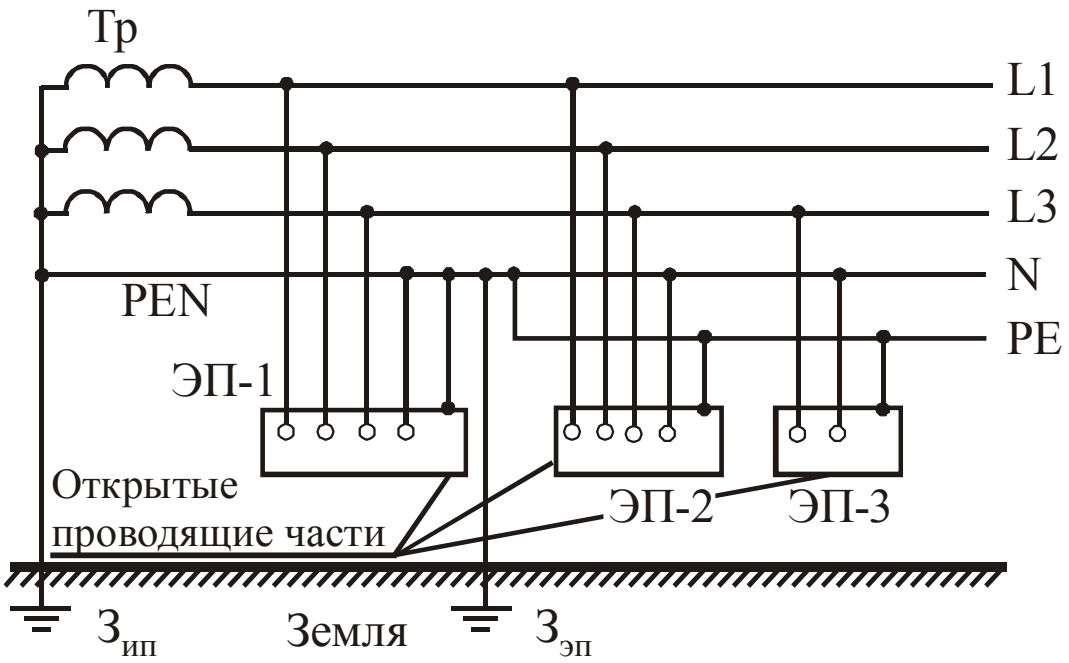


Рис. 1.5. Схема электрической сети с системой заземления типа TN–C–S

Название типа системы заземления электрической сети часто присваивают самой сети. Так, например, электрическую сеть с системой заземления типа TN–C называют сетью типа TN–C или просто сеть TN–C.

Вид связи нейтралей с землей в значительной степени определяет:

– условия безопасности работы в электрических сетях (защита от поражения электрическим током);

– значения перенапряжений и способы их ограничения;

– электромагнитную совместимость в нормальном режиме работы и при коротких замыканиях;

– пожаробезопасность (вероятность возникновения пожаров при коротких замыканиях);

– токи при однофазных замыканиях на землю, повреждаемость и выбор оборудования;

– бесперебойность электроснабжения потребителей;

– проектирование и эксплуатацию сети.

Взяв перечисленное за критерии сравнения, отметим преимущества и существенные недостатки возможных режимов заземления нейтрали и открытых проводящих частей в сетях до 1000 В (на примере сетей 0,4 кВ).

1.1.1. Сеть TN–C

Сети 0,4 кВ с таким режимом заземления нейтрали и открытых проводящих частей (занулением), рис. 1.3, широко распространены в России.

Электробезопасность в сети TN–C при *косвенном прикосновении*[1] обеспечивается отключением возникших однофазных замыканий на корпус с помощью предохранителей или автоматических выключателей. При относительно низких значениях токов однофазного КЗ (удаленность нагрузки от источника, малое сечение проводника) время отключения существенно возрастает. Электропоражение человека, прикоснувшегося к металлическому корпусу, весьма вероятно. Например, для обеспечения электробезопасности отключение КЗ на корпус в сети 220 В должно выполняться за время не более 0,2 с. Такое время отключения предохранители и автоматические выключатели обеспечивают при кратностях токов КЗ по отношению к номинальному току на уровне 6–10.

Таким образом, в сети TN–C существует проблема обеспечения безопасности при косвенном прикосновении из-за невозможности обеспечения быстрого отключения. Кроме этого, в сети TN–C при однофазном КЗ на корпус электроприемника (ЭП) возникает вынос потенциала по нулевому проводу на корпуса неповрежденного оборудования, в том числе отключенного и выведенного в ремонт. Это увеличивает вероятность поражения людей, контактирующих с электрооборудованием сети. Вынос потенциала на все зануленные корпуса возникает и при однофазном КЗ на питающей линии (например, обрыв фазного провода воздушной линии 0,4 кВ с падением на землю) через малое сопротивление (по сравнению с сопротивлением контура заземления подстанции 6–10/0,4 кВ). При этом на время действия защиты на нулевом проводе и присоединенных к нему корпусах возникает напряжение, близкое к фазному. Особую опасность в сети TN–C представляет обрыв (отгорание) нулевого провода. В этом случае все присоединенные за точкой обрыва металлические зануленные корпуса ЭП окажутся под фазным напряжением.

Самым большим недостатком сетей TN–C является неработоспособность в них устройств защитного отключения (УЗО) или residual current devices (RCD) по западной классификации.

---

[1] *Косвенное прикосновение* – электрический контакт людей и животных с открытыми проводящими частями, оказавшимися под напряжением при повреждении изоляции, то есть это прикосновение к металлическому корпусу электрооборудования при пробое изоляции на корпус.

Пожаробезопасность сетей TN–C низка. При однофазных КЗ в этих сетях возникают значительные токи (килоамперы), которые могут вызвать возгорание. Ситуация осложняется возможностью возникновения однофазных замыканий через значительное переходное сопротивление, когда ток замыкания относительно невелик и защиты не срабатывают либо срабатывают со значительной выдержкой времени.

Бесперебойность электроснабжения[2] в сети TN–C при однофазных замыканиях не обеспечивается, так как замыкания сопровождаются значительным током и требуется отключение присоединения.

В процессе однофазного короткого замыкания в сетях TN–C возникает повышение напряжения (перенапряжения) на неповрежденных фазах примерно на 40 %.

Сети TN–C характеризуются наличием электромагнитных возмущений. Это связано с тем, что даже при нормальных условиях работы на нулевом проводнике при протекании рабочего тока возникает падение напряжения. Соответственно между разными точками нулевого провода имеется разность потенциалов. Это вызывает протекание токов в проводящих частях здания, в оболочках и экранах кабелей и соответственно электромагнитные помехи. Электромагнитные возмущения усиливаются при грозовых разрядах и однофазных КЗ со значительным током, протекающим в нулевом проводе.

Значительный ток однофазных КЗ в сетях TN–C может вызвать существенные разрушения электрооборудования.

На стадии проектирования и настройки защит в сети TN–C необходимо знать сопротивления всех элементов сети, в том числе и сопротивления нулевой последовательности для точного расчета токов однофазного КЗ. То есть необходимы расчеты или измерения сопротивления петли фаза–нуль для всех присоединений. Любое изменение в сети (например, увеличение длины присоединения) требует проверки условий защиты.

1.1.2. Сеть TN–S

Сети 0,4 кВ с таким режимом заземления нейтрали и открытых проводящих частей называются пятипроводными (рис. 1.4). В них нулевой рабочий и нулевой защитный проводники разделены.

Использование сети TN–S не обеспечивает электробезопасность при косвенном прикосновении, так как при пробое изоляции на корпусе,

[2] *Бесперебойность электроснабжения* – здесь и далее в разделе речь идет о бесперебойности электроснабжения одного конкретного ЭП, присоединение которого (кабель, ВЛ) или он сам повреждается. При этом подразумевается возникновение однофазного замыкания.

как и в сети TN–C, возникает опасный потенциал. Однако в сетях TN–S возможно использование УЗО. При наличии этих устройств уровень электробезопасности в сети TN–S существенно выше, чем в сети TN–C. При пробое изоляции в сети TN–S также возникает вынос потенциала на корпуса других электроприемников, связанных проводником PE. Однако быстрое действие УЗО в этом случае обеспечивает безопасность. В отличие от сетей TN–C обрыв нулевого рабочего проводника в сети TN–S не влечет за собой появления фазного напряжения на корпусах всех связанных данной линией питания ЭП за точкой разрыва.

Пожаробезопасность сети TN–S при применении УЗО в сравнении с сетями TN–C существенно выше. Устройства защитного отключения чувствительны к развивающимся дефектам изоляции и предотвращают возникновение значительных токов однофазных КЗ.

В отношении бесперебойности электроснабжения и возникновения перенапряжений сети TN–S не отличаются от сетей TN–C.

Электромагнитная обстановка в сетях TN–S в нормальном режиме лучше, чем в сетях TN–C. Это обусловлено тем, что нулевой рабочий проводник изолирован и отсутствует ответвление токов в сторонние проводящие пути. При однофазных КЗ создаются такие же электромагнитные возмущения, как и в сетях TN–C.

Наличие в сетях TN–S устройств защитного отключения существенно снижает объем повреждений при возникновении однофазных КЗ по сравнению с сетями TN–C, так как УЗО ликвидирует повреждение в его начальной стадии.

В отношении проектирования, настройки защит и обслуживания сети TN–S не имеют каких-либо преимуществ по сравнению с сетями TN–C. Они более дорогие из-за наличия пятого провода и УЗО.

1.1.3. Сеть TN–C–S

Это комбинация рассмотренных выше двух типов сетей (рис. 1.5). Для нее справедливы все преимущества и недостатки, отмеченные выше.

1.1.4. Сеть TT

Особенностью сетей данного типа является то, что открытые проводящие части ЭП присоединены к заземлению, которое обычно независимо от заземления питающей подстанции 6–10/0,4 кВ (рис. 1.1).

Электробезопасность в этих сетях обеспечивается использованием УЗО в обязательном порядке, так как сам режим ТТ не обеспечивает безопасности при косвенном прикосновении. Если сопротивление местного заземлителя, к которому присоединены открытые проводящие части, равно сопротивлению заземления питающей подстанции 6–10/0,4 кВ и возникает замыкание на корпус, то напряжение прикосновения составит половину фазного (110 В для 220 В). Такое напряжение опасно, и необходимо немедленное отключение поврежденного присоединения. Автоматические выключатели и предохранители за безопасное для прикоснувшегося человека время отключение не обеспечивают из-за малой величины тока однофазного КЗ. Например, если принять, что сопротивления заземления питающей подстанции 6–10/0,4 кВ и местного заземления равны по 0,5 Ом, и пренебречь сопротивлениями силового трансформатора, кабеля и других элементов, то при фазном напряжении 220 В ток однофазного КЗ на корпус в сети ТТ составит 220 А. С учетом всех сопротивлений в цепи замыкания ток будет еще меньше.

Пожаробезопасность сетей ТТ существенно выше, чем сетей TN–C. Это связано с малой величиной тока однофазного КЗ и с применением УЗО, без которых эти сети эксплуатироваться не могут.

Бесперебойность электроснабжения в сетях ТТ при однофазных замыканиях не обеспечивается, так как требуется отключение присоединения по условиям безопасности.

При возникновении в сети ТТ однофазного замыкания на землю напряжение на неповрежденных фазах относительно земли повышается. Это обусловлено появлением напряжения на нейтрали питающего трансформатора. Если принять указанные выше сопротивления, то напряжение на нейтрали составит половину фазного. Такое повышение не опасно для изоляции, так как КЗ быстро ликвидируется действием УЗО, причем в большинстве случаев до своего полного развития и достижения током максимума.

В системе ТТ обычно несколько корпусов ЭП объединены одним защитным проводником PE и присоединены к общему заземлителю, отдельному от заземлителя питающей подстанции. Выполнять отдельный заземлитель для каждого ЭП нецелесообразно по экономическим соображениям. В нормальном режиме по защитному проводнику в системе ТТ ток не протекает и между корпусами отдельных электроприемников нет разности потенциалов, то есть электромагнитные возмущения отсутствуют. При возникновении однофазного КЗ ток невелик, при его протекании падение напряжения

на защитном проводнике незначительно, длительность протекания тока мала, то есть возникающие при этом возмущения невелики.

Таким образом, с позиций электромагнитных возмущений сеть ТТ имеет преимущество по сравнению с сетями TN–C в нормальном режиме работы и с сетями TN–C, TN–S, TN–C–S в режиме однофазного КЗ.

Объем повреждений оборудования в сетях ТТ при возникновении однофазного КЗ незначителен. Это связано с малой величиной тока по сравнению с сетями TN–C, TN–S, TN–C–S и с использованием УЗО, которые обеспечивают отключение до полного развития повреждения.

С точки зрения проектирования сети ТТ имеют существенное преимущество по сравнению с сетями TN. Использование в сетях ТТ устройств защитного отключения устраняет проблемы, связанные с ограничением длины линий, необходимостью знать полное сопротивление петли короткого замыкания. Сеть может быть расширена или изменена без повторного расчета токов КЗ или замера сопротивления петли тока короткого замыкания. Учитывая, что ток однофазного КЗ в сетях ТТ меньше, чем в сетях TN–S, TN–C–S, сечение защитного проводника PE в сети ТТ может быть меньше.

1.1.5. Сеть IT

Нейтральная точка питающего трансформатора 6–10/0,4 кВ такой сети изолирована от земли или заземлена через значительное сопротивление (сотни Ом – несколько кОм), рис. 1.2. Защитный проводник отделен от нейтрального.

Электробезопасность при однофазном замыкании на корпус в этих сетях наиболее высокая из всех рассмотренных. Это связано с малой величиной тока однофазного замыкания (единицы ампер). При таком токе замыкания напряжение прикосновения крайне невелико и отсутствует необходимость немедленного отключения возникшего повреждения. В сети IT безопасность может быть улучшена за счет применения УЗО.

Пожаробезопасность сетей IT самая высокая по сравнению с сетями TN–C, TN–S, TN–C–S и TT. Это обусловлено наименьшей величиной тока однофазного замыкания (единицы ампер) и малой вероятностью возгорания.

Сети IT отличаются высокой бесперебойностью электроснабжения потребителей. Однофазное замыкание не требует немедленного отключения.

При возникновении в сети IT однофазного замыкания на землю напряжение на неповрежденных фазах увеличивается в 1,73 раза.

В сетях без резистивного заземления возможно возникновение дуговых перенапряжений высокой кратности.

Электромагнитные возмущения в сетях IT невелики, так как ток однофазного КЗ мал и не создает значительных падений напряжения на защитном проводнике.

Повреждения оборудования при возникновении в сетях IT однофазного замыкания незначительны.

Для эксплуатации сети IT необходим квалифицированный персонал, способный быстро находить и устранять возникшее замыкание. Для определения поврежденного присоединения необходимо специальное устройство, например, можно использовать включенный в нейтраль генератор тока с частотой, отличной от промышленной. Сети IT имеют ограничение на расширение сети, так как новые присоединения увеличивают ток однофазного замыкания.

1.1.6. Краткие рекомендации по выбору сетей

Ни один из способов заземления нейтрали и открытых проводящих частей не является универсальным. В каждом конкретном случае необходимо проводить технико-экономическое сравнение и исходить из критериев: электробезопасности, пожаробезопасности, уровня бесперебойности электроснабжения, технологии производства, электромагнитной совместимости (включая последствия грозовых разрядов молнии), наличия квалифицированного персонала, возможности последующего расширения и изменения сети.

В качестве общих рекомендаций для выбора той или иной сети можно указать следующее:

1. Сети TN–C и TN–C–S характеризуются низким уровнем электро- и пожаробезопасности, а также возможностью значительных электромагнитных возмущений.

2. Сети TN–S рекомендуются для статичных (не подверженных изменениям) установок, когда сеть проектируется "раз и навсегда".

3. Сети TT следует использовать для временных, расширяемых и изменяемых электроустановок.

4. Сети IT следует использовать в тех случаях, когда бесперебойность электроснабжения является крайне необходимой.

Возможны варианты, когда в одной и той же сети следует использовать два или три режима. Например, когда вся сеть получает питание по сети TN–S, а часть ее через разделительный трансформатор по сети IT.

1.2. Схемы силовых сетей напряжением до 1000 В

Построение схем силовых сетей определяется технологией производства, требованиями надежности электроснабжения приемников, удобством и безопасностью обслуживания, технико-экономическими показателями, а также требованиями защиты и автоматики [1]. Схемы могут выполняться радиальными, магистральными и смешанными. По принципу питания бывают с одно- и двухсторонним питанием.

1.2.1. Радиальные схемы

От комплектной трансформаторной подстанции (КТП) или главного распределительного щита отходят линии питания электроприемников (ЭП) и двигателей (*Д1* и *Д8*) большой мощности, а также сборок 1–4 (распределительных пунктов) (рис. 1.6). Нецелесообразно к главному щиту подключать большое количество ЭП малой и средней мощности: они снижают его надежность. Для питания таких электроприемников (например, *Д2–Д10*) образуют вторичные сборки, питающиеся непосредственно от основного щита, и третичные сборки, питающиеся от вторичных сборок. Третичные сборки обладают наименьшей надежностью. Обеспечить их селективную защиту трудно. Применяются они для питания мелких и неответственных ЭП. Токи короткого замыкания на сборках меньше, чем на главном щите. Это позволяет применять аппаратуру с небольшими номинальными токами. При формировании сборок учитывается территориальное расположение ЭП, удобство и безопасность обслуживания, возможность экономии кабелей. Сечение кабелей, питающих сборки, выбирают по расчетному току, отличающемуся от суммы номинальных токов подключенных электроприемников [2].

Распределение электродвигателей по сборкам зависит от их мощности и возможности выполнения защиты. К главному щиту целесообразно подключать электродвигатели мощностью более 55 кВт. Электродвигатели малой (до 10 кВт) и средней (10–55 кВт) мощности рекомендуется подключать ко вторичным сборкам. Однако в зависимости от конкретных особенностей электроустановки одиночные двигатели большой мощности (но не более 100 кВт) иногда могут подключаться к вторичным сборкам, а средней – к основному щиту.

Следует избегать питания мало амперных (до 15–20 А) электроприемников отдельными линиями от силовых пунктов, в особенности от пунктов с автоматическими выключателями. В этом случае подключения возможно цепочкой или под один защитный аппарат (рис. 1.7).

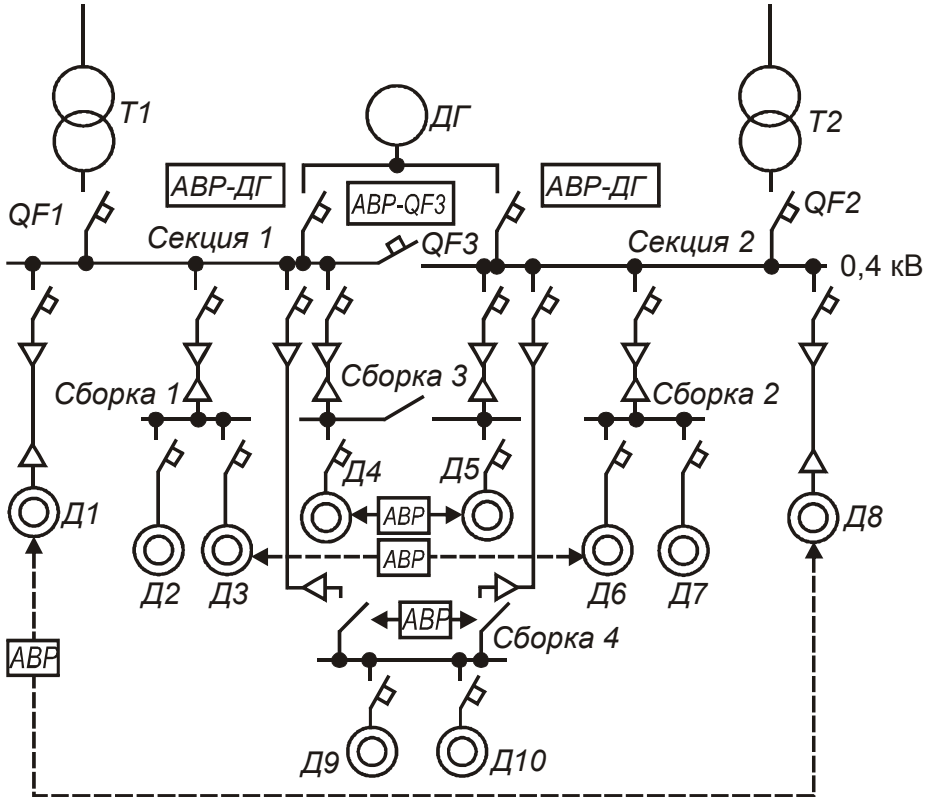


Рис. 1.6. Радиальная схема распределения электроэнергии: Т – питающие трансформаторы; ДГ – аварийный дизель-генератор; QF – вводные и секционный автоматические выключатели; Д – электродвигатели

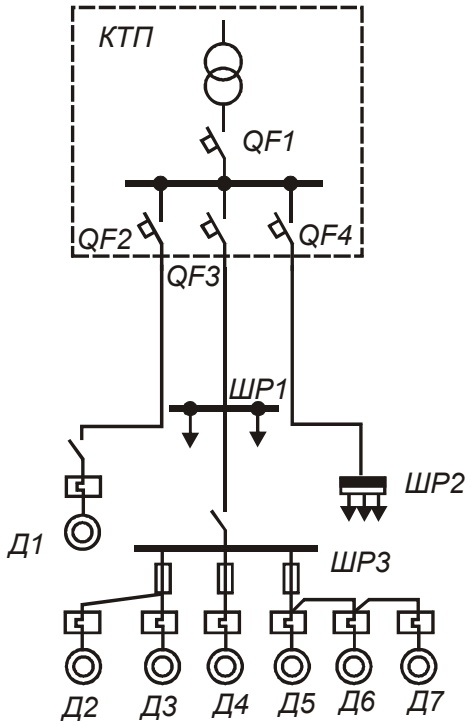


Рис. 1.7. Схема подключения электроприемников цепочкой (Д5–Д7) и под один защитный аппарат (Д2, Д3)

В ответственных электроустановках с целью обеспечения надежности электроснабжения схему делят на две независимые части (подсистемы). Каждая состоит из понижающего трансформатора *Т1* (*Т2*), питающегося от независимого источника, соответствующей секции главного щита и питающихся от нее вторичных сборок. Подсистемы взаимно резервируются на разных ступенях напряжения с помощью устройств автоматического включения резерва (АВР). Электродвигатели и приводимые ими ответственные механизмы одного назначения могут дублироваться и снабжаться технологическим АВР (*Д1* и *Д8*, *Д3* и *Д6* (рис. 1.6)). Такие электродвигатели также разделяют на две независимые группы, которые подключают к разным подсистемам (к разным секциям главного щита; к сборкам *1* и *2*, имеющим вводы от разных секций; к разным секциям сборки *3*). Ответственные электродвигатели, не имеющие технологического резервирования, подключают либо к секциям главного щита, либо к сборке *4*, имеющей АВР со стороны питания.

При таком построении схемы надежность работы обеспечивается тем, что в случае погашения одной из подсистем и отказа или неуспешной работы АВР между подсистемами (КЗ на шинах) напряжение в другой подсистеме сохраняется и нарушения технологического процесса не произойдет, так как сработает АВР электродвигателей и других ответственных электроприемников.

Для электроприемников особой группы первой категории предусматривают третий, аварийный источник питания, например, аварийный дизель-генератор *ДГ*. Один из вариантов его подключения показан на рис. 1.6. Здесь он резервирует каждую из подсистем независимо от состояния другой. Чтобы не перегрузить генератор, все электроприемники, кроме особо ответственных, отключаются при потере основных источников питания защитой минимального напряжения (с выдержкой времени), а затем устройство АВР дизель-генератора включает питание.

Радиальные схемы распределения электроэнергии рекомендуется применять в случае:

- взрывоопасных, пожароопасных и пыльных производств;
- питания индивидуальных электроприемников;
- питания низковольтных устройств распределения электро-энергии, если они расположены в разных направлениях от источника питания.

Питание обычно выполняется проводами и кабелями.

Недостаток радиальных схем – отсутствие гибкости, при перемещении технологического оборудования требуется переделка

электрических сетей. Распределительные устройства 0,4 кВ ТП получаются громоздкими, с большим количеством коммутационных аппаратов.

1.2.2. Магистральные схемы

Распределение электроэнергии от трансформаторов *Т*1 и *Т*2 до сборок *1*, *2* и электродвигателей *Д*1, *Д*2 выполняется с помощью шинопроводов магистральных (*ШМ*) и/или распределительных (*ШР*), к которым подсоединяют электроприемники (рис. 1.8). В тех случаях, когда характер среды в цехе или размещение технологического оборудования по площади цеха, делают невозможным применение магистральных шинопроводов, используют кабельные магистрали (рис. 1.9). Сечение кабельных магистралей одинаково по всей длине.

Подключение магистрали к сборным шинам распредустройства КТП осуществляется через линейные автоматические выключатели или наглухо, без коммутационного аппарата (блок трансформатор–магистраль). В последнем случае защита магистрали осуществляется вводным выключателем.

Для питания большого числа ЭП небольшой мощности относительно равномерно распределенных по площади цеха применяют схемы с двумя видами магистральных линий: питающими и распределительными (рис. 1.10). Питающие магистрали подключают к шинам шкафов трансформаторной подстанции, специально сконструированных для магистральных схем. Распределительные магистрали, к которым непосредственно подключают электроприемники, получают питание от главных питающих магистралей или непосредственно от шин КТП, если не применяют главные магистрали (рис. 1.11).

К главным питающим магистралям подсоединяют небольшое число индивидуальных электроприемников. Это повышает надежность всей системы питания.

В условиях неблагоприятных сред магистральные схемы нежелательны. При их применении коммутационные аппараты неизбежно распределены по площади цеха и подвергаются воздействию агрессивной среды. В таких цехах наибольшее применение находят радиальные схемы питания (раздел 1.2.1), при которых все коммутационные аппараты располагаются в отдельных помещениях, изолированных от неблагоприятных агрессивных и взрывоопасных сред.

Магистральные схемы универсальны, позволяют производить перестановку производственно-технологического оборудования в цехах без существенного изменения электрических сетей.

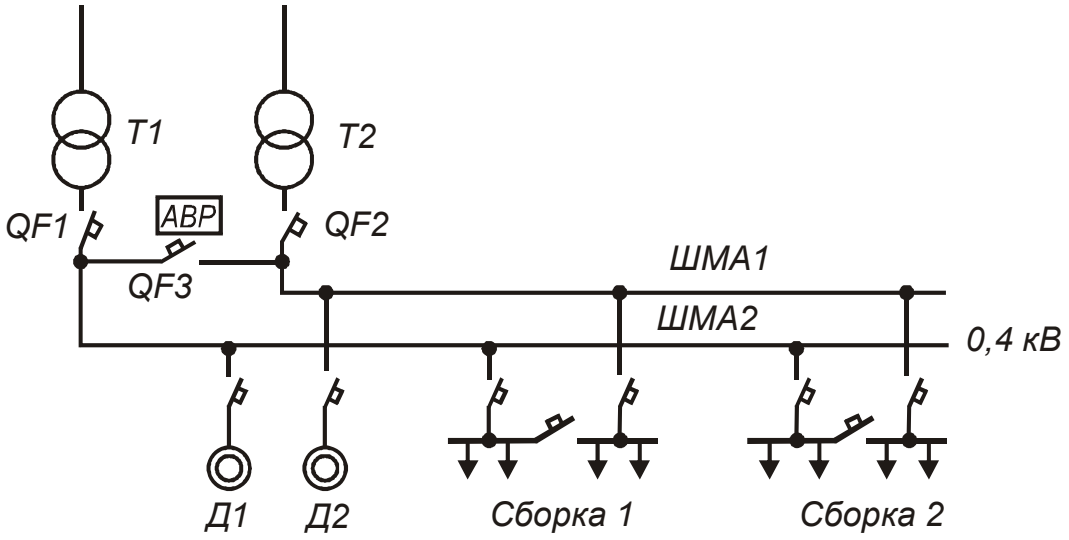


Рис. 1.8. Магистральная схема распределения электроэнергии

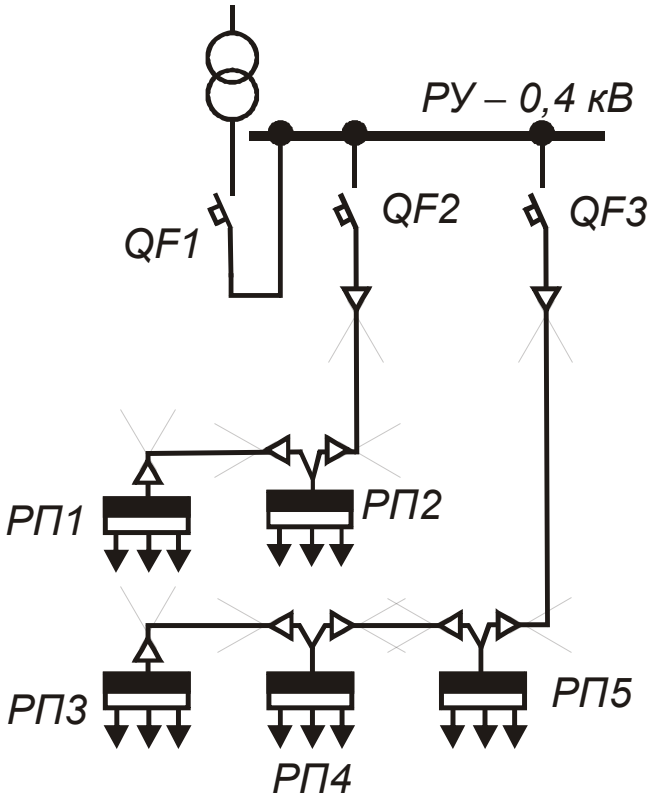


Рис. 1.9. Схема кабельных магистралей

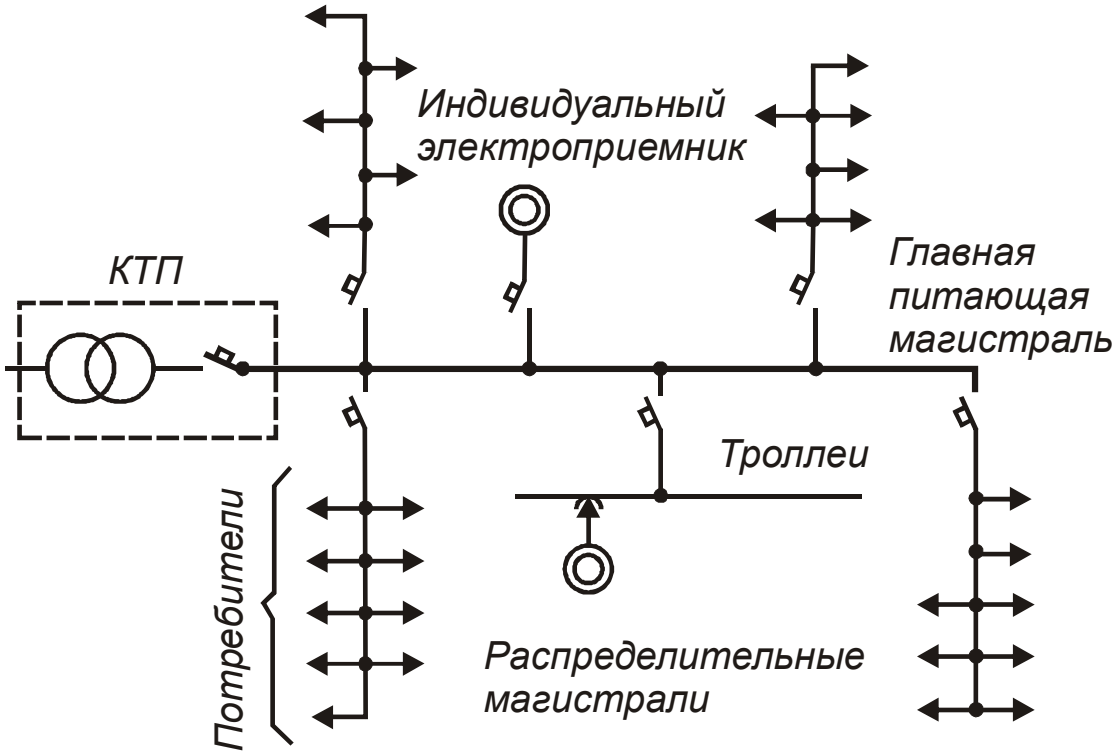


Рис. 1.10. Схема питающих и распределительных линий в цехе

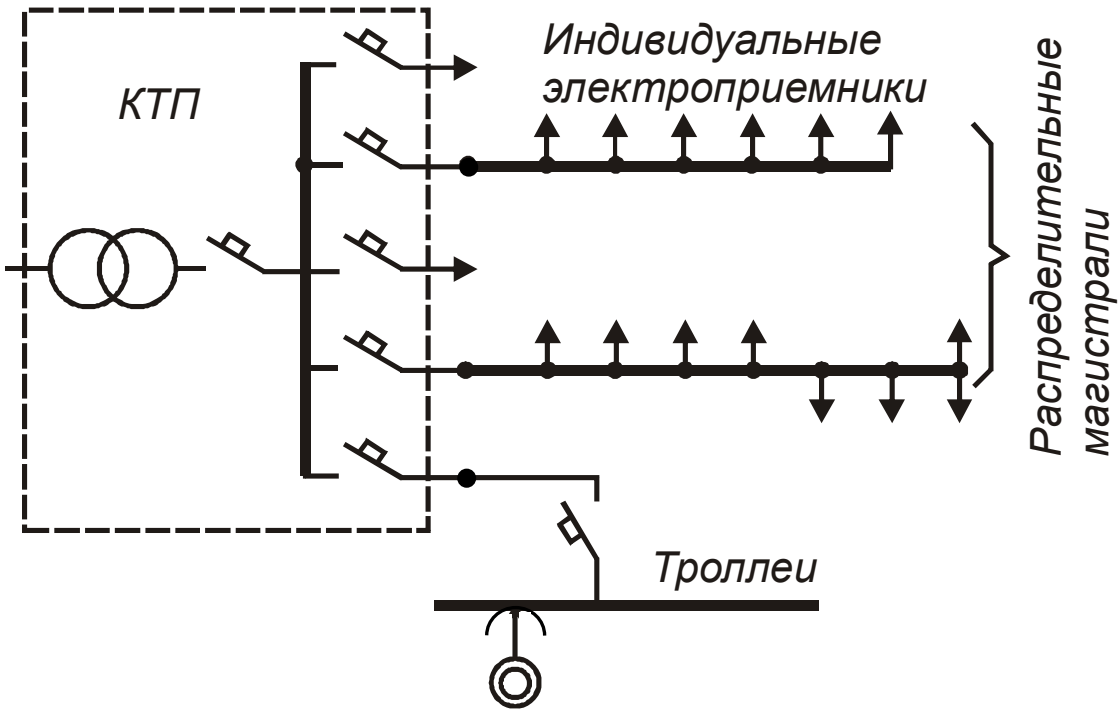


Рис. 1.11. Схема распределительных магистралей, подключенных непосредственно к шинам комплектной трансформаторной подстанции

1.2.3. Смешанные схемы

Представляют собой комбинации из радиальных и магистральных схем. На рис. 1.12 показана одна из таких схем. К основным секциям щитов 0,4 кВ подключены электродвигатели большой мощности *Д1–Д3*, к сборкам *1*, *2*, *3* – двигатели средней мощности *Д4–Д9*. Сборки *4*, *5*, *6*, подключенные кабельной магистралью и имеющие АВР на вводах, предназначены для питания электродвигателей малой мощности. На вводах в сборки *4* и *6* установлены реакторы для снижения токов КЗ и обеспечения стойкости автоматических выключателей отходящих линий. Резервное питание осуществляется от трансформатора $Т_{рез}$ по шинопроводу, имеющему ввод на каждый из основных щитов 0,4 кВ.

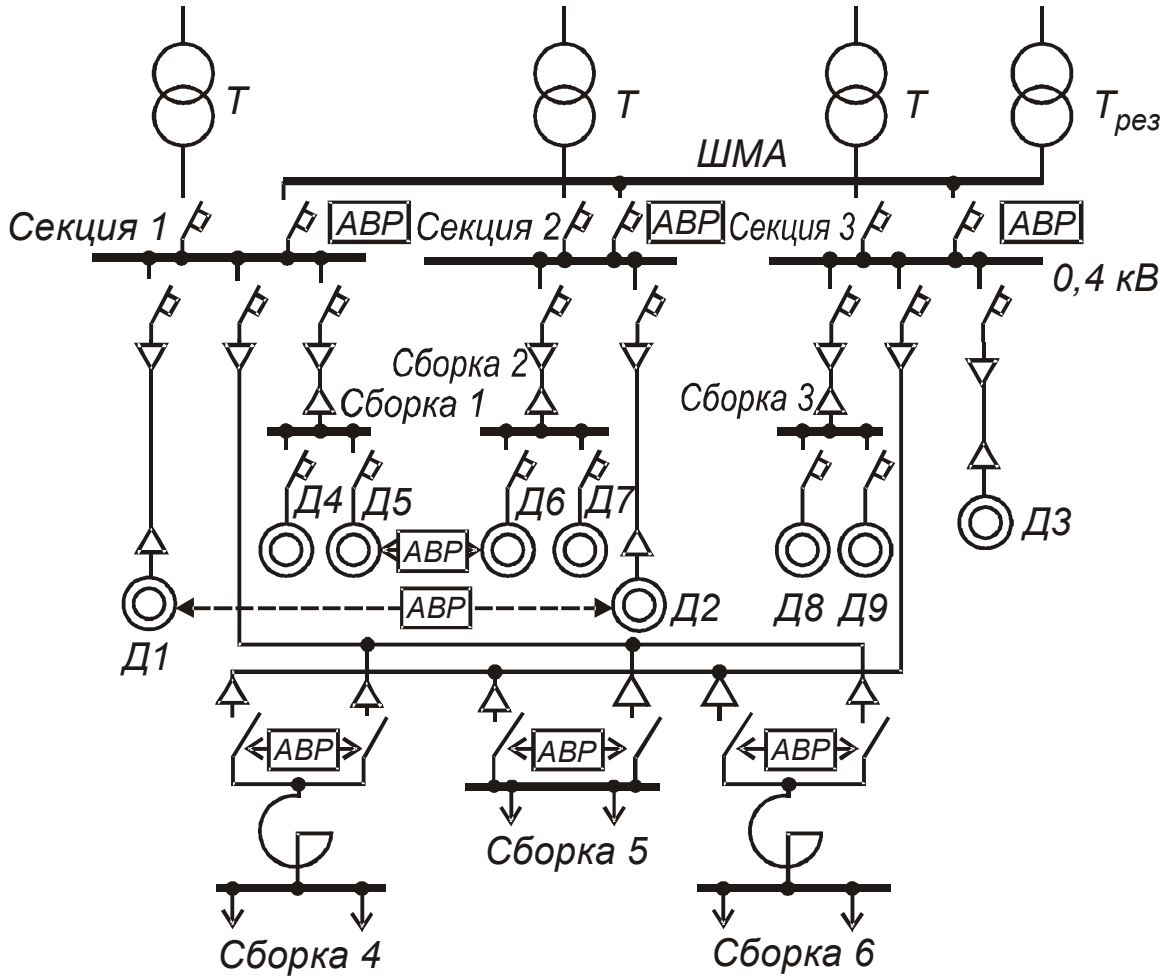


Рис. 1.12. Смешанная схема распределения электроэнергии: Т – рабочие трансформаторы; $Т_{рез}$ – резервный трансформатор

Построение схемы сети 0,4 кВ определяется значениями токов короткого замыкания (выбор аппаратуры и зищит) и возможностями применяемых защитных аппаратов. В этих сетях на токи КЗ влияют сопротивления всех элементов схемы, по мере удаления места повреждения от главных шин наблюдается их быстрое снижение. Из аппаратов защиты в сетях 0,4 кВ распространены плавкие предохранители и встроенные в автоматические выключатели максимальные токовые защиты, имеющие существенный разброс. Поэтому требования защиты сети накладывают определенные ограничения на типы и характеристики применяемых защитных аппаратов, длины и сечения кабелей и, следовательно, построение схемы сети. Например, при питании от главного щита кабельными магистралями последовательно нескольких сборок с двигателями большой и средней мощности обычно не удается обеспечить необходимую чувствительность защиты этих линий из-за отстройки от токов пуска и самозапуска электродвигателей. Такая схема применяется только для питания двигателей малой мощности (сборки *4–6* на рис. 1.12). Электродвигатели средней мощности подключают к сборкам, имеющим один или два самостоятельных ввода от щита 0,4 кВ (сборки *1–4* на рис. 1.6). Однако и для одиночных сильно нагруженных сборок (с большим количеством электродвигателей средней мощности) не всегда удается обеспечить достаточную чувствительность защит питающих линий. В этих случаях целесообразно вместо одной сборки установить несколько с самостоятельными линиями питания или часть двигателей подключить непосредственно к щиту 0,4 кВ.

Выбор сечения проводников также может определяться не только нагрузкой, но и условиями защиты. В сетях, требующих защиты от перегрузки или при необходимости обеспечения достаточной чувствительности защиты, считается целесообразным увеличить токи КЗ путем увеличения выбранного по нагрузке сечения (но не более, чем на 1–2 ступени).

Условие селективности действия защит обуславливает необходимость сокращения количества последовательно включенных аппаратов защиты в сети до 1000 В. Часто селективными удается выполнить одну-две ступени защиты от главного щита до электроприемников, включая защитный аппарат отходящей линии.

Таким образом, для силовых сетей напряжением до 1000 В характерно единство процесса построения схемы сети, выбора проводников, коммутационных аппаратов и защит. Примеры выполнения схем питающих и распределительных сетей до 1000 В приведены в приложении 1.

1.3. Схемы осветительных сетей

Электрическое освещение подразделяется на рабочее и аварийное. *Рабочее освещение* обеспечивает надлежащую освещенность всего помещения и рабочих поверхностей, *аварийное* – продолжение работы (освещение безопасности) или безопасную эвакуацию из помещения (эвакуационное освещение) при аварийном отключении рабочего освещения. Эвакуационное предусматривается в производственных помещениях с численностью персонала более двадцати человек.

Электрические сети освещения подразделяются на питающие, распределительные и групповые.

Питающая осветительная сеть – сеть от РУ подстанции до вводного устройства (ВУ), вводно-распределительного устройства (ВРУ) или главного распределительного щита (ГРЩ).

Распределительная сеть – сеть от ВУ, ВРУ, ГРЩ до распределительных пунктов, щитков и пунктов питания наружного освещения.

Групповая сеть – сеть от распределительных пунктов, групповых щитов до светильников, штепсельных розеток и других электроприемников.

1.3.1. Питающая и распределительная сети освещения

Питание установок внутреннего освещения рекомендуется выполнять от распределительных устройств подстанций, щитов, магистральных и распределительных шинопроводов самостоятельными линиями, выполненными проводами или кабелями.

Питающие и распределительные сети внутреннего освещения выполняются трехфазными четырех- или пятипроводными в зависимости от используемой системы заземления.

Рабочее освещение рекомендуется питать по линиям, не связанным с силовыми установками. Все виды освещения допускается питать от общих линий с электросиловыми установками или от силовых распределительных пунктов за исключением сетей в производственных зданиях без естественного освещения. В местах присоединения линий питающей осветительной сети к линии питания электросиловых установок или к силовым распределительным пунктам должны устанавливаться аппараты защиты и управления. Если питающая и распределительная осветительная сети выполняются шинопроводами, групповые щитки могут не предусматриваться. Вместо них применяются аппараты защиты и управления для питания групп

светильников. Применение для питания рабочего освещения, освещения безопасности и эвакуационного освещения общих групповых щитков не допускается. Общие щитки используются только для освещения безопасности и эвакуационного освещения.

При наличии в цехе нагрузок, ухудшающих показатели качества электроэнергии, питание таких нагрузок и освещения осуществляют от разных трансформаторов.

На рис. 1.13 приведена схема питающей и распределительной сетей внутреннего освещения. С первой секции шин 0,4 кВ двухтрансформаторной подстанции получает питание щит освещения, с шин которого по магистральной или радиальной схемам запитываются групповые щитки рабочего освещения. Щиток аварийного освещения получает питание от второй секции шин ТП. Аварийное освещение должно включаться автоматически при аварийном отключении рабочего.

На рис. 1.14 показана возможность подключения рабочего освещения к головному участку магистрального шинопровода. Питание аварийного освещения в этом случае рекомендуется выполнять от другой ТП или иного независимого источника питания.

Если установлен один трансформатор, то питание рабочего и аварийного освещения выполняется отдельными линиями, начиная от магистрального щитка (рис. 1.15).

Схема перекрестного питания освещения от двух ТП приведена на рис. 1.16. Рабочее и аварийное освещение получают питание самостоятельными линиями от разных трансформаторных подстанций. Аварийное освещение в производственных зданиях допускается подключать к распределительным пунктам, шинопроводам, за исключением производственных зданий без естественного освещения.

Принципиальные схемы питающих и распределительных сетей освещения выполняются в однолинейном исполнении. Пример выполнения питающей сети внутреннего освещения приведен в приложении 2.

1.3.2. Групповая сеть освещения

Участки осветительной сети от распределительных пунктов и групповых щитков до отдельных групп светильников, штепсельных розеток и стационарных электроприемников называют групповыми. Выполняются в одно-, двух- или трехфазном исполнении. Групповые щитки устанавливают в центрах электрических нагрузок и в удобных для обслуживания местах. Наибольшая длина трехфазных групповых линий напряжением 380/220 В – 100 м, однофазных – 30–40 м. Каждая

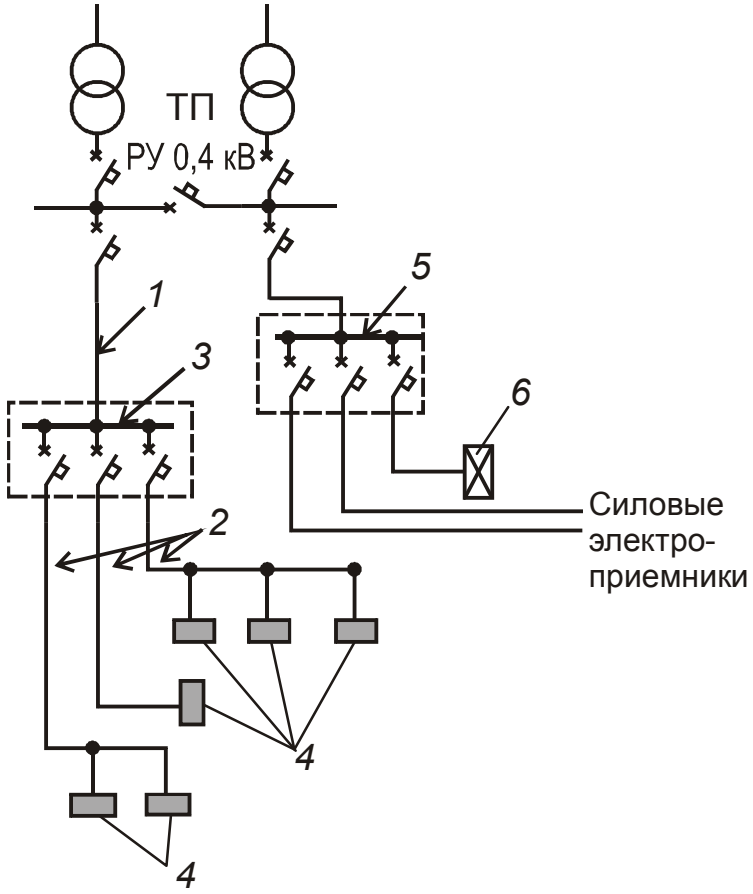


Рис. 1.13. Схема питающей и распределительной сети освещения: 1 – питающая сеть; 2 – распределительная сеть; 3 – щит рабочего освещения; 4 – групповые щитки рабочего освещения; 5 – распределительный пункт; 6 – щиток аварийного освещения

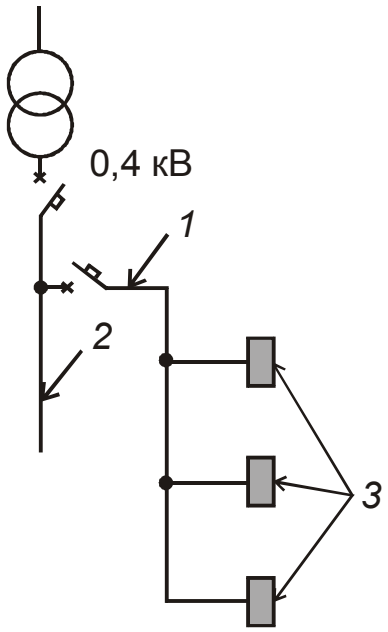


Рис. 1.14. Схема питания сети освещения от шинопровода: 1 – питающая сеть; 2 – шинопровод; 3 – групповые щитки рабочего освещения

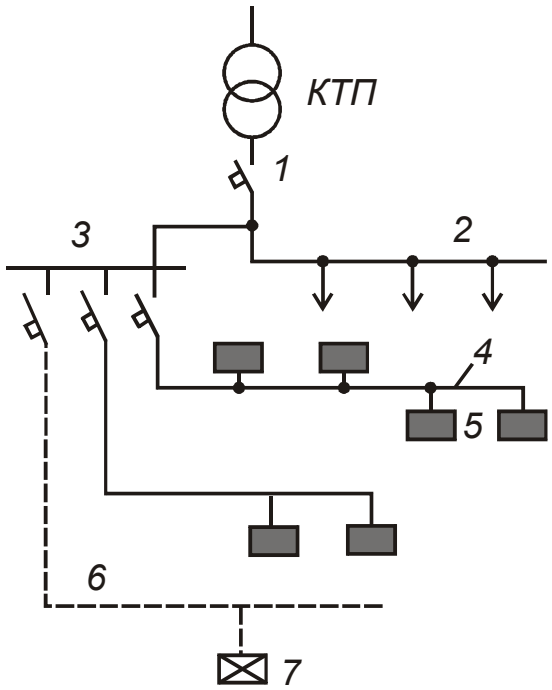


Рис. 1.15. Схема питания освещения от однотрансформаторной подстанции: 1 – вводной автоматический выключатель; 2 – главная магистраль цеха; 3 – магистральный щиток; 4 – магистральная питающая линия рабочего освещения; 5 – групповой щиток рабочего освещения; 6 – питающая линия аварийного освещения; 7 – групповой щиток аварийного освещения

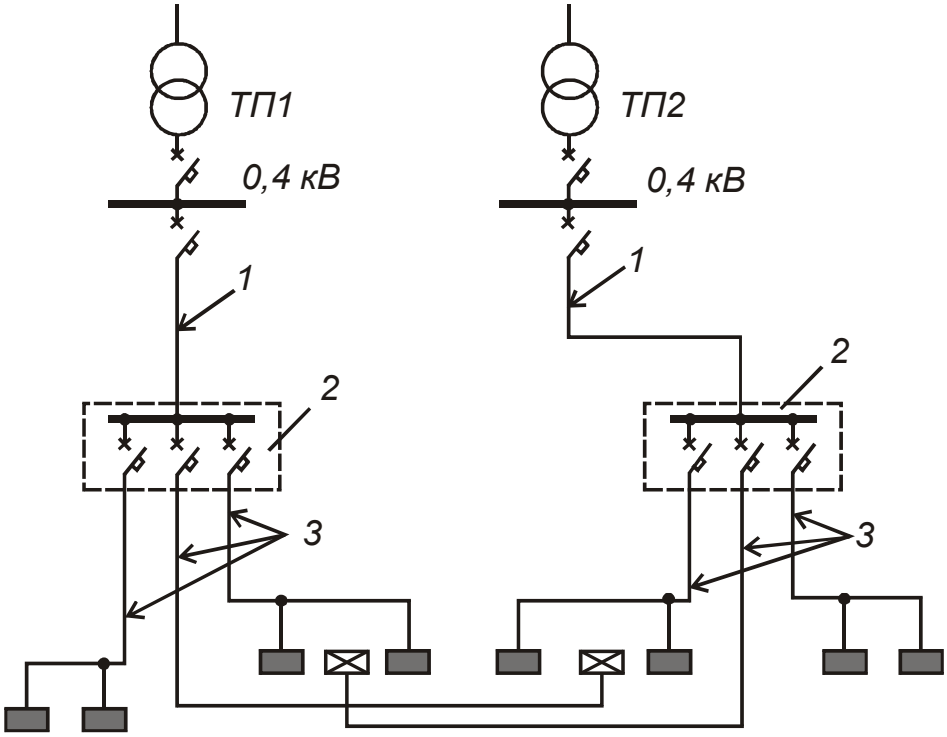


Рис. 1.16. Схема перекрестного питания освещения от двух трансформаторных подстанций: 1 – питающая сеть освещения; 2 – щит освещения (осветительный распределительный шинопровод); 3 – распределительная сеть освещения

линия, отходящая от распредустройства низкого напряжения подстанции, должна запитывать не более пяти групповых щитков освещения.

В зависимости от мощности осветительной нагрузки, размеров и конфигурации осветительной сети питающая линия может быть подведена непосредственно к групповому или магистральному щитку. Возможен вариант, когда от магистрального пункта отходят как групповые линии к светильникам, так и линии к групповым щиткам или осветительным шинопроводам (рис. 1.17).

На рис. 1.18 представлены некоторые из схем групповых линий. Групповые сети запитывают от групповых щитков (пунктов) или они могут выполняться осветительными шинопроводами типа ШОС. Шинопроводы применяются в помещениях любого назначения с нормальной средой.

Распределение нагрузки по фазам групповой сети должно быть равномерным. Число источников света на фазу не должно превышать значений, указанных в таблице 1.1. В начале каждой групповой линии устанавливаются аппараты защиты во всех фазных проводниках.

Таблица 1.1

Число источников света на фазу в зависимости от назначения групповой линии и источника света

Назначение групповой линии	**Источники света**	**Число источников света на фазу, не более**
Для питания источников света и штепсельных розеток	Лампы накаливания, лампы ДРЛ, ДРИ, ДРИЗ, ДнаТ	20
Для производственных, общественных, жилых зданий, освещения лестниц, этажных коридоров, холлов, технических подполий и чердаков	Лампы накаливания мощностью до 60 Вт	60
Для питания световых карнизов, световых потолков	Лампы накаливания	60
Для питания световых карнизов, световых потолков, светильников с люминесцентными лампами	Люминесцентные лампы мощностью до 80 Вт	60
	Люминесцентные лампы мощностью до 40 Вт	75
	Люминесцентные лампы мощностью до 20 Вт	100

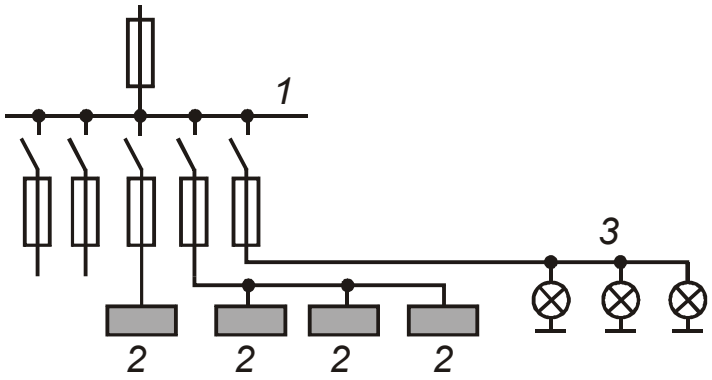


Рис. 1.17. Схема питания групповых щитков и групповых линий от магистрального щитка: 1 – магистральный щиток; 2 – групповой щиток; 3 – групповая линия

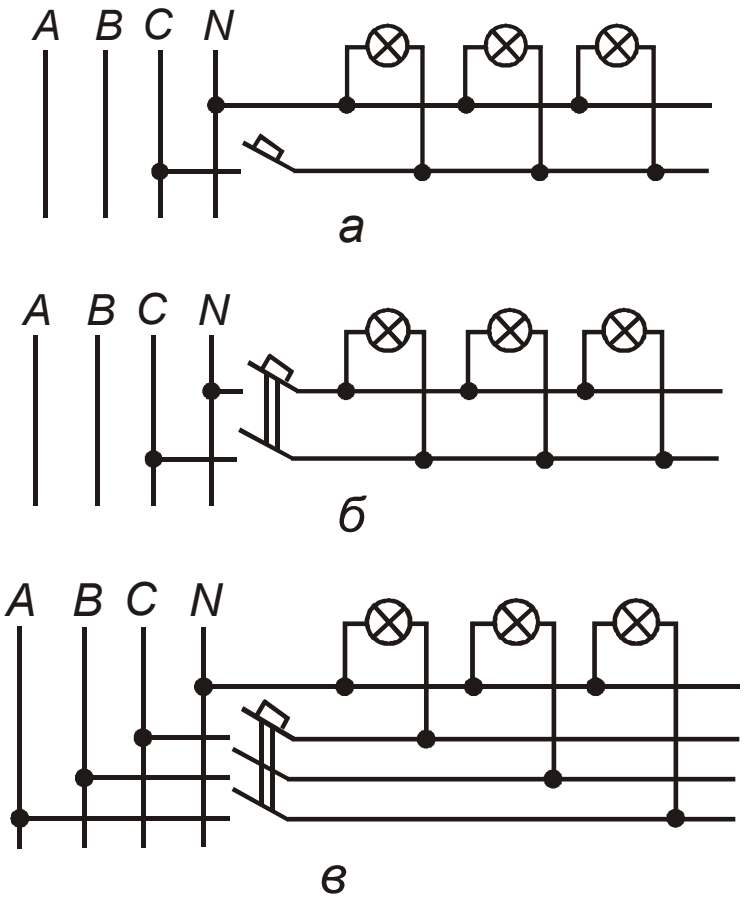


Рис. 1.18. Схемы групповых линий: а – двухпроводная; б – двухпроводная для взрывоопасных помещений класса В-I; в – четырехпроводная, защищаемая трехполюсным автоматическим выключателем

Установка аппаратов защиты в PEN–, PE– и N–проводниках запрещается. В групповых линиях, питающих лампы мощностью 10 кВт и более, каждая лампа оснащается самостоятельным аппаратом защиты. Применение для аварийного и рабочего освещения общих групповых щитков не допускается.

1.3.3. Расчет сетей осветительных установок

Осветительные сети чаще всего рассчитываются по допустимой потере напряжения с последующей проверкой на нагрев. Сечение проводников групповой осветительной сети, мм^2, определяется по соотношению:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_i}{\Delta U_{\text{доп}}\,\% \cdot C}, \qquad (1.1)$$

где $M = \text{Р} \cdot l$ – момент нагрузки по мощности для участка сети длиной l. Допустимая потеря напряжения $\Delta U_{\text{доп}}\,\%$ в осветительных сетях промышленных предприятий выбирается так, чтобы отклонение напряжения у осветительных приборов находилось в пределах +5…–2,5 %. Значения коэффициента C для номинального напряжения сети 380/220 В приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Значения коэффициента C

Система сети и род тока	Значения коэффициента C для проводов	
	с медными жилами	с алюминиевыми жилами
Три фазы с нулевым проводом	77	46
Две фазы с нулевым проводом	34	20
Одна фаза с нулевым проводом	12,8	7,7

Когда необходимо рассчитать сечение проводов разветвленной осветительной сети и при этом выполнить условия, обеспечивающие минимальный расход проводникового материала, пользуются выражением:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_i + \alpha_{\text{пр}} \sum_{i=1}^{i=n} m_i}{C \cdot \Delta U_{\text{доп}}\,\%}, \qquad (1.2)$$

где $\sum_{i=1}^{i=n} M_i$ – сумма моментов нагрузки данного и всех последующих по

направлению потока энергии участков осветительной сети (включая ответвления с тем же числом проводов в линии, что и рассчитываемый участок), кВт·м;

$\sum_{i=1}^{i=n} m_i$ – сумма моментов нагрузки всех ответвлений, питаемых через данный участок с другим числом проводов, отличных от числа проводов данного участка, кВт·м;

$\alpha_{пр}$ – коэффициент приведения моментов (табл. 1.3), зависящий от числа проводов на участке линий и в ответвлении.

Таблица 1.3

Коэффициенты приведения моментов

Участок линии	Ответвление	$\alpha_{пр}$
Трехфазная с нулевым проводом	Однофазное	1,85
Трехфазная с нулевым проводом	Двухфазное с нулевым проводом	1,39
Двухфазная с нулевым проводом	Однофазное	1,33
Трехфазная без нулевого провода	Двухфазное (двухпроводное)	1,15

Защита осветительных сетей осуществляется аналогично защите силовых сетей.

Пример 1.1.

Рассчитать осветительную сеть, схема которой приведена на рис. 1.19, получающую питание от распредустройства напряжением 380/220 В трансформаторной подстанции. Групповой щиток освещения ЩО установлен в производственном помещении с нормальной средой. Линии освещения питают светильники с люминесцентными лампами, коэффициент мощности которых 0,95.

Вся осветительная сеть выполнена проводом АПВ в трубах.

Питающая линия *1–2* длиной 120 м и распределительные линии *2–4*, *2–5* выполнены четырехпроводными, а линия *2–3* – двухпроводной. На ТП установлен трансформатор мощностью 630 кВА, коэффициент его загрузки $\beta_{тр} = 0,8$.

Решение.

По таблице 1.2 для четырехпроводной сети 380/220 В коэффицент $C_1 = 46$, а для двухпроводной $C_2 = 7,7$.

Допустимые потери напряжения в осветительной сети до наиболее удаленного светильника $\Delta U_{доп} = 5,5$ % [3].

Определим моменты всех участков. Для линии *2–3*, *2–4* и *2–5* заменим равномерно распределенную по длине нагрузку сосредоточенной в середине линии. Приведенная длина линий составит:

$$l_{прив\,2-3} = l_0 + l/2 = 5 + 20/2 = 15 \text{ м};$$

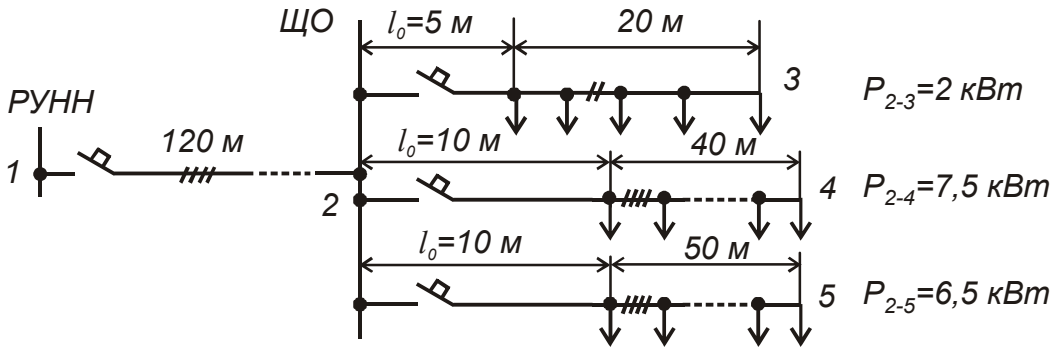


Рис. 1.19. Схема осветительной сети к примеру 1.1

$$l_{\text{прив } 2-4} = l_0 + l/2 = 10 + 40/2 = 30 \text{ м};$$

$$l_{\text{прив } 2-5} = l_0 + l/2 = 10 + 50/2 = 35 \text{ м}.$$

Момент нагрузки на каждом участке:

$$M_{2-3} = P_{2-3} \cdot l_{\text{прив } 2-3} = 2 \cdot 15 = 30 \text{ кВт·м};$$

$$M_{2-4} = P_{2-4} \cdot l_{\text{прив } 2-4} = 7{,}5 \cdot 30 = 225 \text{ кВт·м};$$

$$M_{2-5} = P_{2-5} \cdot l_{\text{прив } 2-5} = 6{,}5 \cdot 35 = 227{,}5 \text{ кВт·м}.$$

Момент нагрузки питающей линии *1–2* составит:

$$M_{1-2} = (P_{2-3} + P_{2-4} + P_{2-5}) \cdot l_{1-2} = (2 + 7{,}5 + 6{,}5) \cdot 120 = 1920 \text{ кВт·м}.$$

По (1.2) определим сечение линии *1–2* с учетом, что для линии *2–3* коэффициент приведения момента $\alpha_{\text{пр}} = 1{,}85$ (табл. 1.3):

$$S_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} M_i + \alpha_{\text{пр}} \sum_{i=1}^{i=n} m_i}{C \cdot \Delta U_{доп}\,\%} = \frac{(1920 + 225 + 227{,}5) + 1{,}85 \cdot 30}{46 \cdot 5{,}5} = 9{,}6 \text{ мм}^2.$$

Принимаем стандартное сечение провода АПВ-4(1×10) мм^2, из соотношения (1.1) находим действительную потерю напряжения в линии *1–2*:

$$\Delta U_{1-2} = M_{1-2} / (C_1 \cdot S_{1-2}) = 1920 / (46 \cdot 10) = 4{,}1\,\%.$$

Для участков линии *2–3*, *2–4* и *2–5* располагаемая потеря напряжения составит:

$$\Delta U_{2-3} = \Delta U_{2-4} = \Delta U_{2-5} = \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{1-2} = 5{,}5 - 4{,}1 = 1{,}4\,\%,$$

тогда сечение участков по (1.1):

$$S_{2-3} = \frac{M_{2-3}}{C_2 \cdot \Delta U_{2-3}} = \frac{30}{7{,}7 \cdot 1{,}4} = 3 \text{ мм}^2,$$

принимаем стандартное сечение АПВ-2(1×4) мм^2;

$$S_{2-4} = \frac{M_{2-4}}{C_1 \cdot \Delta U_{2-4}} = \frac{225}{46 \cdot 1{,}4} = 3{,}3 \text{ мм}^2,$$

принимаем стандартное сечение АПВ-4(1×4) мм^2;

$$S_{2-5} = \frac{M_{2-5}}{C_1 \cdot \Delta U_{2-5}} = \frac{227{,}5}{46 \cdot 1{,}4} = 3{,}3 \text{ мм}^2,$$

принимаем стандартное сечение АПВ-4(1×4) мм^2.

Проверим выбранные сечения по длительно допустимому току нагрузки:

$$I_{2-3} = \frac{P_{2-3}}{U_{\text{ф}} \cdot \cos\varphi} = \frac{2}{0{,}22 \cdot 0{,}95} = 9\ \text{А};$$

$$I_{2-4} = \frac{P_{2-4}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{7{,}5}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}95} = 11{,}8\ \text{А};$$

$$I_{2-5} = \frac{P_{2-5}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{6{,}5}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}95} = 10{,}2\ \text{А};$$

ток питающей линии *1–2*:

$$I_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} P_i}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{2 + 7{,}5 + 6{,}5}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}95} = 25{,}4\ \text{А}.$$

По [4] для провода АПВ-2(1×4) мм^2 $I_{\text{доп}} = 28$ А > 9 А; для провода АПВ-4(1×4) мм^2 $I_{\text{доп}} = 23$ А > 11,8 А; на линии *1–2* принято сечение АПВ-4(1×10) мм^2, для которого $I_{\text{доп}} = 39$ А > 25,4 А. Следовательно, сечения проводов рассчитываемой осветительной сети выбраны правильно.

1.4. Схемы питания передвижных электроприемников

Для питания электродвигателей подъемно-транспортных устройств (кранов, кран-балок, тельферов, передаточных тележек и др.) применяются троллейные линии (троллеи), выполненные троллейными шинопроводами или из профилированной стали.

Троллейные шинопроводы серии ШТМ выпускаются на номинальные токи 200 и 400 А. Предназначены они для питания трехфазных и однофазных электроприемников. Каждая секция шинопровода представляет собой стальной короб, имеющий внизу сплошную щель. Внутри короба в пазах изолятора троллея монтируются четыре медных троллея – три фазных и один нулевой. Токосъем осуществляется с помощью скользящих или катящихся контактов.

Сечение троллейных линий выбирают по нагреву длительным током нагрузки и проверяют на допустимую потерю напряжения в момент максимума нагрузки. Допустимая потеря напряжения от источника питания до двигателя передвижного устройства не должна превышать 12 % (4–5 % в питающей линии, 4–5 % в троллеях и 1–2 % в распределительных сетях).

Питание троллейных сетей может производиться от распределительных устройств 0,4 кВ трансформаторных подстанций, от магистральных распределительных шинопрвоодов или от низковольтных комплектных устройств. В точке подключения

питающей линии к троллеям устанавливается коммутационный аппарат.

Секционирование троллеев осуществляется через изоляционный зазор не менее 50 мм, который, перекрываясь токосъемником, не вызывает перерыва в электроснабжении подъемно-транспортного механизма.

На рис. 1.20 изображены схемы питания троллейных линий. При несекционированной троллейной линии подвод питания целесообразно осуществлять к средней части троллея. Это позволяет уменьшить потери напряжения (рис. 1.20, а).

При питании от троллейной линии в пролете одного подъемно-транспортного устройства ремонтные секции не сооружаются: ремонт проводится при отключенных троллеях. При питании двух кранов по концам троллейной линии обязательно предусматриваются ремонтные секции, присоединенные к основной линии с помощью рубильников (рис. 1.20, б). Для трех и более кранов в пролете необходимо предусматривать несколько ремонтных секций. Их располагают вдоль троллейной линии и по ее концам (рис. 1.20, в, г). Принципиальные схемы троллейных линий, имеющих подпитку и секционирование, допускается выполнять в произвольной форме.

Если из-за неблагоприятных условий среды (взрыво- и пожароопасные помещения) или опасности поражения током при недостаточной высоте выполнить троллейные линии не представляется возможным, то питание передвижных электроприемников осуществляется гибкими (шланговыми) кабелями или проводами, подвешиваемыми к стальному тросу на кольцах или роликах либо наматываемыми на барабан.

Расчет электрических нагрузок для выбора троллейных линий выполняется методом упорядоченных диаграмм [2]. При определении потери напряжения в троллейной линии расчетные и пиковые токи определяют отдельно для питающей троллеи линии и для каждого плеча троллеев с учетом схемы подвода питания (рис. 1.20). Расчет на потерю напряжения производится при наиболее неблагоприятном расположении подвижных механизмов в пролетах цеха.

Потеря напряжения, В, в троллеях:

$$\Delta U_m = {\Delta u \cdot l \cdot I_{\text{пик}}}/{10000}, \qquad (1.3)$$

где Δu – потеря напряжения на 100 А пикового тока и на 100 м длины троллея, В/(А·м), таблица 1.4;

l – длина троллеев в один конец от точки подключения питающей линии, м;

I_m – пиковый ток троллеев.

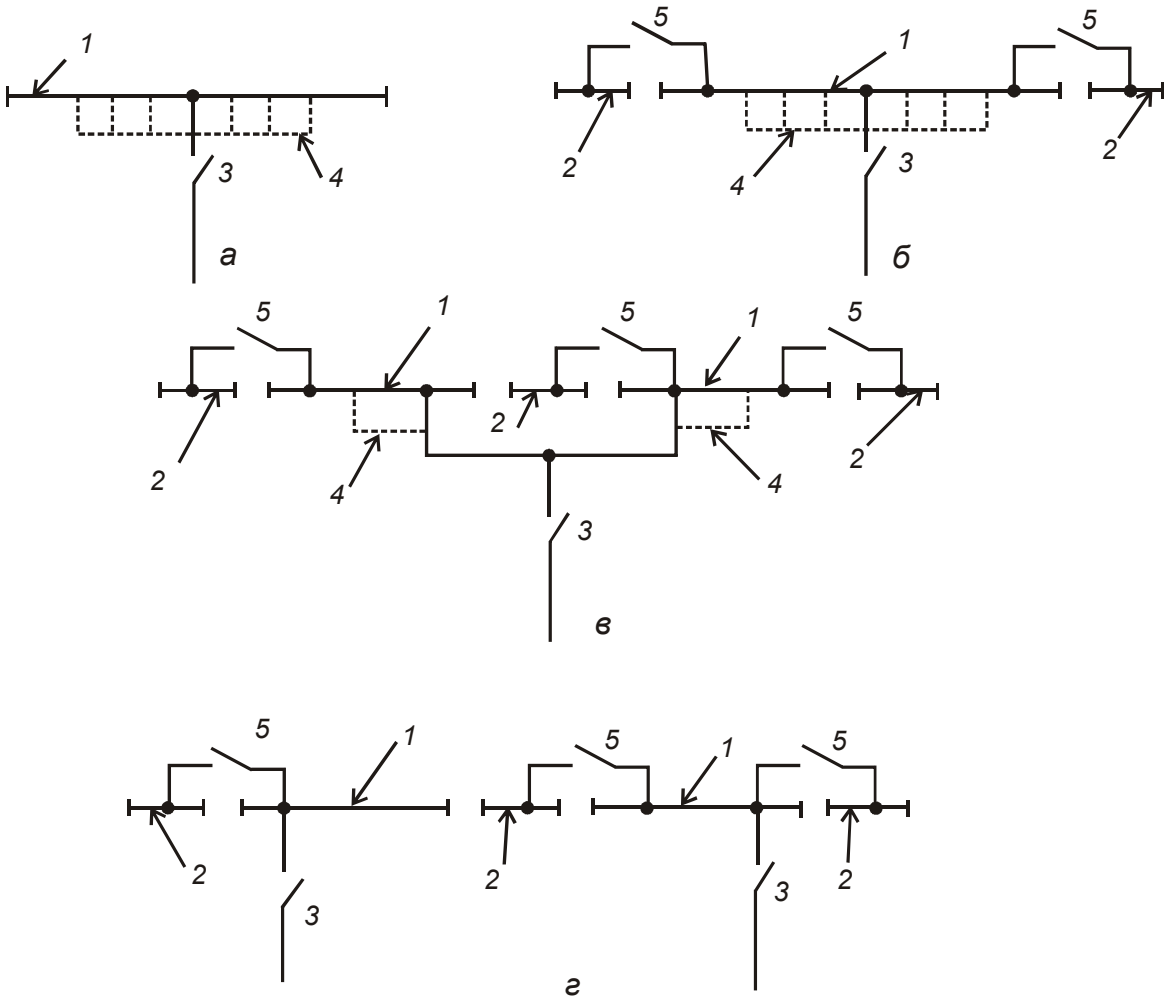


Рис. 1.20. Схемы троллейных линий: а – несекционированная; б – с двумя ремонтными секциями; в, г – с тремя ремонтными секциями; 1 – троллейная линия; 2 – ремонтные секции; 3 – вводной коммутационный аппарат; 4 – подпитка алюминиевой шиной; 5 – секционный рубильник

При большой протяженности троллейных линий и/или значительной нагрузке потеря напряжения может оказаться выше допустимой. В этом случае следует предусмотреть меры, необходимые для снижения потери напряжения: увеличить сечение троллеев, изменить схему питания троллейной линии, перенося точку подключения питающей сети ближе к середине длины троллеев, или секционировать троллеи с раздельным питанием секций; применить подпитку троллеев с помощью алюминиевых шин, прокладываемых параллельно каждому троллею с присоединением к троллеям через каждые 1,5 м. В некоторых случаях применяется подпиточный кабель, прокладываемый вдоль троллеев в виде шлейфа.

Таблица 1.4

Удельная потеря напряжения в троллеях различных профилей при напряжении 380 В

Параметры троллеев	Полоса 50×5	Уголок			Швеллер		
		40×40×5	50×50×5	63×63×6	№ 8	№ 10	№ 12
Допустимый ток, А	120	120	190	250	455	545	675
Удельная потеря напряжения, В/(А·м)	10,5	8,7	7,0	6,0	4,5	4,2	3,5

При расчете потери напряжения в троллейной линии с подпиткой потерей напряжения в самих стальных троллеях пренебрегают, определяя только потерю напряжения в подпиточных алюминиевых шинах:

$$\Delta U_{\text{подпит}}\% = \frac{I_{\text{пик}} \cdot \rho \cdot l \cdot 100 \cdot \sqrt{3}}{S \cdot U}, \qquad (1.4)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала шины (для алюминия ρ = 0,33 мкОм·м);

l – длина плеча троллеев в один конец от точки подключения питания, м;

S – сечение подпиточной шины, мм^2;

U – линейное напряжение сети, В.

Выражение (1.4) применяется для расстояния между фазами троллейной линии 250 мм. Если это расстояние равно 450 мм, то потерю напряжения, полученную по (1.4), следует увеличить на 10 %, так как с увеличением расстояния между фазами возрастает индуктивность линии.

Пример 1.2.

Рассчитать троллеи для мостового крана, имеющего пять асинхронных двигателей с фазным ротором. Напряжение сети 380 В. Параметры двигателей приведены в таблице 1.5.

Режим работы двигателей крана средний, коэффициент использования $k_{\text{и}} = 0{,}2$. Принята сталь угловая 50×50×5 мм. Длина троллеев 400 м. Подвод питания в середине, фактическая длина троллеев от точки подключения $l = 200$ м. Расстояние между фазами троллеев 250 мм. Коэффициент мощности всех электроприемников крана cosφ = 0,7.

Решение.

Определим расчетную максимальную нагрузку крана методом упорядоченных диаграмм.

При числе электроприемников в группе $n_{\text{факт}} > 3$, $K_{\text{и}} = 0{,}2$ и

Таблица 1.5

Параметры двигателей крана (к примеру 1.2)

Механизм крана	Мощность двигателя, кВт	Номинальный ток, А
Главный подъем	22	56,5
Вспомогательный подъем	11	30,8
Механизм передвижения моста	2×16	2×45
Механизм передвижения тележки	3,5	10,3
ИТОГО:	68,5	

$$m = \frac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} = \frac{22}{3,5} = 6,3 > 3$$

эффективное число электроприемников составит:

$$n_{\text{эф}} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{i=5} p_{\text{ном } i}}{p_{\text{ном max}}} = \frac{2 \cdot 68,5}{22} = 6,2,$$

так как расчетное значение $n_{\text{эф}}$ больше $n_{\text{факт}}$ принимаем $n_{\text{эф}} = n_{\text{факт}} = 5$.

При $K_{\text{и}} = 0,2$ и $n_{\text{эф}} = 5$ коэффициент максимума равен $K_{\text{м}} = 2,42$ [4].

Средняя нагрузка крана:

$$P_{\text{см}} = K_{\text{и}} \cdot \sum_{i=1}^{i=5} p_{\text{ном } i} = 0,2 \cdot 68,5 = 13,7 \text{ кВт}.$$

Максимальная расчетная нагрузка:

$$P_{\text{м}} = K_{\text{м}} \cdot P_{\text{см}} = 2,42 \cdot 13,7 = 33,15 \text{ кВт}.$$

Максимальный расчетный ток:

$$I_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi} = \frac{33,15}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,7} = 72 \text{ А}.$$

Пиковый ток:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{пуск max}} + \left(I_{\text{м}} - k_{\text{и}} \cdot I_{\text{ном max}}\right) = 3 \cdot 56,5 + \left(72 - 0,2 \cdot 56,5\right) = 230,2 \text{ А}.$$

По таблице 1.4 для угловой стали 50×50×5 удельная потеря напряжения составляет Δu = 7 В/(А·м). По (1.3) действительная потеря напряжения в троллейной линии:

$$\Delta U_m = \frac{\Delta u \cdot l \cdot I_{\text{пик}}}{10000} = \frac{7 \cdot 200 \cdot 230,2}{10000} = 32,2 \text{ В}$$

или в процентах:

$$\Delta U_m\% = \frac{\Delta U_m}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{32,2}{380} \cdot 100 = 8,47 \text{ %},$$

что больше допустимой потери напряжения в троллеях, равной 4–5 %. Следовательно, необходимо принять подпитку.

Выбираем для подпитки алюминиевую шину размером 40×4 мм. Тогда по (1.4) потери напряжения в подпитке:

$$\Delta U_{\text{подпит}} = \frac{I_{\text{пик}} \cdot \rho \cdot l \cdot 100 \cdot \sqrt{3}}{S \cdot U} = \frac{230{,}2 \cdot 0{,}033 \cdot 200 \cdot 100 \cdot \sqrt{3}}{160 \cdot 380} = 4{,}33\ \%,$$

что удовлетворяет допустимым потерям, равным 5%.

1.5. Система уравнивания потенциалов на вводе в здания

Улучшение электромагнитной обстановки на объектах с одновременным выполнением требований по электробезопасности достигается правильным выполнением системы уравнивания потенциалов на вводе в здания.

Если здание имеет несколько обособленных вводов, то главная заземляющая шина (ГЗШ) должна быть выполнена для каждого вводного устройства (ВУ) или вводно-распределительного устройства (ВРУ), а при наличии одной или нескольких встроенных трансформаторных подстанций – для каждой подстанции. В качестве ГЗШ может быть использована РЕ-шина ВУ, ВРУ или РУНН, при этом все главные заземляющие шины и РЕ-шины низковольтных комплектных устройств (НКУ) должны соединяться между собой проводниками системы уравнивания потенциалов (магистралью) сечением (с эквивалентной проводимостью), равным сечению меньшей из попарно сопряженных шин.

Сечение РЕ-шины в вводных устройствах (ВУ, ВРУ) электроустановок зданий и соответственно ГЗШ принимаются по ГОСТ Р 51321.1–2000 (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Сечение РЕ-шин

Сечение фазного проводника S ($мм^2$)	Наименьшее сечение РЕ-шины ($мм^2$)
до 16 включительно	S
от 16 до 35 включительно	16
от 35 до 400 включительно	S/2
от 400 до 800 включительно	200
свыше 800	S/4

Если ГЗШ установлены отдельно и к ним не подключаются нулевые защитные проводники установки, в том числе PEN-, РЕ-проводники питающей линии, то сечение (эквивалентная проводимость) каждой из отдельно установленных ГЗШ принимается равным половине

сечений РЕ-шины наибольшей из всех РЕ-шин, но не менее меньшего из сечений РЕ-шин вводных устройств.

Площади поперечного сечения (табл. 1.6) приведены для случая, когда защитные проводники изготовлены из того же материала, что и фазные. Защитные проводники, изготовленные из других материалов, должны иметь эквивалентную проводимость.

РЕ-шина НКУ должна проверяться по нагреву по максимальному значению рабочего тока в PEN-проводнике (например, в неполнофазных режимах, возникающих при перегорании предохранителей, при наличии третьей гармоники). Для ГЗШ, не являющейся РЕ-шиной НКУ, такая проверка не требуется.

Сечение главных проводников основной системы уравнивания потенциалов должно быть не менее 6 мм^2 по меди, 16 мм^2 по алюминию и 50 мм^2 по стали. Это условие распространяется и на заземляющие проводники, соединяющие ГЗШ с заземлителями защитного заземления и/или рабочего (функционального) заземления (при их наличии), а также с естественными заземлителями.

Сечения проводников основной системы уравнивания потенциалов, используемых для присоединения к ГЗШ металлических труб коммуникаций, имеющих дополнительную металлическую связь с нейтралью трансформатора и через которые возможно протекание токов короткого замыкания (например, трубопроводы отдельно стоящих насосных, которые питаются от тех же трансформаторов, что и вводы в здание), должны выбираться по термической стойкости.

Присоединение к заземлителю молниезащиты заземляющих проводников основной системы уравнивания потенциалов и заземляющих проводников от естественных заземлителей (при использовании естественных заземлителей в качестве заземлителей системы молниезащиты) должно производиться в разных местах.

Если имеется специальный контур заземления молниезащиты, к которому подключены молниеотводы, то такой контур также должен подключаться к ГЗШ.

При наличии в здании нескольких электрических вводов трубопроводные системы и заземлители рекомендуется подключать к ГЗШ основного ввода.

Соединения сторонних проводящих частей с ГЗШ могут выполняться: по радиальной схеме, по магистральной схеме с помощью ответвлений, по смешанной схеме. Трубопроводы одной системы, например, прямая и обратная труба центрального отопления, не требуют выполнения отдельных присоединений. Достаточно иметь одно ответвление от магистрали или одну радиальную линию, а прямую

и обратную трубу достаточно соединить перемычкой сечением, равным сечению проводника системы уравнивания потенциалов.

Для проведения измерений сопротивления растекания заземляющего устройства на ГЗШ должно быть предусмотрено разборное соединение заземляющего проводника, подключаемого к заземляющему устройству.

В качестве проводников основной системы уравнивания потенциалов в первую очередь следует использовать открыто проложенные неизолированные проводники.

Ввод защитных проводников в НКУ класса защиты 2 следует выполнять изолированными проводниками, так как PE-шина в них выполняется изолированной.

Отдельно устанавливаемые ГЗШ рекомендуется выполнять из стали. В низковольтных комплектных устройствах PE-шина, как правило, выполняется медной (допускается выполнять из стали, использование алюминия не допускается). Стальные шины должны иметь металлическое покрытие, обеспечивающее выполнение требований для разборных контактных соединений класса 2. При использовании разных материалов для ГЗШ и для проводников системы уравнивания потенциалов необходимо принять меры по обеспечению надежного электрического соединения.

В местах, доступных только квалифицированному электротехническому персоналу, ГЗШ может устанавливаться открыто. В местах, доступных неквалифицированному персоналу, ГЗШ должна иметь защитную оболочку. Степень защиты оболочки выбирается по условиям окружающей среды, но не ниже IP21.

Главная заземляющая шина на обоих концах должна быть обозначена продольными или поперечными полосами желто-зеленого цвета одинаковой ширины. Изолированные проводники уравнивания потенциалов должны иметь изоляцию, обозначенную желто-зелеными полосами. Неизолированные проводники основной системы уравнивания потенциалов в местах их присоединения к сторонним проводящим частям должны быть обозначены желто-зелеными полосами, например, выполненными краской или клейкой двухцветной лентой.

Указания по выполнению основной системы уравнивания потенциалов на вводе в здания должны быть предусмотрены в проектной документации на электроустановку здания.

1.6. Сети защитного заземления

Защитным заземлением называется преднамеренное соединение с землей или ее эквивалентом открытых проводящих нетоковедущих частей электроустановки с целью электробезопасности. Его назначение – предотвратить возможность поражения электрическим током при соприкосновении с корпусами оборудования и другими нетоковедущими металлическими частями электроустановки, оказавшимися под напряжением вследствие неисправностей.

В сетях с глухозаземленной нейтралью задача защитного заземления – обеспечить через нулевой провод (зануление) быстрое автоматическое отключение поврежденного участка. Под занулением понимается преднамеренное соединение открытых проводящих частей электроустановок, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью трансформатора (через нулевой провод).

Защитными проводниками являются нулевые (четвертые) жилы кабеля, нулевые провода электропроводок или оголенные провода, а также трубы электропроводок, оболочки шинопроводов, короба и лотки, алюминиевые оболочки кабелей (но не свинцовые), металлоконструкции зданий и сооружений.

Цеховой сетью заземления является совокупность проводников, соединяющих подлежащие заземлению элементы электроустановок с заземляющими устройствами или заземленной нейтралью трансформатора.

Цеховую сеть заземления обычно выполняют стальными полосами, образующими замкнутые контуры, присоединенные не менее чем в двух точках к заземлителям. При этом выделяется магистраль заземления или зануления, которая представляет собой заземляющий или нулевой защитный проводник с двумя или более ответвлениями. Если сечение стальных заземляющих проводников в производственных помещениях определяется не термической стойкостью или проводимостью по сравнению с фазными, а только требованиями механической прочности, то выбор стальных проводников производится в соответствии с требованиями таблицы 1.7.

При глухозаземленной нейтрали сети напряжением до 1000 В проводники защитного зануления должны иметь проводимость, достаточную для отключения защитного аппарата при однофазном КЗ. Каждый электроприемник подключается к магистрали заземления или зануления самостоятельным ответвлением, последовательное их соединение не допускается.

Таблица 1.7

Заземляющие и нулевые защитные проводники, рекомендуемые для производственных помещений

Вид заземляющего и нулевого защитного проводников	Характеристика среды	Рекомендуемые стальные проводники	Допустимые к применению стальные проводники
Магистрали заземления и зануления	Нормальная или влажная	Стальная полоса 40×3, 30×4 мм	Стальная полоса 40×4 мм, сталь круглая ∅ 14 мм
Ответвления от магистралей заземления и зануления	Нормальная или влажная	Стальная полоса 20×3, 25×3 мм	Сталь круглая ∅ 6–10 мм
	Сырая или химически активная*	Сталь круглая ∅ 6–10 мм	Стальная полоса 20×4, 25×4 мм

* Рекомендуется применять соответствующие среде защитные покрытия.

Расчет сетей заземления и требования к их монтажу изложены в [5, 6].

В сухих помещениях полосы заземления могут прокладываться непосредственно по кирпичным и бетонным основаниям.

В сырых и особо сырых помещениях и в помещениях с химически активными веществами прокладку заземляющих проводников следует производить на опорах крепления.

Открыто проложенные магистрали заземления должны быть окрашены в черный цвет. Допускается окраска и в другие цвета в соответствии с оформлением помещения, но при этом они должны иметь в местах присоединений и ответвлений две полосы черного цвета на расстоянии 150 мм друг от друга. Площадка между черными полосами в местах ответвлений красится в цвет всей магистрали, а в местах наложения переносных заземлений – зачищается и защищается от коррозии.

Неразборные соединения заземляющих и нулевых защитных проводников, а также их разборные присоединения к частям оборудования, подлежащих заземлению или занулению, должны быть доступны для осмотра. Болт (винт) для присоединения размещается в безопасном и удобном для подключения и осмотра месте. У места подключения помещается нанесенный любым способом нестираемый знак заземления.

Вокруг болта (винта) должна быть контактная площадка, защищенная от коррозии и не имеющая поверхностной окраски.

1.7. Тестовые и расчетные задания по построению цеховых сетей

1.7.1. Тестовые задания

Инструкция: в заданиях 1–27 дополните или вставьте пропущенное.

1. …… заземлителями называются заземлители, специально выполненные в целях заземления.

2. Для искусственных заземлителей применяют …….. и …….. неокрашенные электроды.

3. …… заземлители используют для гальванического соединения между собой вертикальных заземлителей, а также самостоятельно.

4. Искусственный заземлитель для заземления нейтрали трансформатора, как правило, расположен ……. Для внутрицеховых подстанций его допускается располагать …….

5. Защитные проводники выполняют из следующих материалов: ……, …….., …… .

6. Электрическая сеть системы …… имеет PEN-проводник, который выполняет одновременно функции нулевого ……. и нулевого …….. проводников на всем протяжении сети.

7. PEN-проводник в сети системы …….. используется только в сетях общего пользования, а затем в зданиях и сооружениях потребителей разделяется на нулевой рабочий и нулевой защитный проводники.

8. Если в сети системы TN отдельный нулевой защитный проводник не связан с нулевым …… проводником, то такая система называется …… .

9. В сетях общего пользования часто применяется система TN–C–S, которая является комбинацией …… и …… систем.

10. Металлические корпуса и опорные конструкции шинопроводов допускается использовать в качестве нулевых защитных проводников, если их расположение исключает возможность …… .

11. После разделения PEN-проводника в какой-либо точке электроустановки на нулевой защитный и нулевой рабочий проводники

…….. объединять их за этой точкой по ходу распределения электроэнергии.

12. Не допускается использование PEN-проводников для питания электроприемников однофазного тока. В этом случае в качестве нулевого рабочего проводника (N-проводника) должен быть использован ……. .

13. В сети TN–C особую опасность поражения током представляет ……. : все присоединенные за точкой …….. металлические зануленные корпуса электроприемников оказываются под фазным напряжением.

14. Достоинством применения в цеховых сетях напряжения 380/220 В является возможность совместного питания ……

15. Радиальные схемы распределения электроэнергии рекомендуется применять:

1) ……;
2) ……;
3) …… .

16. Смешанные схемы распределения электроэнергии представляют собой комбинации из ……. .

17. Схемы резервирования питания потребителей цеховых сетей предусматривают подвод питания от …… или от ……. .

18. Кабели в алюминиевой оболочке в зонах классов …….. применять запрещается, а в зонах классов …….. – допускается.

19. Электрические сети в …….. должны выполняться проводами и кабелями с любым видом изоляции и оболочек из материалов, не распространяющих горение.

20. Сеть от групповых щитков (распределительных пунктов) до светильников и штепсельных розеток называется …….. .

21. Осветительные сети чаще всего рассчитываются по …… с последующей проверкой на …….. .

22. По числу фаз групповые сети освещения выполняются в ……. исполнении.

23. Сечения троллейных линий выбирают …….. и проверяют …… в момент пика нагрузки.

24. ……. – снижение разности потенциалов между доступными одновременному прикосновению открытыми проводящими частями, сторонними проводящими частями, заземляющими и защитными

проводниками (PE-проводниками), а также PEN-проводниками путем электрического соединения этих частей между собой.

25. Главная заземляющая шина может быть выполнена …… вводного устройства электроустановки напряжением до 1000 В или …….. .

26. Преднамеренное соединение открытых проводящих частей электроустановки напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью трансформатора в сетях трехфазного тока называется …… .

27. Магистраль заземления или зануления – это заземляющий или нулевой защитный проводник с …….. .

Инструкция: в заданиях 28–76 с выбором одного правильного ответа из предложенных обведите кружком номер правильного ответа.

28. В цепи PEN-проводника допускается установка выключателя, если он:

1) коммутирует PEN-проводник в двух точках;
2) коммутирует PEN-проводник в изоляции;
3) производит коммутацию только PEN-проводника;
4) одновременно с отключением PEN-проводника отключает все находящиеся под напряжением проводники.

29. Изоляция PEN-проводника должна быть равноценна изоляции фаз при:

1) питании однофазных электроприемников;
2) установке в его цепи выключателей;
3) прокладке проводов в металлических трубах, лотках, коробах;
4) использовании в качестве PEN-проводника оболочки и опорных конструкций шинопровода;
5) его проводимости менее 50 % проводимости фазных проводников.

30. PE-проводник должен иметь изоляцию, равноценную изоляции фазных проводников:

1) если возможно повреждение изоляции фазных проводников при искрении между неизолированными PE-проводником и открытыми (сторонними) проводящими частями;
2) при отсутствии уравнивающей связи распределительного щита с основной системой уравнивания потенциалов;
3) при установке в его цепи выключателя.

31. Наиболее высокая степень бесперебойности электроснабжения потребителей характерна для:

1) IT;
2) TT;
3) TN–C;
4) TN–S

сети, так как однофазные короткие замыкания:

1) требуют;
2) не требуют

немедленного отключения.

32. В качестве PE-проводника не допускается использовать:

1) оболочки и опорные конструкции шинопроводов и комплектных устройств заводского изготовления, обеспечивающие возможность подключения к ним защитных проводников;
2) несущие тросы при тросовой электропроводке, свинцовые оболочки проводов и кабелей;
3) сторонние проводящие части, непрерывность электрической цепи которых обеспечивается конструкцией;
4) открытые проводящие части, демонтаж которых невозможен, если не предусмотрены меры по сохранению непрерывности цепи и ее проводимости.

33. Совмещение функций нулевого защитного и нулевого рабочего проводников не допускается в:

1) цепях однофазного тока;
2) многофазных цепях в системе TN для стационарно проложенных кабелей с сечением жил по меди не менее 10 мм^2;
3) помещениях с нормальной средой.

34. В месте разделения PEN-проводника на PE- и N-проводники для них предусматриваются:

1) один общий зажим (или шина);
2) отдельные разделенные зажимы (шины);
3) отдельные соединенные между собой зажимы (шины).

35. PEN-проводник питающей линии должен быть подключен к:

1) общему зажиму (шине);
2) зажиму (шине) PE-проводника;
3) зажиму (шине) N-проводника.

36. Защитные проводники выполняют:

1) проводимостью менее 30 % проводимости фазных;
2) изолированными и неизолированными;

3) со встроенными предохранителями;
4) с разъединяющими приспособлениями.

37. Сети TN–S рекомендуются:
1) для временных электроустановок;
2) когда крайне необходима бесперебойность электроснабжения;
3) для расширяющихся электроустановок;
4) для неподверженных изменению электроустановок.

38. TN–C сети характеризуются:
1) низким уровнем электробезопасности;
2) высоким уровнем пожаробезопасности;
3) низким уровнем электромагнитных помех.

39. При выполнении радиальной схемы электроснабжения к главному распределительному щиту:
1) рекомендуется;
2) не рекомендуется
подключать большое количество электроприемников малой и средней мощности, так как:
1) уменьшаются токи короткого замыкания;
2) снижается падение напряжения;
3) экономится проводниково-кабельная продукция;
4) они снижают его надежность.

40. Сечение кабелей, питающих сборки, при радиальной схеме электроснабжения выбирают по:
1) сумме номинальных токов подключенных электроприемников;
2) пиковому току;
3) расчетному току;
4) току трехфазного короткого замыкания.

41. Недостаток радиальных схем:
1) низкая надежность электроснабжения;
2) отсутствие гибкости в отношении расширения производства и при перемещении оборудования;
3) усложненная система релейной защиты и автоматики.

42. К достоинствам радиальных схем относят:
1) приспособленность к автоматизации и к применению дистанционного управления;
2) удобство выполнения сети шинопроводами;
3) наличие на цеховых ТП громоздких распредустройств с большим количеством коммутационных аппаратов.

43. Питающую магистраль по пропускной способности выбирают, ориентируясь на:

1) максимальную нагрузку обслуживаемого участка цеха;
2) сумму номинальных токов подключенных электроприемников;
3) среднюю нагрузку электроприемников вдоль магистрали;
4) среднеквадратичную нагрузку подключенных потребителей;
5) передачу полной мощности питающего трансформатора.

44. Сечение кабельных магистралей:

1) ступенчато уменьшается при удалении от распредустройства;
2) одинаково по всей длине;
3) на каждом участке выбирается по расчетной нагрузке.

45. Подключение магистрали к сборным шинам распредустройства КТП при схеме блока трансформатор–магистраль осуществляется:

1) линейным автоматическим выключателем;
2) через предохранитель;
3) наглухо, без коммутационного аппарата;
4) выключателем нагрузки.

Защита магистрали в этом случае осуществляется:

1) вводным автоматом;
2) не предусматривается;
3) предохранителем.

46. Распределительные шинопроводы по пропускной способности выбирают по:

1) максимальной нагрузке, возможной на обслуживаемом ими участке цеха;
2) номинальной мощности трансформатора питающей магистрали;
3) пиковой нагрузке обслуживаемого участка цеха;
4) сумме номинальных мощностей подключенных электроприемников.

47. Электрические сети во вызрыво- и пожароопасных зонах всех классов выполняют:

1) неизолированными проводниками на изоляторах;
2) шинопроводами с неизолированными шинами в металлическом кожухе;
3) изолированными проводниками.

48. В двухпроводных цепях с рабочим нулевым проводом, проложенных во взрывоопасных зонах класса В–I, для одновременного отключения применяют:

1) два предохранителя;
2) предохранитель и автомат;
3) два рубильника;
4) трехфазный электромагнитный пускатель;
5) двухполюсные выключатели.

49 Применение шинопроводов запрещено:
1) в цеховых сетях с равномерно распределенной нагрузкой;
2) во взрывоопасных зонах класса В–I, В–Iг, В–II, В–IIа;
3) в пожароопасных зонах класса П–I, П–II, П–IIа;
4) при наличии мощных приемников электроэнергии.

50. Соединительные и ответвительные кабельные муфты не устанавливают:
1) в протяженных распределительных сетях;
2) на кабелях, прокладываемых по стенам;
3) на кабелях с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой;
4) во взрывоопасных зонах всех классов.

51. В цеховых сетях напряжением до 1000 В ток короткого замыкания искусственно завышается с целью:
1) повышения стойкости автоматических выключателей;
2) обеспечения достаточной чувствительности защиты;
3) проверки сечения кабелей на термическую стойкость.

52. Токи короткого замыкания в сетях до 1000 В можно увеличить:
1) применением трансформаторов с расщепленными обмотками;
2) установкой реакторов;
3) применением трансформаторов с высокими значениями параметров короткого замыкания;
4) повышением на 1–2 ступени сечения проводников.

53. В цеховых сетях применяют шинопровод типа ШОС. Его расшифровка:
1) шинопровод однофазный силовой;
2) шинопровод односторонний специальный;
3) шинопровод осветительный;
4) шинопровод однофазный строительный.

54. Общие групповые щитки используют для питания:
1) освещения безопасности и эвакуационного освещения;
2) рабочего освещения и освещения безопасности;
3) рабочего и эвакуационного освещения.

55. Питающие и распределительные сети внутреннего освещения выполняются:

1) однофазными двух- или трехпроводными;
2) двухфазными двухпроводными;
3) трехфазными четырех- или пятипроводными

в зависимости от:

1) количества светильников;
2) типа ламп;
3) используемой системы заземления;
4) конструкции сети.

56. Аварийное освещение при аварийном отключении рабочего выключается:

1) дежурным персоналом;
2) автоматически;
3) ответственным за безопасность жизни и деятельности.

57. Отклонение напряжения у осветительных приборов должно находиться в пределах:

1) +5…–2,5 %;
2) +5…–5 %;
3) +2,5…–2,5 %;
4) +10…–10 %.

58. В однофазных линиях осветительной сети сечения нулевых проводов должны быть:

1) не менее 50 % фазных;
2) одинаковыми с фазными;
3) на 50 % больше фазных.

59. В осветительных сетях помещений с взрывоопасными зонами класса В–I разрешается прокладывать:

1) групповые линии;
2) питающие линии;
3) распределительные линии;
4) только ответвления от групповых линий;
5) локальные линии.

60. Наибольшая длина трехфазных групповых линий освещения напряжением 380/220 В:

1) не ограничена;
2) определяется числом, единичной мощностью и типом устанавливаемых источников света;
3) 100 м;
4) 500 м.

61. В начале каждой групповой линии освещения устанавливаются

аппараты защиты:

1) во всех фазных проводниках;
2) в PEN-проводнике;
3) в PE-проводнике;
4) в N-проводнике.

62. Нагрузка по фазам групповой сети освещения распределяется:

1) равномерно;
2) не равномерно;
3) с перекосом 50 %.

63. Главные троллеи передвижных электроприемников в цехах имеют:

1) участки с разным номинальным напряжением;
2) сильно- и слаботочные участки;
3) подвижные и неподвижные секции;
4) рабочие и ремонтные секции.

64. Суммарная допустимая потеря напряжения от источника питания до двигателя подвижного механизма, находящегося в самой удаленной точке троллеев:

1) +5…–5 %;
2) +5…–2,5 %;
3) +2,5…–2,5 %;
4) +10…–10 %;
5) не должна превышать 12 %.

65. Токоподводы к электрическим передвижным механизмам, расположенным во взрывоопасных зонах всех классов, выполняют:

1) кабелем с медными жилами с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой;
2) переносным гибким кабелем с медными жилами с резиновой изоляцией, в резиновой маслобензиностойкой оболочке, не распространяющей горение;
3) гибким кабелем с медными жилами с поливинилхлоридной изоляцией и оболочкой.

66. В точке подключения питающей линии к троллеям устанавливается:

1) аппарат защиты;
2) осветительный прибор;
3) прибор учета электроэнергии;
4) измерительные приборы;
5) коммутационный аппарат.

67. Главную заземляющую шину не допускается выполнять из:

1) меди;

2) стали;
3) алюминия.

68. Главная заземляющая шина должна иметь защитную оболочку в:
1) местах, доступных только квалифицированному электротехническому персоналу;
2) пыльных помещениях;
3) помещениях с химически активной средой;
4) местах, доступных неквалифицированному персоналу;
5) местах, не доступных для осмотра.

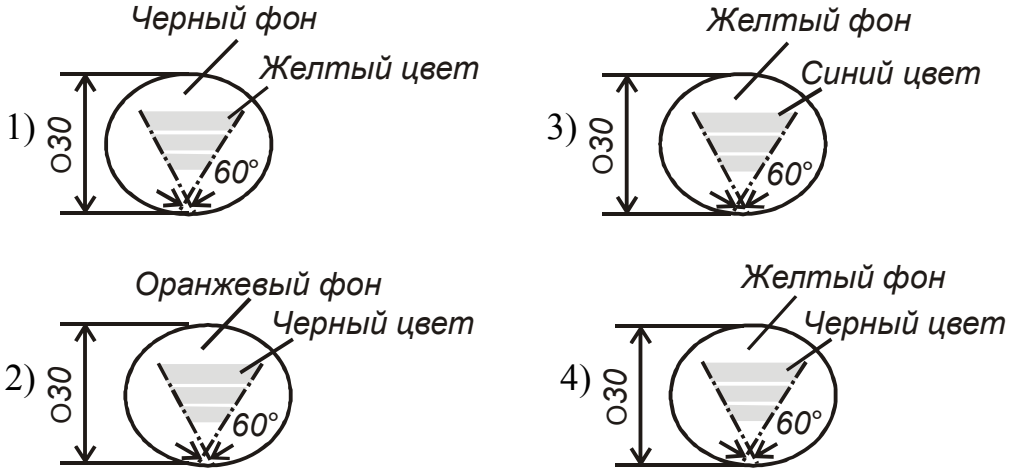
69. Цветовое обозначение главной заземляющей шины:
1) окрашивается в черный цвет;
2) на концах должна иметь полосы желто-зеленого цвета одинаковой толщины;
3) в соответствии с оформлением помещения;
4) окрашивается в любой цвет, кроме цвета фазных проводников.

70. Сечение отдельно установленной главной заземляющей шины:
1) не нормируется;
2) определяется категорийностью потребителей с точки зрения надежности электроснабжения;
3) зависит от расчетной нагрузки узла;
4) должно быть не менее сечения PE (PEN)-проводника питающей линии.

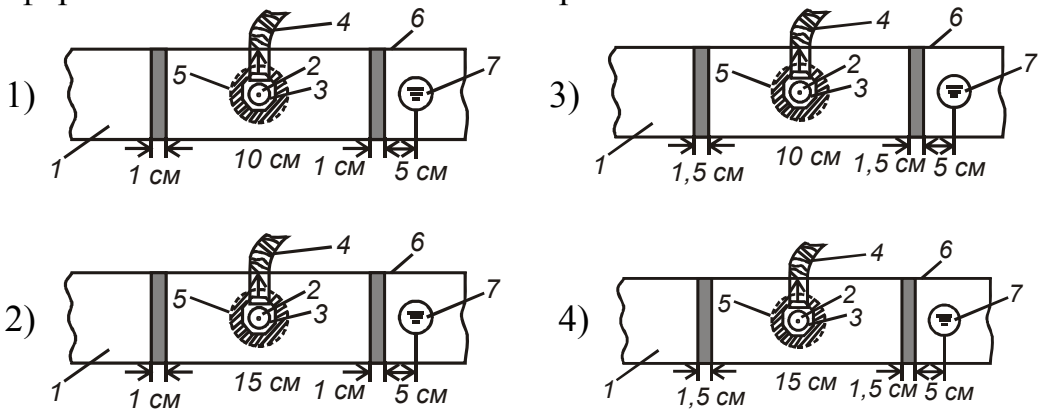
71. В конструкции главной заземляющей шины предусматривается возможность индивидуального отсоединения присоединенных к ней проводников. Отсоединение возможно:
1) только с использованием инструмента;
2) через втычной разъем;
3) рукой через резьбовое соединение без применения инструментов.

72. Заземление нетоковедущих открытых проводящих частей электроустановки в целях обеспечения электробезопасности называется защитным:
1) отключением;
2) уравниванием потенциалов;
3) заземлением;
4) выравниванием потенциалов;
5) занулением.

73. Знак заземления:

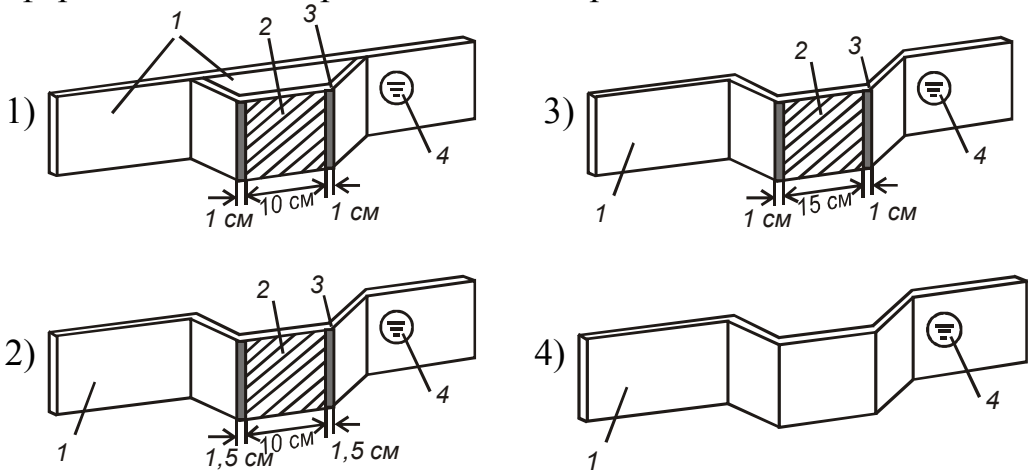


74. Оформление ответвления от магистрали:



Здесь 1 – магистраль заземления; 2 – штыревой вывод (болт); 3 – стальная гайка; 4 – ответвление; 5 – контактная площадка; 6 – черная полоса; 7 – знак заземления.

75. Оформление места присоединения переносного заземления:



1 – магистраль заземления; 2 – контактная площадка; 3 – черная полоса; 4 – знак заземления.

76. Электроприемники к магистрали заземления или зануления подключаются:

1) последовательно;
2) самостоятельными ответвлениями;
3) мелкие последовательно, а крупные самостоятельными ответвлениями;
4) через предохранители;
5) с помощью автомата, оснащенного электромагнитным расцепителем.

Инструкция: в заданиях 77–95 выберите все верные варианты ответов ***да*** или ***нет*** и впишите в графу ***ответ***

77. Тип системы заземления – это показатель, характеризующий:

	Ответ
1) конструктивное использование заземляющего устройства	***да/нет***
2) отношение к земле нейтрали трансформатора на подстанции	***да/нет***
3) устройство нейтрального проводника	***да/нет***
4) величину сопротивления заземляющего устройства	***да/нет***
5) схему соединения обмоток трансформатора	***да/нет***
6) отношение к земле открытых проводящих частей у потребителя	***да/нет***

78. В качестве PE-проводников в электроустановках до 1000 В могут использоваться:

	Ответ
1) жилы многожильных кабелей	***да/нет***
2) трубопроводы горючих веществ	***да/нет***
3) изолированные или неизолированные провода в общей оболочке с фазными проводами	***да/нет***
4) стационарно проложенные изолированные и неизолированные проводники	***да/нет***
5) водопроводные трубы с изолирующими вставками	***да/нет***
6) металлические короба и лотки электропроводок	***да/нет***
7) металлорукова	***да/нет***

79. От распределительных шкафов (пунктов) электроприемники с номинальными токами до 15 А рекомендуется записывать:

Ответ

1) проводниками с сечением, выбранным по среднеквадратичному току	***да/нет***
2) только отдельными линиями, выполненными кабелями с алюминиевыми жилами	***да/нет***
3) цепочкой	
4) под один защитный аппарат	***да/нет***
	да/нет

80. Распределение электродвигателей по сборкам при радиальной схеме распределения электроэнергии зависит от:

Ответ

1) номинальной мощности трансформатора на подстанции	***да/нет***
2) возможности выполнения защиты	***да/нет***
3) типа вводного аппарата	***да/нет***
4) их мощности	***да/нет***
5) типа системы заземления	***да/нет***

81. Шинопроводы по назначению подразделяются на:

Ответ

1) раздаточные	***да/нет***
2) распределительные	***да/нет***
3) групповые	***да/нет***
4) рассредоточенные	***да/нет***
5) троллейные	***да/нет***
6) световые	***да/нет***
7) магистральные	***да/нет***
8) малометражные	***да/нет***
9) транспортные	***да/нет***

82. К достоинствам магистральных схем по отношению к радиальным относят:

Ответ

1) повышенную надежность электроснабжения	***да/нет***
2) гибкость сети при перегруппировке электроприемников или изменении	***да/нет***

технологического процесса

3) возможность выполнения сети без распределительных щитов ***да/нет***

4) большие первоначальные вложения в сооружение сети ***да/нет***

5) простую систему релейной защиты и автоматики ***да/нет***

6) возможность выполнения сети со щитами на малое количество присоединений ***да/нет***

83. Применение неизолированных проводников запрещено:

Ответ

1) для зануления электроустановок ***да/нет***
2) в пожароопасных зонах всех классов ***да/нет***
3) в сетях заземления ***да/нет***
4) в помещениях с нормальной средой ***да/нет***
5) во взрывоопасных зонах всех классов ***да/нет***

84. Шинопроводы с изолированными алюминиевыми шинами в металлическом корпусе допускается применять в зонах классов:

Ответ

1) В–Iа ***да/нет***
2) В–I, В–Iг ***да/нет***
3) В–II, В–IIа ***да/нет***
4) В–Iб ***да/нет***
5) П–I, П–II ***да/нет***

85. Во взрывоопасных зонах всех классов могут применяться провода с:

Ответ

1) полиэтиленовой ***да/нет***
2) резиновой ***да/нет***
3) поливинилхлоридной ***да/нет***
4) слюдяной ***да/нет***

изоляцией и кабели с:

1) полиэтиленовой ***да/нет***
2) резиновой ***да/нет***
3) поливинилхлоридной ***да/нет***
4) бумажной ***да/нет***
5) слюдяной ***да/нет***

изоляцией в свинцовой и поливинилхлоридной оболочке.

86. Электрические сети освещения подразделяются на:

Ответ

1) сильноточные ***да/нет***
2) магистральные ***да/нет***
3) питающие ***да/нет***
4) разделяющие ***да/нет***
5) распределительные ***да/нет***
6) сигнальные ***да/нет***
7) рекламные ***да/нет***
8) групповые ***да/нет***
9) локальные ***да/нет***

87. Назначение рабочего освещения обеспечить:

Ответ

1) безопасную эвакуацию людей из помещения ***да/нет***
2) надлежащую освещенность помещения ***да/нет***
3) надлежащую освещенность рабочих поверхностей ***да/нет***
4) продолжение работы в чрезвычайных ситуациях ***да/нет***
5) безаварийный останов производства ***да/нет***

88. Особенность цеховых осветительных электрических сетей по сравнению с сетями силовых электроприемников:

Ответ

1) значительные времена использования максимума нагрузки ***да/нет***
2) обязательное применение нескольких номинальных напряжений ***да/нет***
3) модульный принцип построения сети ***да/нет***
4) значительная протяженность и разветвленность ***да/нет***
5) небольшие мощности отдельных электроприемников и участков сети ***да/нет***
6) наличие установок рабочего и аварийного освещения ***да/нет***

89. Групповые щитки устанавливают:

Ответ

1) обязательно у главного входа ***да/нет***
2) у аварийного выхода ***да/нет***
3) в центре электрических нагрузок ***да/нет***

4) в удобных для обслуживания местах ***да/нет***
5) только у главного распредщита ***да/нет***

90. Потеря напряжения в троллейной линии может оказаться выше допустимой из-за:

Ответ

1) ее секционирования ***да/нет***
2) большой протяженности ***да/нет***
3) значительной нагрузки ***да/нет***
4) завышенного сечения проводников ***да/нет***

тогда

1) троллеи подпитываются кабелем или алюминиевой лентой ***да/нет***
2) уменьшают сечение проводников ***да/нет***
3) увеличивают протяженность линии ***да/нет***
4) изменяют схему питания линии ***да/нет***
5) секционируют троллеи с раздельным питанием секций ***да/нет***

91. К главному заземляющему зажиму (шине) электроустановки подключают:

Ответ

1) открытые проводящие части другой электроустановки ***да/нет***
2) фазные проводники ***да/нет***
3) заземляющие проводники ***да/нет***
4) защитные проводники ***да/нет***
5) проводники основной системы уравнивания потенциалов ***да/нет***
6) PEN-проводник ***да/нет***

92. Защитные проводники могут быть:

Ответ

1) естественными и искусственными ***да/нет***
2) изолированными и неизолированными ***да/нет***
3) стальными, алюминиевыми, медными ***да/нет***
4) свинцовыми ***да/нет***
5) непрерывными на всем протяжении сети ***да/нет***
6) с изолирующими вставками ***да/нет***
7) с разъединяющими устройствами ***да/нет***

93. Главная заземляющая шина (главный заземляющий зажим) – шина (или зажим), являющаяся частью заземляющего устройства

электроустановки до 1000 В и предназначенная для электрического присоединения нескольких проводников с целью:

Ответ

1) выравнивания потенциала ***да/нет***
2) заземления ***да/нет***
3) уравнивания потенциала ***да/нет***
4) создания зоны нулевого потенциала ***да/нет***
5) увеличения величины тока повреждения ***да/нет***

94. Магистрали заземления или зануления и ответвления от них в закрытых помещениях и в наружных установках должны быть доступны для осмотра. Это требование не распространяется на:

Ответ

1) стационарно открыто проложенные проводники ***да/нет***
2) проводники, непрерывность которых обеспечена соединениями, защищенными от механических и химических повреждений ***да/нет***
3) магистрали для однофазных электроприемников ***да/нет***
4) проводники в помещениях с нормальной средой ***да/нет***
5) нулевые жилы и оболочки кабелей ***да/нет***
6) арматуру железобетонных конструкций ***да/нет***
7) заземляющие и нулевые защитные проводники, проложенные в трубах и коробах ***да/нет***

95. Неразборные контактные соединения заземляющих и нулевых защитных проводников выполняют:

Ответ

1) опрессовкой через соединительную гильзу ***да/нет***
2) скруткой ***да/нет***
3) клепкой ***да/нет***
4) опрессовкой с кабельным наконечником ***да/нет***
5) клейкой ***да/нет***
6) винтовым соединением с расклепкой вышедшей части винта ***да/нет***
7) пайкой ***да/нет***
8) болтовым соединением с развальцовкой части винта ***да/нет***
9) сваркой ***да/нет***

Инструкция: в заданиях 96–100 в строке ***ответ*** запишите букву из второго списка, которая соответствует цифре из первого списка

96. Какие из сетей характеризуются:

1) значительным уровнем электромагнитных возмущений	А: IT Б: TT
2) высокой степенью бесперебойности электроснабжения	В: TN–S Г: TN–C

Ответ: 1 – ; 2 – .

97. Какие из сетей рекомендуются для:

1) обеспечения высокого уровня пожаробезопасности	А: IT Б: TT
2) временных электроустановок	В: TN–S Г: TN–C

Ответ: 1 – ; 2 – .

98. Какие из сетей:

1) обладают низким уровнем электробезопасности	А: TN–S Б: TN–C–S
2) рекомендуются для расширяющихся и изменяющихся электроустановок	В: TT Г: IT

Ответ: 1 – ; 2 – .

99. Во взрывоопасных помещениях для распределения электроэнергии применяют проводники:

1) со стальными жилами 2) с алюминиевыми жилами	А: в зонах классов В–I, В–II, В–IIа Б: в зонах классов BIб, BIг, BII, BIIа В: ни в одной из зон Г: в зонах классов В–I, В–Iб Д: в любых зонах

Ответ: 1 – ; 2 – .

100. Питающие линии и присоединенные к ним электроприемники в сетях напряжением до 1000 В во взрывоопасных помещениях защищают:

1) в зонах классов В–I, В–Iа, В–II, В–IIа 2) в зонах классов В–Iб, В–Iг	А: только от перегрузок Б: только от коротких замыканий В: от перегрузок и КЗ Г: как для невзрывоопасных зон

Ответ: 1 – ; 2 – .

1.7.2. Расчетные и графические задания

1. Методом упорядоченных диаграмм рассчитать электрическую нагрузку ремонтно-механического цеха, разработать схему электроснабжения, выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ. Для силовой сети напряжением 0,38 кВ предусмотреть радиальную схему распределения электроэнергии. Освещение цеха выполнить люминесцентными лампами.

Краткая характеристика производства и потребителей электроэнергии. Ремонтно-механический цех (РМЦ) предназначен для ремонта и настройки электромеханического оборудования, выбывающего из строя. Он является одним из цехов металлургического завода, выплавляющего и обрабатывающего металл. Ремонтно-механический цех имеет два участка, в которых установлено необходимое для ремонта оборудование: токарные, строгальные, фрезерные, сверлильные и другие станки. В цехе предусмотрены помещения для трансформаторной подстанции, вентиляторной, инструментальной, складов, сварочных постов, администрации.

Цех получает электроэнергию от главной понизительной подстанции. Расстояние от ГПП до цеховой ТП – 900 м, а от энергосистемы до ГПП – 14 км.

Количество рабочих смен – 2. Потребители цеха имеют 2 и 3 категорию надежности электроснабжения.

Каркас здания цеха смонтирован из блоков-секций длиной 8 м каждый. Размеры цеха А×В×Н = 64×36×9 м. Вспомогательные двухэтажные помещения высотой 4 м.

Перечень оборудования РМЦ дан в таблице 1.8. Мощность $p_{ЭП}$ указана для одного электроприемника. Расположение основного оборудования показано на плане (рис. 1.21).

2. Представить разработанную в задании 1 систему электроснабжения ремонтно-механического цеха в виде однолинейной схемы. Поскольку сечение, тип проводников и защитные аппараты не выбирались, на схеме эти элементы показать, но не подписывать.

3. Выбрать точку подвода питания и рассчитать троллеи для мостовых кранов, параметры двигателей которых приведены в таблице 1.8, а протяженность – на рис. 1.21 (позиция 38, 39). На механизмах установлены асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, режим работы двигателей средний, коэффициент использования $k_{и} = 0{,}15$. Напряжение сети 380 В. Для троллеев принять стальной уголок 50×50×5 мм. Расстояние между фазами троллеев 450 мм.

Коэффициент мощности всех электроприемников крана cosφ = 0,75.

Таблица 1.8

Перечень оборудования ремонтно-механического цеха (к заданию 1)

Номер на плане, рис.1.21	Наименование оборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
1, 2	Вентиляторы	55	48	30	
3…5	Сварочные агрегаты	14	10	12	ПВ = 40 %
6…8	Токарные автоматы	10	12	6	
9…11	Зубофрезерные станки	20	15	10	
12…14	Круглошлифовальные станки	5	4	6	
15…17	Заточные станки	1,5	3	2,5	
18, 19	Сверлильные станки	3,4	3,2	2,2	
20…25	Токарные станки	12	9	6	
26, 27	Плоскошлифовальные станки	17,2	8,5	10,5	
28…30	Строгальные станки	4,5	12,5	17,5	
31…34	Фрезерные станки	7,5	9,5	8,5	
35…37	Расточные станки	4	11,5	7,5	
38, 39	Краны мостовые с механизмами:				ПВ = 60 %
	главный подъем	10	8	12	
	вспомогательный подъем	5	3	5	
	передвижение моста	2×8	2×5	2×10	
	передвижение тележки	2	1,5	5	
	ИТОГО:	33	22,5	42	

4. Опираясь на расчеты задания 3, спроектировать троллеи для работы на них по два однотипных мостовых крана. Подвод питания выполнить:

- непосредственно от распредустройства ТП;
- от ближайших распределительных шкафов (пунктов) разработанной в задании 1 схемы электроснабжения цеха.

5. Рассчитать осветительную сеть ремонтно-механического цеха (рис. 1.21), получающую питание от распределительного устройства ТП напряжением 380/220 В. Сведения о цехе и вспомогательных помещениях даны в задании 1. Расчетную осветительную нагрузку распределить пропорционально площади имеющихся на плане помещений. Щит рабочего освещения и групповые щитки установить в

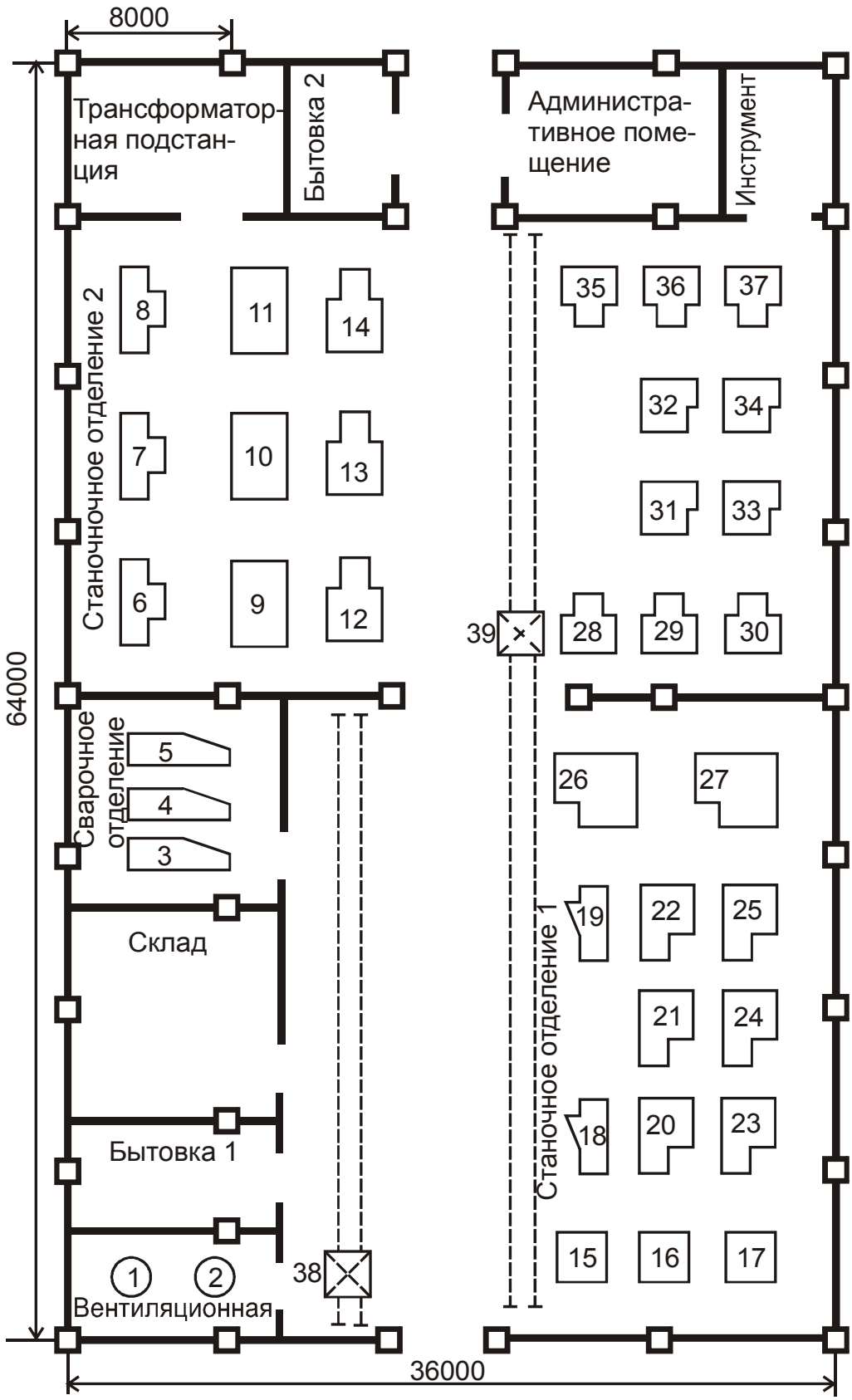


Рис. 1.21. План расположения электрооборудования ремонтно-механического цеха

местах, удобных для обслуживания. Для всей осветительной сети использовать провод ПВ, проложенный в трубах. Среда в помещениях цеха нормальная. Питающие линии выполнить четырехпроводными, распределительные линии бытовок, склада и вентиляционной – двухпроводными, остальных помещений – четырехпроводными. Линии освещения питают светильники с люминесцентными лампами мощностью 40 Вт, их коэффициент мощности cosφ = 0,95.

6. Представить разработанную в задании 5 питающую и распределительную осветительные сети в виде принципиальной схемы. Маркировку защитных аппаратов не наносить.

7. В примере 1.2 для подпитки троллеев выбрать алюминиевую шину из расчета, чтобы потери напряжения в подпитке не превышали 2 %.

8. На рис. 1.22 приведена силовая сеть кузнечного цеха. Определить тип данной схемы питания.

9. В таблице 1.9 приведены сведения о нагрузке кузнечного цеха. Большое количество электроприемников имеют малую номинальную мощность. Оценить возможность сокращения числа распределительных шкафов в приведенной на рис. 1.22 схеме электроснабжения.

10. Рассчитать электрическую нагрузку участка кузнечно-прессового цеха, разработать схему электроснабжения, выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ. Для силовой сети напряжением 0,38 кВ предусмотреть смешанную схему распределения электроэнергии. Освещение цеха выполнить люминесцентными лампами.

Краткая характеристика производства и потребителей электроэнергии. Участок кузнечно-прессового цеха (КПЦ) предназначен для подготовки металла к обработке. Он имеет станочное отделение, в котором установлено оборудование: обдирочные станки типа РТ–21001 и РТ–503, электротермические установки, кузнечно-прессовые машины (КПМ), мостовые краны и другое оборудование. Участок предусматривает отдельные помещения для цеховой ТП, вентиляционной, инструментальной, складов, для бытовых нужд.

Электроснабжение осуществляется от ГПП. Расстояние от ГПП до цеховой трансформаторной подстанции 1,4 км, а от энергосистемы до ГПП – 12 км. От этой же цеховой ТП намечается электроснабжение при расширении станочного парка. Дополнительная нагрузка КПЦ в перспективе составит: $P_{доп}$ = 683 кВт, $Q_{доп}$ = 828 кВАр.

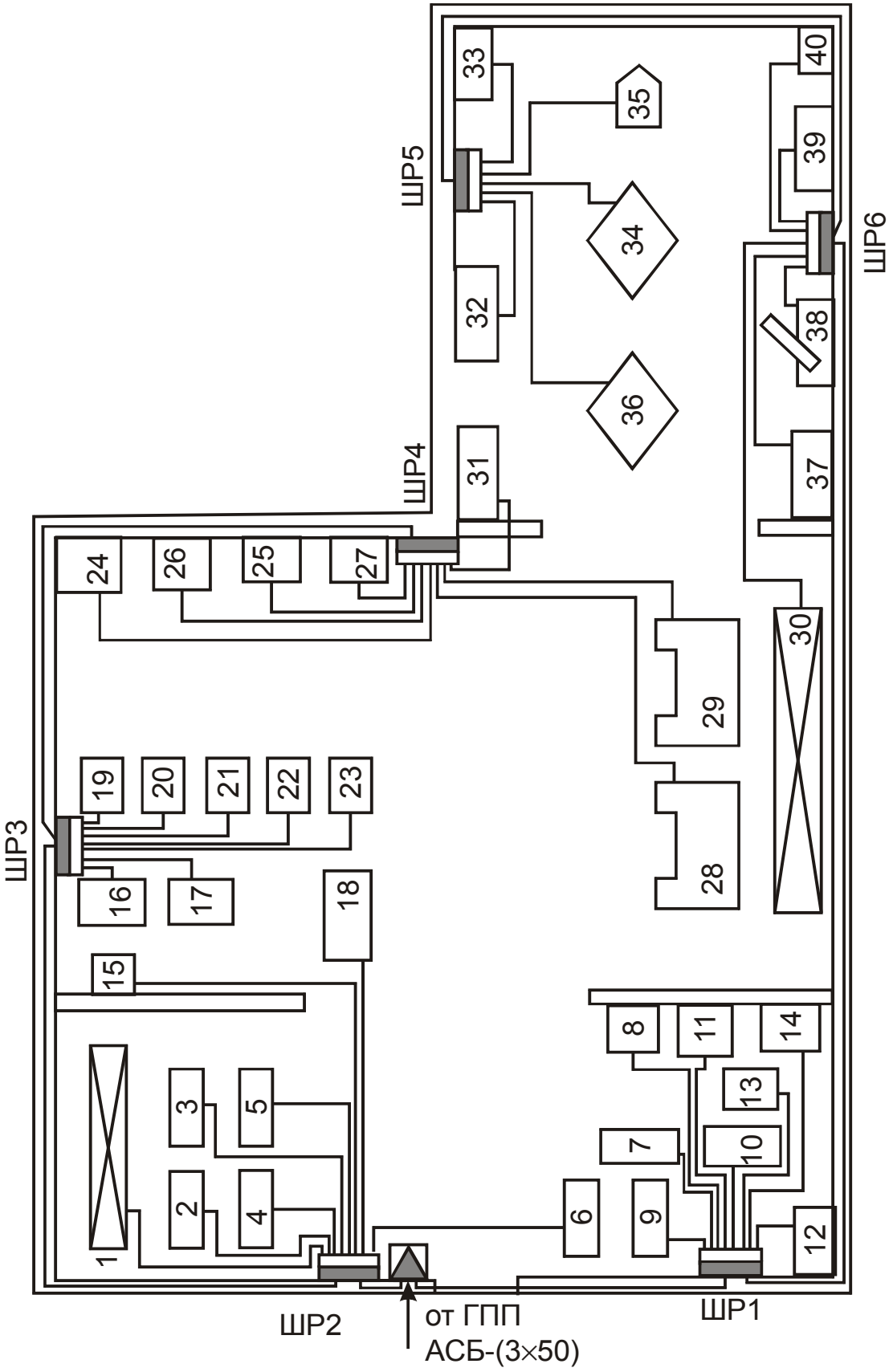


Рис. 1.22. Схема силовой сети кузнечного цеха

Таблица 1.9

Перечень оборудования кузнечного цеха (к заданию 9)

Номер на плане, рис. 1.22	Наименование электроприемника	Установленная мощность ЭП, кВт									
		Номер варианта									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1, 30	Кран-балка ПВ=40%	40	30	50	24	15	20	34	28	40	20
18	Пресс	60	50	40	40	50	60	32	50	70	40
2–5	Фрезерный станок	4	2	4	2	4	4	2	2	4	2
6, 7, 10	Трубогибочный станок	2	5	4	4	5	2	2	5	4	4
9, 26	Шлифовальный станок	6	8	7	6	14	12	8	10	12	8
8, 11, 12, 13, 14, 24	Сварочный агрегат ПВ = 25%	20	20	20	40	40	50	50	50	40	40
31	Вентилятор	12	8	10	4	2	6	4	8	10	7
15, 27	Сушильный шкаф	40	24	12	12	8	16	14	20	15	8
16, 17	Закалочная печь	30	30	28	20	20	40	100	60	50	40
19–23, 25,34	Токарный станок	4	2	2	4	4	2	2	4	2	2
37	Сверлильный станок	4	6	5	8	11	7	4	10	15	4
28, 29	Электрованна	26	28	14	40	60	40	50	70	20	30
32, 36	Электромолот	22	12	44	60	40	70	30	34	19	25
38	Поворотный кран	6	8	7	9	5	8	7	10	6	5
33, 40	Вентилятор горна	10	14	12	12	14	19	20	10	20	15
35	Обдирочный станок	24	14	8	12	14	16	10	13	17	21
39	Нагревательная плита	14	20	8	15	15	8	6	13	8	10

Количество рабочих смен – 2. Потребители участка имеют 2 и 3 категорию надежности электроснабжения.

Каркас здания смонтирован из блоков-секций длиной 8 м каждая. Размеры участка А×В×Н = 96×56×10 м. Вспомогательные двухэтажные помещения высотой 4 м.

Перечень оборудования участка КПЦ дан в таблице 1.10. Мощность $p_{ЭП}$ указана для одного электроприемника. Расположение основного оборудования показано на плане (рис. 1.23).

Таблица 1.10

Перечень оборудования участка кузнечно-прессового цеха (к заданию 1.10)

Номер на плане, рис. 1.23	Наименование электрооборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
1	Вентилятор вытяжной	55	40	50	
2	Вентилятор приточный	75	60	70	
3…5	Электротермические установки	20	15	18	
6, 17, 36	Краны мостовые	110	130	120	ПВ = 40 %
7…16	Обдирочные станки типа РТ–503	37	21	25	
18…20	Кривошипные КПМ	15	10	12	
21…23	Фрикционные КПМ	7,5	4,5	5,5	
24…35	Обдирочные станки типа РТ–21001	21	17	19	

11. Рассчитать троллеи для мостовых кранов, расположение которых в кузнечно-прессовом цехе приведено на рис. 1.23 (позиции 6, 17, 36). Краны оснащены асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, их параметры приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11

Параметры двигателей кранов при ПВ = 40 % (к заданию 11)

Механизмы крана	Мощность двигателей, кВт, для вариантов		
	1	2	3
Главный подъем	2×20 (работают совместно)	40	2×18 (работают совместно)
Вспомогательный подъем	15	20	15
Механизм передвижения моста	2×25	2×30 (работают совместно)	4×15 (работают совместно)
Механизм передвижения тележки	5	10	9
ИТОГО:	110	130	120

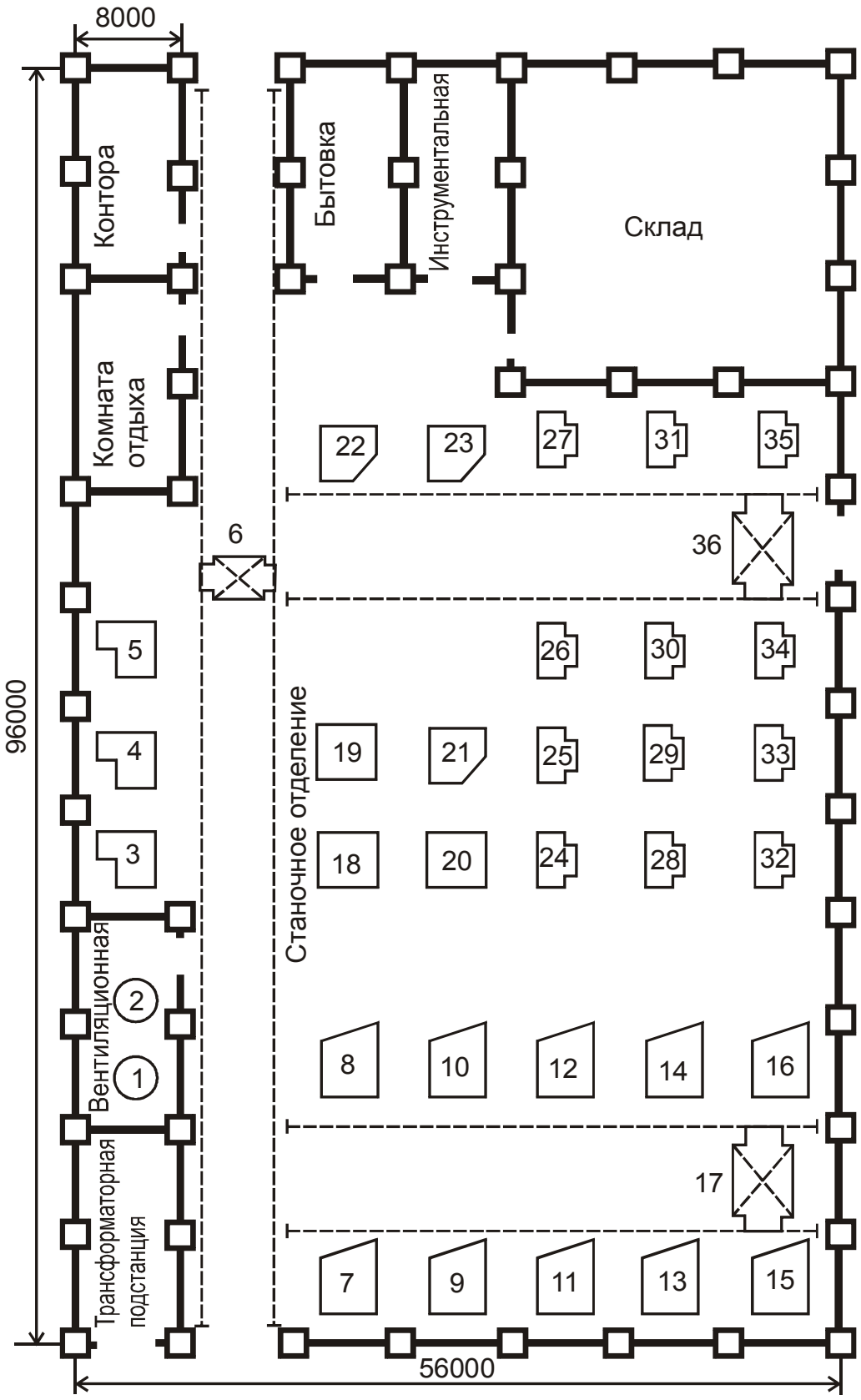


Рис. 1.23. План расположения электрооборудования участка кузнечно-прессового цеха

Коэффициент использования кранов $K_u = 0{,}15$, коэффициент мощности электродвигателей $\cos\varphi = 0{,}7$. Напряжение сети 380 В. Троллеи выполнить из стального уголка 50×50×5 мм, расстояние между фазами 250 мм. Рассмотреть подвод питания от распредустройства цеховой ТП:

- к середине троллеев;
- по кратчайшему расстоянию.

Допустимая потеря напряжения в троллеях 1 %. При необходимости подпитку выполнить кабелем, проложенным вдоль троллеев в виде шлейфа.

12. Рассчитать осветительную сеть участка кузнечно-прессового цеха (рис. 1.23), получающую питание от распределительного устройства ТП напряжением 380/220 В. Сведения об участке и вспомогательных помещениях даны в задании 10. Осветительную нагрузку рассчитать для каждого помещения в зависимости от характера зрительных работ. Щит рабочего освещения и групповые щитки установить в местах, удобных для обслуживания. Для всей осветительной сети использовать провод ПВ, проложенный в трубах. Среда в помещениях нормальная. Питающие линии выполнить четырехпроводными, распределительные линии вспомогательных помещений – двухпроводными, остальных помещений – четырехпроводными. Линии освещения питают светильники с лампами накаливания мощностью 200 Вт.

13. Разработанную в задании 12 питающую и распределительную осветительные сети представить в виде принципиальной однолинейной схемы. Маркировку защитных аппаратов не наносить.

14. Методом упорядоченных диаграмм рассчитать электрическую нагрузку механического цеха (табл. 1.12), разработать схему электроснабжения, выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ. Оборудование в цехе распределено равномерно (рис. 1.24). Силовую сеть напряжением 0,38 кВ выполнить шинопроводами. Для освещения всех помещений использовать люминесцентные лампы.

Краткая характеристика производства и потребителей электроэнергии. Механический цех является вспомогательным и выполняет заказы основных цехов предприятия. Он предназначен для выполнения различных операций по обслуживанию и ремонту электротермического и станочного оборудования. Для этой цели в цехе предусмотрены: станочное отделение, сварочный участок, компрессорная, производственные, служебные и бытовые помещения. Основное оборудование установлено в станочном отделении.

Таблица 1.12

Перечень оборудования механического цеха (к заданию 14)

Номер на плане, рис. 1.24	Наименование электрооборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
1…4	Сварочные автоматы	50 кВ·А	42 кВ·А	64 кВ·А	ПВ = 60%
5…8	Вентиляторы	4,8	4,5	5	
9, 10	Компрессоры	30	50	40	
11,12, 39, 40	Алмазно-расточные станки	2,5	2,8	3,2	
13…16	Горизонтально-расточные станки	25	18	15	
17, 19	Продольно-строгальные станки	40	30	20	
18	Кран-балка	15	10	12	ПВ = 60%
20	Мостовой кран	55	45	60	ПВ = 40%
21…26	Расточные станки	14	10	15	
27…29	Поперечно-строгальные станки	10	7,5	8,5	
30…33	Радиально-сверлильные станки	3	5	7	1-фазные
34…36	Вертикально-сверлильные станки	4	3	2,5	1-фазные
37, 38	Электропечи сопротивления	32	42	45	
41, 42	Заточные станки	1,5	2,5	2,2	1-фазные
43…50	Токарно-револьверные станки	4,5	12,5	8,8	

Электроснабжение механического цеха осуществляется от собственной цеховой трансформаторной подстанции. Находится она на расстоянии 1,5 км от ГПП предприятия. От энергосистемы до главной понизительной подстанции 12 км.

Цех работает в две смены. Потребители электроэнергии относятся по надежности и безопасности электроснабжения к второй и третьей категории.

Каркас здания смонтирован из блоков-секций. Размеры цеха А×В×Н = 96×60×7 м. Все помещения, кроме станочного отделения двухэтажные высотой 3,2 м.

Перечень оборудования цеха дан в таблице 1.12. Мощность $p_{ЭП}$ указана для одного электроприемника. Расположение основного оборудования показано на плане (рис. 1.24).

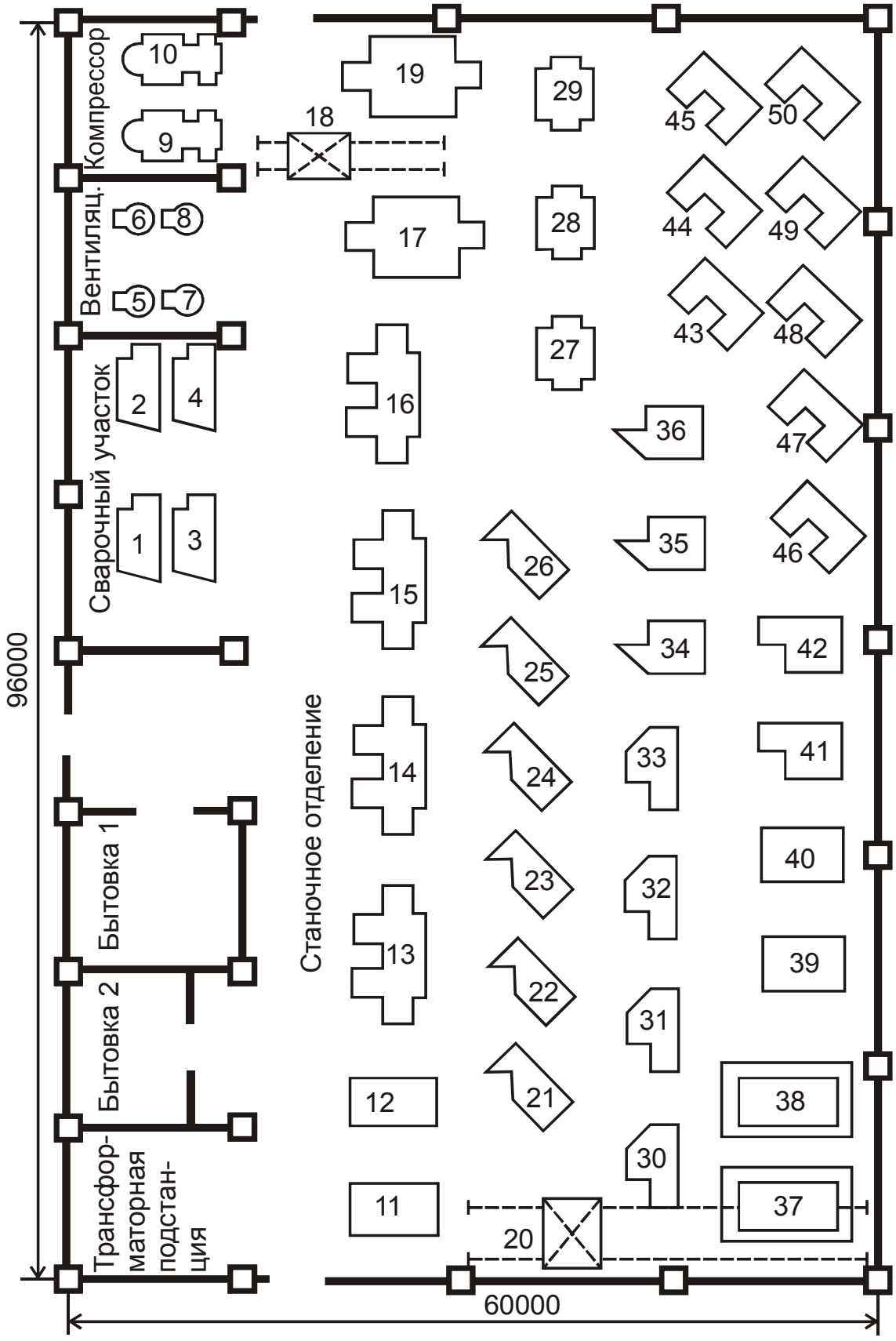


Рис. 1.24. План расположения электрооборудования механического цеха

15. Для выбранной в задании 14 трансформаторной подстанции рассчитать заземляющее устройство. Выбрать место для его установки. Разработать сеть защитного заземления, подключить оборудование. При выполнении задания использовать, например, [5–7].

16. Рассчитать заземляющее устройство для выбранной в задании 10 подстанции с одним трансформатором напряжением 10/0,4–0,23 кВ. Сеть 10 кВ работает с изолированной нейтралью, ток замыкания на землю 25 А, на стороне 0,4/0,23 кВ нейтраль трансформатора глухо заземлена. Для оборудования цеха применяется зануление. Цеховая подстанция получает питание по двум кабелям АСБ, проложенным в земле, общей длиной 120 м. Грунт – суглинок, климатический район – второй. В качестве естественного заземлителя использовать броню кабелей 10 кВ. Сопротивление растеканию тока с брони кабеля равно 2 Ом. Разработать сеть зануления цеха, подключить оборудование.

2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1000 В

2.1. Цель и особенности расчетов

Расчет выполняется с целью выбора коммутационной аппаратуры, шинопроводов, кабелей и другого электрооборудования, а также для проверки чувствительности защит.

Особенности расчета токов КЗ в сетях до 1000 В:

- учитываются активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи до точки короткого замыкания;
- при питании от энергосистемы не учитывается затухание периодической составляющей тока КЗ ввиду большой удаленности генераторов;
- при питании от маломощных местных электростанций или от автономных генераторов напряжением выше 1000 В затухание периодической составляющей тока КЗ не учитывается, если мощность генератора превышает мощность понижающего трансформатора в пять и более раз;
- при питании от автономных или аварийных генераторов напряжением 0,4 кВ затухание учитывается независимо от мощности генератора.

В зависимости от цели расчета учитывают разные расчетные режимы работы электрической схемы. При выборе аппаратуры расчетным считается максимальный режим, так как токи КЗ имеют наибольшие значения. Этот же режим принимается и при расчетах токов пуска и самозапуска электродвигателей с целью обеспечения несрабатывания защит в сети. При проверке чувствительности защит расчетным является минимальный режим, при котором токи КЗ имеют наименьшие значения. Этот же режим используют для проверки возможности пуска и самозапуска электродвигателей.

При расчетах металлических коротких замыканий (сопротивление контакта в месте повреждения не учитывается) определяют следующие значения токов:

$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,\max}$ – максимальный ток трехфазного металлического КЗ при максимальном режиме работы питающей энергосистемы, используется для выбора аппаратуры и защит, проверки селективности их действия;

$I^{(2)}_{\text{КЗ}\,\min}$ – минимальный ток двухфазного металлического КЗ при минимальном режиме работы энергосистемы, используется для проверки чувствительности защит;

$I^{(1)}_{\text{КЗ min}}$ – минимальный ток однофазного металлического КЗ, определяется для проверки чувствительности и селективности действия защит.

Большинство КЗ в сетях до 1000 В происходит через электрическую дугу, сопротивление которой существенно ограничивает ток КЗ. В 85 % случаев КЗ возникают вследствие металлического контакта, однако электродинамические силы, пропорциональные квадрату тока, разбрасывают металлические проводники, разрывают закоротки небольшого сечения и КЗ переходит в дуговое. Чтобы учесть токоограничивающее действие электрической дуги, определяют следующие значения токов и напряжений:

$I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}$ – средний, наиболее вероятный ток трехфазного КЗ, вычисленный с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения, используется для выбора аппаратуры в сети, в том числе отходящих от КТП линий, в случае, если невозможно выбрать аппаратуру, стойкую при металлическом КЗ (кроме вводных и секционного выключателей КТП, которые всегда следует выбирать по металлическим КЗ), а также для проверки селективности защит при этом токе, если при металлическом КЗ она не обеспечивается;

$I^{(2)}_{\text{КЗ R}}$ – минимальный ток двухфазного КЗ, вычисленный с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения, используется для проверки чувствительности защит;

$I^{(1)}_{\text{КЗ R}}$ – минимальный ток однофазного КЗ, вычисленный с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения, используется для проверки чувствительности защит;

$U_{\text{КЗ ост}}$ – остаточное напряжение при КЗ через дугу, используется для проверки чувствительности максимальных токовых защит с пуском по напряжению, устанавливаемых на понижающих трансформаторах и генераторах напряжением 0,4 кВ.

Определяются также значения ударного тока короткого замыкания $i_{\text{уд}}$ и его тепловой импульс. Их используют для выбора аппаратуры (автоматических выключателей, рубильников), шинопроводов и другого электрооборудования.

2.2. Сопротивления элементов схемы замещения

Для расчетов токов короткого замыкания составляют схему замещения, в которую входят все сопротивления цепи до точки КЗ. Расчет сопротивлений отдельных элементов выполняется по

приведенным ниже соотношениям.

Питающая энергосистема. Активное и индуктивное сопротивления питающей энергосистемы до зажимов высокого напряжения ВН понижающего трансформатора находят по току КЗ на стороне ВН и приводят к стороне низшего напряжения:

$$x_{\text{с.НН}} = x_{\text{с.ВН}}\left(\frac{U_{\text{ном. тр. НН}}}{U_{\text{ном. тр. ВН}}}\right)^2; \quad r_{\text{с.НН}} = r_{\text{с.ВН}}\left(\frac{U_{\text{ном. тр. НН}}}{U_{\text{ном. тр. ВН}}}\right)^2, \qquad (2.1)$$

где $x_{\text{с.ВН}}$ и $r_{\text{с.ВН}}$ –индуктивное и активное сопротивления энергосистемы, соответственно, приведенные к стороне ВН;

$x_{\text{с.ВН}}$ и $r_{\text{с.ВН}}$ – то же, приведенные к стороне НН понижающего трансформатора;

$U_{\text{ном. тр. НН}}$ и – $U_{\text{ном. тр. ВН}}$ – номинальные напряжения обмоток НН и ВН понижающего трансформатора.

Допускается при расчетах токов КЗ не учитывать активное сопротивление энергосистемы, а индуктивное – принимать равным полному сопротивлению энергосистемы, определяя его значение по известному току $I^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}$ или мощности $S^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}$ трехфазного КЗ на зажимах ВН понижающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ:

$$x_{\text{с.ВН}} \approx \frac{U_{\text{с. ВН}}}{\sqrt{3}\, I^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}} = \frac{U^2_{\text{с. ВН}}}{S^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}}, \qquad (2.2)$$

где $U_{\text{с.ВН}}$ – напряжение энергосистемы со стороны ВН трансформатора, при котором определялись ток и мощность КЗ системы.

Пример 2.1.

По результатам расчета тока трехфазного КЗ на стороне 6 кВ понижающего трансформатора мощность короткого замыкания системы составила 150 МВА. Привести сопротивление питающей энергосистемы к напряжению 0,4 кВ.

Решение.

Подставив уравнение (2.2) в (2.1) и приняв $U_{\text{с.ВН}} = U_{\text{ном.тр.ВН}}$ получаем:

$$x_{\text{с.НН}} = x_{\text{с.ВН}}\left(\frac{U_{\text{ном. тр. НН}}}{U_{\text{ном. тр. ВН}}}\right)^2 = \frac{U^2_{\text{с.ВН}}}{S^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}} \cdot \frac{U^2_{\text{ном.тр.НН}}}{U^2_{\text{ном.тр.ВН}}} = \frac{U^2_{\text{ном.тр.НН}}}{S^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}} = \frac{400^2}{150 \cdot 10^6} =$$

$= 1{,}066 \cdot 10^{-3}$ *Ом* $= 1{,}066$ мОм.

Трансформаторы. Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$z_{\text{тр}} = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном}}}{100 \cdot S_{\text{ном.тр}}}, \qquad (2.3)$$

где $u_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора;

$S_{ном.тр}$ – номинальная мощность трансформатора.

Активное сопротивление определяется по потерям КЗ в трансформаторе:

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном.тр}^2}, \qquad (2.4)$$

где $\Delta P_{КЗ}$ – потери короткого замыкания.

В соотношениях (2.3) и (2.4) в качестве $U_{ном}$ может быть использовано номинальное напряжение любой обмотки трансформатора. Сопротивление трансформатора будет приведено к тому напряжению, которое подставляется в (2.3) и (2.4).

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется по выражению:

$$x_{тр} = \sqrt{z_{тр}^2 - r_{тр}^2} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном.тр}} \sqrt{\left(\frac{u_{КЗ}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном.тр}}\right)^2}\ . \qquad (2.5)$$

Параметры трансформаторов, широко применяемых в сетях 6(10)/0,4 кВ, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Активные и индуктивные сопротивления, мОм, трансформаторов 6(10)/0,4 кВ

Мощность трансформатора, кВ·А	$u_{КЗ}$, %	$x_{1тр} = x_{2тр}$	$x_{0тр}$	$r_{1тр} = r_{2тр}$	$r_{0тр}$	$z_{тр}^{(1)}/3$
Соединение обмоток Y/Y_0						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27
1000	8	12,6	72,8	2,0	19,1	33,6
1600	5,5	4,9	37,8	1,3	11,9	16,6
Соединение обмоток Δ/Y_0						
100	4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	27	27	10,7	10,7	30
400	4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1000	8	12,65	12,65	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7

Пример 2.2.

Определить сопротивления трехфазного трансформатора ТМ-25/6.

Решение.

По справочной литературе, например [4], определяем технические данные трансформатора: $S_{\text{ном}} = 25$ кВА; $U_{\text{ном.ВН}} = 6{,}3$ кВ; $U_{\text{ном.НН}} = 0{,}4$ кВ; $u_{\text{КЗ}} = 5{,}5$ %; $\Delta P_{\text{КЗ}} = 600$ Вт.

Полное сопротивление трансформатора составит

$$z_{\text{тр.ВН}} = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном.ВН}}}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{5{,}5 \cdot 6300^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^3} = 87{,}3 \text{ Ом},$$

если отнести его к стороне 6,3 кВ, или

$$z_{\text{тр.ВН}} = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном.ВН}}}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{5{,}5 \cdot 400^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^3} = 0{,}352 \text{ Ом},$$

для стороны низкого напряжения.

По выражению (2.4) рассчитываем активное сопротивление, приведенное к ВН и НН:

$$r_{\text{тр.ВН}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном.ВН}}}{S^2_{\text{ном}}} = \frac{600 \cdot 6300^2}{\left(25 \cdot 10^3\right)^2} = 38{,}1 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{тр.ВН}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном.ВН}}}{S^2_{\text{ном}}} = \frac{600 \cdot 400^2}{\left(25 \cdot 10^3\right)^2} = 0{,}154 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление определяется по соотношению (2.5):

$$x_{\text{тр.ВН}} = \sqrt{z^2_{\text{тр.ВН}} - r^2_{\text{тр.ВН}}} = \sqrt{87{,}3^2 - 38{,}1^2} = 78{,}55 \text{ Ом},$$

$$x_{\text{тр.НН}} = \sqrt{z^2_{\text{тр.НН}} - r^2_{\text{тр.НН}}} = \sqrt{0{,}352^2 - 0{,}154^2} = 0{,}316 \text{ Ом}.$$

Для регулирования напряжения трансформаторы имеют ответвления от обмоток. При регулировании коэффициента трансформации под нагрузкой (РПН) и при переключении без возбуждения (ПБВ) для любого положения переключателя ответвлений $z_{тр}$ можно определить по формуле:

$$z_{\text{тр}} = z_{\text{тр.ном}} \left(1 \pm \beta \cdot N\right)^2, \qquad (2.6)$$

где $z_{\text{тр.ном}}$ – сопротивление трансформатора, определенное по соотношению (2.3) для номинального напряжения;

N – количество ответвлений;

β – изменение напряжения при переводе переключателя в одно следующее положение, отн. ед.

Выражение (2.6) выводится из (2.3), если принять, что величина $u_{\text{КЗ}}$, выраженная в процентах номинального напряжения, сохраняется неизменной.

Пример 2.3.

Большинство трансформаторов в распределительных сетях имеет пределы регулирования ПБВ±2×2,5 %. Определить в каких пределах будет изменяться полное сопротивление этих трансформаторов.

Решение.

Сопротивление таких трансформаторов, определенное по выражению (2.6), будет изменяться в пределах:

$$z_{\text{тр}} = z_{\text{тр.ном}}\left(1 \pm \beta \cdot N\right)^2 = z_{\text{тр.ном}}\left(1 \pm 0{,}025 \cdot 2\right)^2 = z_{\text{тр.ном}}\left(0{,}95^2 \div 1{,}05^2\right) =$$
$$= z_{\text{тр.ном}}\left(0{,}903 \div 1{,}102\right).$$

Воздушные и кабельные линии. Активное и индуктивное сопротивления кабельных и воздушных линий электропередачи определяется по соотношениям:

$$X_{\text{КЛ,ВЛ}} = x_0 \cdot l; \quad R_{\text{КЛ,ВЛ}} = r_0 \cdot l \qquad (2.7)$$

где x_0 и r_0 –индуктивное и активное погонное сопротивление проводников, соответственно;

l – длина проводников.

Погонное индуктивное сопротивление воздушных линий электропередачи с проводами из цветных металлов зависит от среднего геометрического расстояния между проводами. Его значение приводится в справочной литературе (например [4]). Линии со стальными проводами применяют редко. Их погонные сопротивления зависят от конструкции провода и протекающего тока.

Пример 2.4.

Отдельно стоящая подстанция промышленного предприятия с трансформатором ТМ-630/6 запитана от ГПП кабелем СБ–(3×50) длиной 250 м, а от распредустройства низкого напряжения отходят две линии электропередачи. Первая, длиной 67 м, выполнена кабелем АНРГ–(4×95); вторая, длиной 500 м, – проводом АС-50, среднее геометрическое расстояние между проводами 800 мм. Определить сопротивления кабельных и воздушной линий электропередачи.

Решение.

Питающая линия напряжением 6 кВ выполнена кабелем с медными жилами сечением 50 мм^2. Значения погонных сопротивлений $r_0 = 0{,}37$ мОм/м, $x_0 = 0{,}0625$ мОм/м (табл. 6.13 [4]), а сопротивления всей линии:

$$X_{6\text{кВ}} = x_0 \cdot l = 0{,}0625 \cdot 250 = 15{,}63 \text{ мОм},$$
$$R_{6\text{кВ}} = r_0 \cdot l = 0{,}37 \cdot 250 = 92{,}50 \text{ мОм}.$$

Для воздушной линии электропередачи со сталеалюминиевыми проводами $r_0 = 0{,}65$ мОм/м (табл. 6.3 [4]), а $x_0 = 0{,}338$ мОм/м (табл. 6.2 [4]). Вся линия длиной 500 м имеет сопротивления:

$$X_{\text{ВЛ}} = x_0 \cdot l = 0{,}338 \cdot 500 = 169 \text{ мОм},$$
$$R_{\text{ВЛ}} = r_0 \cdot l = 0{,}65 \cdot 500 = 325 \text{ мОм}.$$

Кабель АНРГ–(4×95) с алюминиевыми жилами сечением 95 мм^2 имеет сопротивления:

$$X_{\text{КЛ}} = x_0 \cdot l = 0{,}081 \cdot 67 = 5{,}43 \text{ мОм},$$
$$R_{\text{КЛ}} = r_0 \cdot l = 0{,}329 \cdot 67 = 22{,}04 \text{ мОм}.$$

Его погонные сопротивления x_0 и r_0 определены по таблице 6.13 [4].

Шины и шинопроводы. Их сопротивления рассчитывают по соотношениям (2.7). Сопротивления шин и шинопроводов длиной 5 м и менее можно не учитывать, так как их влияние на ток КЗ невелико.

При известных расстояниях между прямоугольными шинами индуктивное сопротивление (мОм/м) можно определить по выражению:

$$x_0 = 0{,}1445 \lg \frac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h}, \qquad (2.8)$$

где $a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами, мм;

h – высота шины, мм.

Пример 2.5.

На цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ-630/6. К распределительному щиту 0,4 кВ трансформатор присоединен алюминиевыми шинами сечением 60×8 мм^2, расположенными горизонтально в одну линию с расстоянием между фазами 200 мм. Определить активное и индуктивное сопротивления шин, если расстояние до щита 0,4 кВ составляет 6 м. Как изменятся сопротивления шин при их вертикальном расположении и расстоянии между фазами 200 мм.

Решение.

По таблице 6.12 [4] погонное активное сопротивление составляет r_0 = 0,074 мОм/м, индуктивное рассчитываем по соотношению (2.8):

$$x_0 = 0{,}1445 \lg \frac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h} = 0{,}1445 \lg \frac{4 \cdot 0{,}264}{0{,}008} = 0{,}306 \text{ мОм/м},$$

где расстояние между шинами первой и второй фазы a_{12} = 200 мм, между второй и третьей a_{23} = 200 мм, между первой и третьей a_{13} = 200 + 60 + 200 = 460 мм, а среднегеометрическое расстояние:

$$a_{\text{ср}} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{200 \cdot 460 \cdot 200} = 264 \text{ мм} = 0{,}264 \text{ м}.$$

Сопротивление шин до щита 0,4 кВ:

$$X_{\text{Ш}} = x_0 \cdot l = 0{,}306 \cdot 6 = 1{,}839 \text{ мОм},$$
$$R_{\text{Ш}} = r_0 \cdot l = 0{,}074 \cdot 6 = 0{,}444 \text{ мОм}.$$

При вертикальном расположении шин активное сопротивление не изменится, а индуктивное составит:

$$x_0 = 0{,}1445 \lg \frac{4 \cdot a_{ср}}{h} = 0{,}1445 \lg \frac{4 \cdot 0{,}254}{0{,}060} = 0{,}178 \text{ мОм/м},$$

где расстояние между шинами первой и второй фазы $a_{12} = 200$ мм, между второй и третьей $a_{23} = 200$ мм, между первой и третьей $a_{13} = 200 + 8 + 200 = 408$ мм, а среднегеометрическое расстояние:

$$a_{ср} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{200 \cdot 408 \cdot 200} = 254 \text{ мм} = 0{,}254 \text{ м}.$$

$$X_{Ш} = x_0 \cdot l = 0{,}178 \cdot 6 = 1{,}068 \text{ мОм}.$$

При времени действия короткого замыкания более трех секунд увеличение сопротивления проводников за счет их разогрева r' учитывается по соотношению:

$$r' = r \cdot \left[1 + \frac{m \cdot t}{1 + 0{,}004\, \theta_0} \left(\frac{I_{КЗ}}{S} \right)^2 \right]. \qquad (2.9)$$

Здесь r – сопротивление проводников до КЗ при температуре θ_0, мОм;

m – численный коэффициент (для меди $m = 22$, для алюминия $m = 6$);

S – сечение проводника, мм^2;

$I_{КЗ}$ – ток КЗ из предварительного расчета без учета нагрева, кА;

t – время короткого замыкания, с.

Изменение активного сопротивления проводников при меньшей длительности КЗ определяется по кривым, приведенным в [8, раздел 6.10].

Реакторы. Реактор напряжением 0,4 кВ типа РТТ-0,38-50-0,14 имеет номинальные параметры: напряжение 380 В, ток 50 А, индуктивное сопротивление при частоте 50 Гц составляет 140 мОм, активное – для исполнения У3 (алюминиевая обмотка) 17 мОм, для исполнения Т3 (медная обмотка) 16 мОм.

Токоограничивающие реакторы устанавливают в линиях 6(10) кВ или в цепи трансформатора для ограничения токов КЗ до таких значений, которые позволили бы применить сравнительно легкую аппаратуру (выключатели, разъединители) и не завышать сечение кабелей в сети электроснабжения.

Сопротивление реактора (Ом) определяется, по соотношениям:

$$x_р = \omega L = 314 L; \qquad (2.10)$$

$$x_р = \frac{u_{КЗ} \cdot U_{ном}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{ном}}, \qquad (2.11)$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение реактора;

$I_{ном}$ – номинальный ток реактора;

$u_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания, %.

Активное сопротивление реакторов 6(10) кВ мало и в расчетах не учитывается.

Пример 2.6.

Определить сопротивление реактора по данным: $U = 6$ кВ, $I_{ном} = 600$ А, $u_{КЗ} = 6$ %.

Решение.

По выражению (2.11):

$$x_р = \frac{u_{КЗ} \cdot U_{ном}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{ном}} = \frac{6 \cdot 6000}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 600} = 0{,}346 \text{ Ом}.$$

Если вместо $u_{КЗ}$ задано $L = 0{,}11$ мГн, то по выражению (2.10):

$$x_р = \omega L = 314 \cdot 0{,}11 \cdot 10^{-3} = 0{,}346 \text{ Ом}.$$

Трансформаторы тока. Активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока принимают по справочным данным [4] или приложению 5 ГОСТ Р 50270–92 [9].

Автоматические выключатели, рубильники, переходные сопротивления. Сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, рубильников, а также переходные сопротивления контактов и контактных соединений (вставных контактов, болтовых соединений шин и др.) принимают по справочникам и каталогам [4, 9]. Приближенно сопротивление контактов рекомендуется учитывать следующим образом: 0,1 мОм – для контактных соединений кабелей; 0,01 мОм – для шинопроводов; 1,0 мОм – для коммутационных аппаратов.

При определении токов металлического короткого замыкания $I^{(3)}_{КЗ\,max}$ и $I^{(3)}_{КЗ\,min}$ переходное сопротивление в месте повреждения не учитывается.

Определение полного сопротивления участка сети. Полное сопротивление участка сети z является геометрической суммой активного r и индуктивного x сопротивлений. В схеме с последовательно включенными элементами при определении полного сопротивления до места КЗ необходимо отдельно определить суммарное активное сопротивление r_Σ, отдельно суммарное индуктивное x_Σ, а затем найти их геометрическую сумму:

$$z_\Sigma = \sqrt{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2}\,. \qquad (2.12)$$

Если определять z_i для каждого элемента сети $z_i = \sqrt{r_i^2 + x_i^2}$, а затем найти их арифметическую сумму, то величина полного сопротивления z_Σ будет завышенной, а ток короткого замыкания – заниженным.

Пример 2.7.

Определить полное сопротивление схемы, состоящей из трех последовательно включенных элементов цеховой сети. Для первого сопротивления $x_1 = 5$ мОм, $r_1 = 0$; для второго – $x_2 = 5$ мОм, $r_2 = 5$ мОм; для третьего – $x_3 = 0$, $r_3 = 5$ мОм.

Решение.

Правильное решение:

$$z_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{3} r_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{3} x_i\right)^2} = \sqrt{(0+5+5)^2 + (5+5+0)^2} = 14{,}2 \text{ мОм}$$

Неправильное решение:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5 \text{ мОм};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7{,}07 \text{ мОм};$$

$$z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2} = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5 \text{ мОм};$$

полное сопротивление:

$$z_{\Sigma} = z_1 + z_2 + z_3 = 5 + 7{,}07 + 5 = 17{,}07 \text{ мОм}$$

вместо 14,2 мОм.

В сетях встречается и параллельное включение двух или нескольких элементов. Эквивалентное сопротивление такой схемы определяется:

$$z_{эк} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} \cdot \sqrt{r_2^2 + x_2^2}}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}. \qquad (2.13)$$

Пример 2.8.

Определить полное сопротивление схемы из двух параллельно включенных элементов цеховой сети. Их сопротивления: $r_1 = 5$ мОм, $x_1 = 0$ и $r_2 = 0$, $x_2 = 5$ мОм.

Решение.

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} = \sqrt{5^2 + 0^2} = 5 \text{ мОм};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2} = \sqrt{0^2 + 5^2} = 5 \text{ мОм};$$

$$z_{эк} = \frac{z_1 \cdot z_2}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}} = \frac{5 \cdot 5}{\sqrt{(5+0)^2 + (0+5)^2}} = 3{,}54 \text{ мОм}.$$

Эквивалентные активные и реактивные сопротивления цепи, состоящей из двух параллельно включенных элементов, определяются по выражениям:

$$z_{эк} = \frac{r_2 \cdot z_1^2 + r_1 \cdot z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \frac{r_2\left(r_1^2 + x_1^2\right) + r_1\left(r_2^2 + x_2^2\right)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}; \qquad (2.14)$$

$$x_{эк} = \frac{x_2 \cdot z_1^2 + x_1 \cdot z_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2} = \frac{x_2\left(r_1^2 + x_1^2\right) + x_1\left(r_2^2 + x_2^2\right)}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}. \qquad (2.15)$$

Пример 2.9.

На цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ-630/6 ($u_{КЗ} = 5{,}5$ %; $\Delta P_{КЗ} = 7{,}6$ кВт). К распределительному щиту 0,4 кВ трансформатор присоединен алюминиевыми шинами сечением 60×8 мм^2, расположенными вертикально с расстоянием между фазами $a = 200$ мм (рис. 2.1). На вводе установлен автоматический выключатель. В цехе проложен магистральный шинопровод ШМА ($I_{ном} = 1250$ А), ответвление от него выполнено шинопроводом ШРА ($I_{ном} = 400$ А). В точке *К*1 присоединена группа электродвигателей *М*1 общей мощностью 200 кВт, $U_{ном} = 380$ В, $\eta = 0{,}94$, $\cos\varphi = 0{,}91$. На другом ответвлении от магистрального шинопровода присоединена вторая группа двигателей *М*2 мощностью 150 кВт, $U_{ном} = 380$ В, $\eta = 0{,}92$, $\cos\varphi = 0{,}84$. Определить активное и индуктивное сопротивление до точки короткого замыкания *К*1.

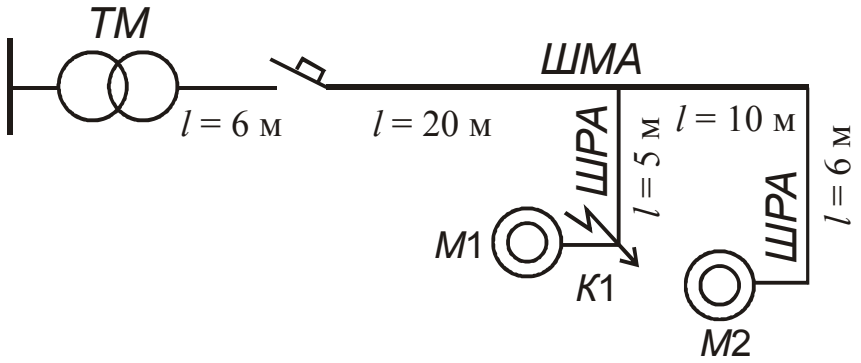


Рис. 2.1. Расчетная схема к примеру 2.9

Решение.

Принимаем, что напряжение на шинах 6 кВ цеховой подстанции неизменно. Сопротивление от источника питания до этих шин не учитываем. Расчет сопротивлений ведем в именованных единицах.

Сопротивление трансформатора по (2.4) и (2.5):

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном.тр}^2} = \frac{7{,}6 \cdot 400^2}{630^2} = 3{,}06 \text{ мОм};$$

$$x_{тр} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном.тр}} \sqrt{\left(\frac{u_{КЗ}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном.тр}}\right)^2} = \frac{400^2}{630} \sqrt{\left(\frac{5{,}5}{100}\right)^2 - \left(\frac{7{,}6}{630}\right)^2} = 13{,}63 \text{ мОм}.$$

Сопротивление токовой катушки автоматического выключателя по [4, табл. 6.16] $r_а = 0{,}10$ мОм, $x_а = 0{,}10$ мОм; переходное сопротивление контактов $r_к = 0{,}15$ мОм.

Сопротивление шин до распределительного щита 0,4 кВ определено в *примере 2.5* и составляет: $R_Ш = 0{,}444$ мОм, $X_Ш = 1{,}068$ мОм.

Сопротивление магистрального шинопровода ($r_0 = 0{,}034$ мОм/м, $x_0 = 0{,}016$ мОм/м по [4, табл. 6.16]):

$$X_{\text{ШМА}} = x_0 \cdot l = 0{,}016 \cdot 20 = 0{,}32 \text{ мОм},$$
$$R_{\text{ШМА}} = r_0 \cdot l = 0{,}034 \cdot 20 = 0{,}68 \text{ мОм}.$$

Сопротивление распределительного шинопровода ($r_0 = 0{,}15$ мОм/м, $x_0 = 0{,}17$ мОм/м по [4, табл. 6.16]):

$$X_{\text{ШРА}} = x_0 \cdot l = 0{,}17 \cdot 5 = 0{,}85 \text{ мОм},$$
$$R_{\text{ШРА}} = r_0 \cdot l = 0{,}15 \cdot 5 = 0{,}75 \text{ мОм}.$$

Результирующие сопротивления до точки КЗ:

$$R_{\text{рез}} = r_{\text{тр}} + r_{\text{а}} + r_{\text{к}} + R_{\text{Ш}} + R_{\text{ШМА}} + R_{\text{ШРА}} =$$
$$= 3{,}06 + 0{,}10 + 0{,}15 + 0{,}444 + 0{,}68 + 0{,}75 = 5{,}184 \text{ мОм};$$
$$X_{\text{рез}} = x_{\text{тр}} + x_{\text{а}} + X_{\text{Ш}} + X_{\text{ШМА}} + X_{\text{ШРА}} = 13{,}63 + 0{,}10 + 1{,}068 + 0{,}32 + 0{,}85 = 15{,}968 \text{ мОм}.$$

Учет электрической дуги. По рекомендациям [10] сопротивление дуги $r_д$ в месте КЗ определяется по соотношению:

$$r_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{I_{\text{КЗ}}} \tag{2.16}$$

где $U_{\text{д}}$ – падение напряжения на дуге:

$$U_{\text{д}} = E_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}} \tag{2.17}$$

$I_{\text{КЗ}}$ – ток КЗ в месте повреждения, рассчитанный без учета сопротивления дуги;

$E_{\text{д}} = 1{,}6$ В/мм [10] – напряженность в стволе дуги.

Длина электрической дуги $l_{\text{д}}$, мм, определяется в зависимости от расстояния a между фазами проводников в месте короткого замыкания [10]:

$$l_{\text{д}} = \begin{cases} 4a & \text{при } a < 5 \text{ мм}; \\ 20{,}4 \ln\frac{a}{2} \exp\left(0{,}15 r_{\Sigma} / x_{\Sigma}\right) & \text{при } a = (5 - 50) \text{ мм}; \\ a & \text{при } a > 50 \text{ мм}, \end{cases} \tag{2.18}$$

где r_{Σ} и x_{Σ} – суммарные активные и индуктивные сопротивления короткозамкнутой цепи без учета сопротивления дуги, мОм.

Ниже приведены расстояния a, мм, между фазами проводников [10]:

Трансформаторы, кВА:

400 60
630 60
1000 70
1600 120
2500 180

Шинопроводы:

ШМА 10
ШРА 15

Кабели сечением, мм^2:

2,5	1,6
16	2,4
50	2,8
120	4,0
240	4,8

Для расчета сопротивления электрической дуги при трехфазных токах КЗ по соотношению (2.16) ток короткого замыкания $I_{КЗ}$ принимается равным значению ударного тока КЗ:

$$i_{уд} = \kappa_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ПО}, \qquad (2.19)$$

определяющего динамическую стойкость аппаратов и токопроводов. В выражении (2.19) $\kappa_{уд}$ – коэффициент ударного тока КЗ.

Периодическая составляющая тока короткого замыкания $I_{ПО}$ вычисляется без учета $r_д$ по выражениям:

при $x_\Sigma > r_\Sigma$

$$I_{ПО} = \frac{U_{ном}}{0{,}69 r_\Sigma + 1{,}66 x_\Sigma}; \qquad (2.20)$$

при $x_\Sigma \le r_\Sigma$

$$I_{ПО} = \frac{U_{ном}}{1{,}66 r_\Sigma + 0{,}69 x_\Sigma}; \qquad (2.21)$$

где $U_{ном} = 400$ В – номинальное напряжение.

Для расчета сопротивления электрической дуги при однофазных КЗ по соотношению (2.16) ток $I_{КЗ}$ равен периодической составляющей однофазного тока КЗ $I^{(1)}_{ПО}$, что обеспечивает надежность срабатывания защитных аппаратов. Эта составляющая определяется без учета $r_д$:

при $x_{1\Sigma} > r_{1\Sigma}$

$$I^{(1)}_{ПО} = \frac{U_{ном}}{0{,}23 r_{1\Sigma} + 0{,}55 x_{1\Sigma}}; \qquad (2.22)$$

при $x_{1\Sigma} \le r_{1\Sigma}$

$$I^{(1)}_{ПО} = \frac{U_{ном}}{0{,}55 r_{1\Sigma} + 0{,}23 x_{1\Sigma}}; \qquad (2.23)$$

где $r_{1\Sigma}, x_{1\Sigma}$ – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности короткозамкнутой цепи.

Приведенная методика позволяет рассчитывать сопротивление дуги при коротком замыкании в любом месте цепи. Ориентировочно при трехфазных КЗ оно может быть принято 2–3 мОм, а при однофазных – 5–6 мОм.

При определении минимального тока КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения $I^{(3)}_{\text{КЗ}\,R}$ в схему замещения вводится активное сопротивление $R_{\text{пер}} = 15$ мОм, учитывающее совокупно все переходные сопротивления (рубильников, автоматов, вставных контактов, болтовых соединений) и сопротивление электрической дуги в месте повреждения. Значение $R_{\text{пер}} = 15$ мОм можно принимать одинаковым для любой точки сети 0,4 кВ, так как по мере удаления от трансформатора существенно увеличиваются сопротивления остальных элементов цепи КЗ и влияние переходных сопротивлений на ток КЗ быстро уменьшается, их более точный учет уже не имеет практического смысла.

Влияние токоограничивающего действия дуги в месте КЗ можно не учитывать:

- при выборе аппаратуры – если мощность трансформатора менее 400 кВА;
- при проверке чувствительности защит – если мощность трансформатора менее 250 кВА.

При мощности понижающих трансформаторов, равной или больше указанной, влиянием сопротивления дуги в месте КЗ можно пренебречь при большом сопротивлении питающей энергосистемы:

- при выборе аппаратуры – если отношение $x_{\text{с}}/x_{\text{тр}}$ находится в области А или Б (рис. 2.2);
- при проверке чувствительности защит – если отношение $x_{\text{с}}/x_{\text{тр}}$ находится в области А (рис. 2.2).

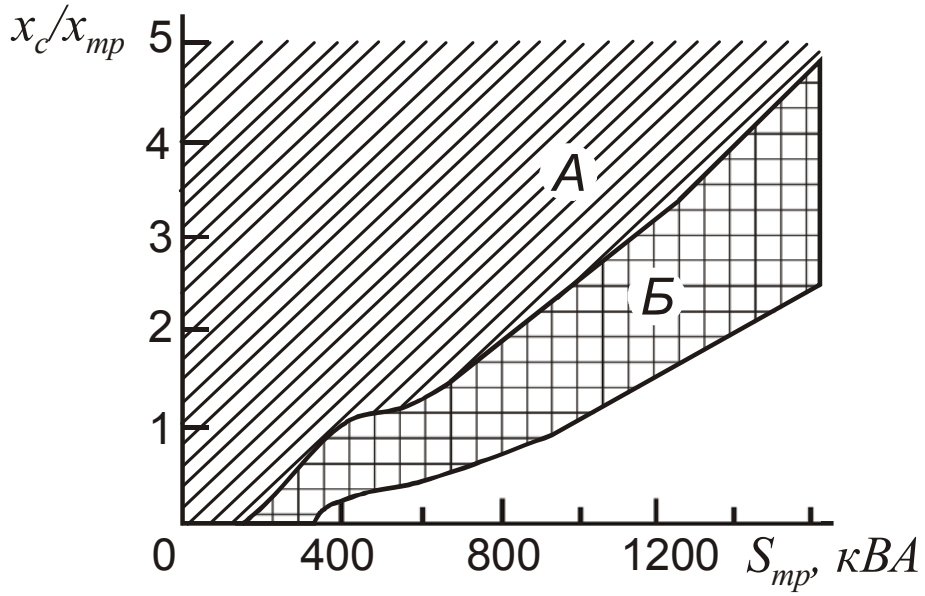


Рис. 2.2. Области, в которых можно не учитывать токоограничивающее действие дуги

Например, для трансформатора мощностью 1000 кВА влиянием токоограничивающего действия дуги можно пренебречь при выборе аппаратуры, если $x_c / x_{тр} \geq 1{,}2$, при оценке чувствительности защит, если $x_c / x_{тр} \geq 2{,}5$.

2.3. Приведение сопротивлений к расчетному напряжению

Отдельные участки сетей связаны между собой трансформаторами. При составлении схемы замещения все сопротивления, находящиеся на разных сторонах трансформатора, необходимо привести к одному расчетному напряжению. В сети с несколькими последовательно включенными трансформаторами приведение производится при переходе через каждый трансформатор. Если дана схема (рис. 2.3) и требуется всю ее привести, например, к генераторному напряжению, то приведение выполняется следующим образом:

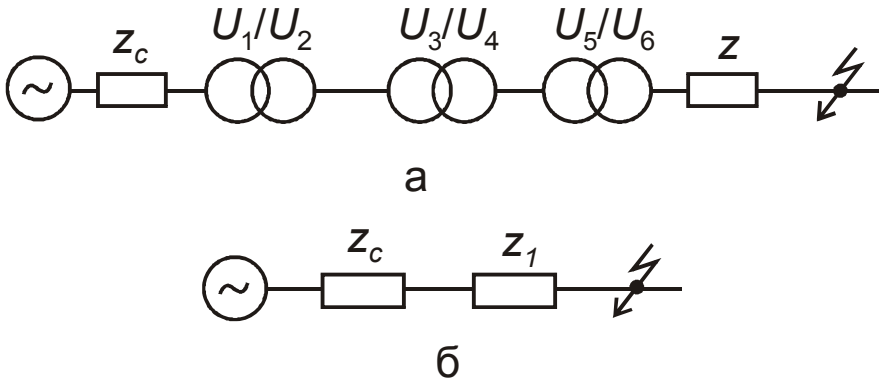


Рис. 2.3. Схемы приведения к расчетному напряжению при нескольких трансформаторах: а – исходная; б – расчетная

- сопротивление z приводится к напряжению U_5:

$$z_5 = z\left(\frac{U_5}{U_6}\right)^2;$$

- приведенное к напряжению U_5 сопротивление приводится к напряжению U_3:

$$z_3 = z_5\left(\frac{U_3}{U_4}\right)^2 = z\left(\frac{U_5}{U_6}\right)^2 \cdot \left(\frac{U_3}{U_4}\right)^2;$$

- приведенное к напряжению U_3 сопротивление приводится к напряжению U_1:

$$z_1 = z_3\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = z\left(\frac{U_5}{U_6} \cdot \frac{U_3}{U_4} \cdot \frac{U_1}{U_2}\right)^2. \qquad (2.24)$$

Промежуточные значения (z_3, z_5) можно не выполнять, а сразу использовать уравнение (2.24).

Схема замещения примет вид схемы, приведенной на рис. 2.3, б. Сопротивление самих трансформаторов и линий между ними в данном случае для упрощения не учитывается.

Приведение сопротивлений к расчетному напряжению может выполняться приближенно или точно. В приближенном способе, когда действительные данные трансформаторов не известны, пользуются средними номинальными напряжениями каждой ступени: 0,4; 0,525; 6,3; 10,5; 37; 115 кВ. В этом случае вычисления упрощаются. Так, в уравнении (2.24) $U_3 = U_2$, $U_5 = U_4$ и уравнение принимает вид:

$$z_1 = z\left(\frac{U_1}{U_6}\right)^2 . \qquad (2.25)$$

При расчетах действительных сетей при приведении сопротивлений необходимо пользоваться номинальными напряжениями холостого хода трансформаторов и уравнением (2.24), а не (2.25).

Пример 2.10.

Привести к генераторному напряжению сопротивление z в схеме на рис. 2.3. Коэффициенты трансформации трансформаторов: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{10,5}{38,5}$; $\frac{U_3}{U_4} = \frac{35}{6,6}$; $\frac{U_5}{U_6} = \frac{6}{0,4}$.

Решение.

Приближенное приведение по уравнению (2.25):

$$z_1 = z\left(\frac{U_1}{U_6}\right)^2 = z\left(\frac{10,5}{0,4}\right)^2 = 690z .$$

Точное приведение по уравнению (2.24):

$$z_1 = z\left(\frac{U_5}{U_6}\cdot\frac{U_3}{U_4}\cdot\frac{U_1}{U_2}\right)^2 = z\left(\frac{6}{0,4}\cdot\frac{35}{6,6}\cdot\frac{10,5}{38,5}\right)^2 = 465z .$$

Ошибка при расчете тока короткого замыкания за сопротивление z_1, определенным по уравнению (2.25), будет очень велика.

Токи КЗ, определенные для всей сети при одном расчетном напряжении, пересчитываются на те напряжения, где рассматривается установка защит или выбор оборудования. Пересчет выполняется по соотношениям:

$$I_1 = I_2\frac{U_2}{U_1}; \quad I_2 = I_1\frac{U_1}{U_2}, \qquad (2.26)$$

где U_1 и U_2 – напряжения холостого хода трансформаторов;

I_1 и I_2 – токи КЗ на стороне с напряжение U_1 и U_2, соответственно.

Пример 2.11.

В схеме на рис. 2.3 ток КЗ за сопротивлением z_1 определен при расчетном напряжении $U_1 = 11$ кВ. Определить действительные токи при напряжениях $U_2 = U_3$, $U_4 = U_5$, U_6. Коэффициенты трансформации указаны в примере 2.10. Сопротивления генератора и линий не учитывать ($z_c = 0$). Величина $z_1 = 465$ Ом.

Решение.

При генераторном напряжении 11 кВ ток короткого замыкания равен:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z_1} = \frac{11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 465} = 13{,}7 \text{ А}.$$

Приведенный ток КЗ составит:

- на стороне $U_2 = U_3$: $I_{\text{КЗ, пр1}}^{(3)} = I_{\text{КЗ}}^{(3)} \frac{U_1}{U_2} = 13{,}7 \frac{10{,}5}{38{,}5} = 3{,}75$ А;
- на стороне $U_4 = U_5$: $I_{\text{КЗ, пр2}}^{(3)} = I_{\text{КЗ, пр1}}^{(3)} \frac{U_3}{U_4} = 3{,}75 \frac{35}{6{,}6} = 19{,}8$ А;
- на стороне U_6: $I_{\text{КЗ, пр3}}^{(3)} = I_{\text{КЗ, пр2}}^{(3)} \frac{U_5}{U_6} = 19{,}8 \frac{6}{0{,}4} = 298$ А.

Если пользоваться средними номинальными напряжениями (см. пример 2.10), то ток КЗ будет равен:

- на генераторном напряжении:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z_1} = \frac{10{,}5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 8{,}85 \text{ А}.$$

- на стороне 0,4 кВ:

$$I_{\text{КЗ, пр3}}^{(3)} = I_{\text{КЗ}}^{(3)} \frac{U_1}{U_6} = 8{,}85 \frac{10{,}5}{0{,}4} = 230 \text{ А}.$$

В примерах 2.10 и 2.11 не учтены сопротивления трансформаторов и линий между ними. В реальных расчетах эти сопротивления суммируются с сопротивлением z, токи КЗ будут меньше, уменьшится и разница между сопротивлениями, определенными по соотношениям (2.24) и (2.25).

При приведении токов и сопротивлений к разным напряжениям можно пользоваться простым правилом: *при увеличении напряжения сопротивления увеличиваются, токи уменьшаются; при уменьшении напряжения сопротивления уменьшаются, токи увеличиваются.*

2.4. Расчет токов междуфазного короткого замыкания при питании от энергосистемы

2.4.1. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания

Ток трехфазного металлического КЗ определяется по выражению:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2}} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot z_{\Sigma}}, \qquad (2.27)$$

где $U_{\text{ср.н}}$ – среднее номинальное линейное напряжение сети (для сетей 0,38 кВ равно 400 В),

r_{Σ} и x_{Σ} – результирующее активное и индуктивное сопротивления (прямой последовательности) цепи короткого замыкания;

z_{Σ} – результирующее полное сопротивление цепи короткого замыкания.

При определении $I_{\text{КЗ}\,\max}^{(3)}$ в r_{Σ} и x_{Σ} входят сопротивления питающей энергосистемы в максимальном режиме, а при определении $I_{\text{КЗ}\,\min}^{(3)}$ – в минимальном.

При двухфазном КЗ поврежденная цепь питается линейным напряжением, а полное сопротивление цепи состоит из последовательно включенных сопротивлений двух фаз. Минимальный ток металлического двухфазного КЗ равен:

$$I_{\text{КЗ}\,\min}^{(2)} = 0{,}867\, I_{\text{КЗ}\,\min}^{(3)}, \qquad (2.28)$$

Минимальный ток трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения практически не зависит от режима работы питающей системы и определяется:

$$I_{\text{КЗ}\,R}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(r_{\Sigma} + R_{\text{пер}}\right)^2 + x_{\Sigma}^2}}, \qquad (2.29)$$

где r_{Σ} и x_{Σ} – результирующее активное и индуктивное сопротивления (прямой последовательности) цепи КЗ без учета переходных сопротивлений рубильников, выключателей, вставных контактов, болтовых соединений;

$R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление, учитывающее сопротивление дуги и перечисленных выше элементов.

Соответствующий ток двухфазного короткого замыкания:

$$I_{\text{КЗ}\,R}^{(2)} = 0{,}867\, I_{\text{КЗ}\,R}^{(3)}. \qquad (2.30)$$

Среднее значение (наиболее вероятное) тока трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения для любого расчетного случая (любой мощности питающее системы, трансформатора, удаленности точки КЗ) определяется:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ ср}} = \kappa_{\text{н}} \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ max}} + I^{(3)}_{\text{КЗ }R}}{2}, \qquad (2.31)$$

где $\kappa_{\text{н}}$ – коэффициент надежности, принимается равным 1,05–1,1 при токах металлического КЗ более 40 кА и 1,0 – в остальных случаях.

Значения токов, получаемых по (2.31), совпадают с результатами экспериментальных исследований наиболее вероятных токов КЗ в электроустановках до 1000 В.

2.4.2. Определение ударных токов короткого замыкания

Ударный ток КЗ определяется по выражению:

$$i_{\text{уд}} = \kappa_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}, \qquad (2.32)$$

где $\kappa_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент;

$I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$ – расчетный ток трехфазного КЗ.

При расчетах по металлическим коротким замыканиям $I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$ принимается равным $I^{(3)}_{\text{КЗ max}}$, а при расчетах с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения – $I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}$.

В точных расчетах ударных токов металлического КЗ значения $\kappa_{\text{уд}}$ определяется по отношению результирующих сопротивлений цепи короткого замыкания x_Σ / r_Σ:

x_Σ / r_Σ	0,5	0,8	1,0	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
$\kappa_{\text{уд}}$	1,0	1,02	1,05	1,12	1,20	1,35	1,46	1,53	1,59	1,63	1,67	1,71

При приближенном определении $i_{\text{уд}}$ на шинах КТП за трансформаторами мощностью 400 кВА и более принимают:

- для металлического КЗ – наибольшее возможное значение ударного коэффициента $\kappa_{\text{уд}} = 1{,}5$, при этом $i_{\text{уд}} = 2{,}12\, I^{(3)}_{\text{КЗ max}}$;
- для КЗ через переходные сопротивления $\kappa_{\text{уд}} = 1{,}3$, при этом $i_{\text{уд}} = 1{,}83\, I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}$.

Для КЗ на вторичных сборках, где существенно влияние кабелей, $\kappa_{\text{уд}} = 1{,}1$, при этом $i_{\text{уд}} = 1{,}5\, I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$.

2.4.3. Влияние электродвигателей на токи короткого замыкания

Асинхронные двигатели учитываются в том случае, если они непосредственно подключены к месту КЗ (короткими ответвлениями 3–5 м). Методика расчета периодической составляющей и ударного тока приведена в [4].

Влияние асинхронных двигателей на токи КЗ не учитывается, если ток от них поступает к месту КЗ через те элементы, через которые протекает основной ток КЗ от сети и которые имеют существенное сопротивление. Для сети 0,4 кВ такими элементами являются кабели и переходные сопротивления в месте КЗ. Поэтому подпитку от электродвигателей следует учитывать только при выборе аппаратуры на основном щите КТП и не следует учитывать при выборе аппаратуры на сборках 0,4 кВ.

Периодическую составляющую тока подпитки от электродвигателей можно определить, рассматривая нагрузку трансформатора как обобщенную с параметрами: эквивалентная сверхпереходная э.д.с. $E''_* = 0{,}8$, эквивалентное сопротивление $x''_* = 0{,}35$:

$$I''_{\text{дв}} = \frac{E''_*}{x''_*} I_{\text{ном.тр}} = 2{,}29 I_{\text{ном.тр}}. \qquad (2.33)$$

Суммарный ток в месте КЗ с учетом подпитки от электродвигателей:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,\Sigma} = I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} + 2{,}29 I_{\text{ном.тр}}, \qquad (2.34)$$

где $I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$ – расчетный ток КЗ от трансформатора, для металлического КЗ равен $I^{(3)}_{\text{КЗ max}}$, для КЗ через переходные сопротивления – $I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}$.

Ударный ток КЗ от электродвигателей:

$$i_{\text{уд.ЭД}} = \kappa_{\text{уд.ЭД}} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{\text{дв}} = 3{,}22 \cdot I_{\text{ном.тр}}, \qquad (2.35)$$

где $\kappa_{\text{уд.ЭД}}$ – ударный коэффициент тока КЗ от электродвигателей, принимается равным единице из-за быстрого затухания апериодической составляющей.

Суммарный ударный ток КЗ с учетом подпитки от электродвигателей:

$$i_{\text{уд}\,\Sigma} = i_{\text{уд}} + 3{,}22 \cdot I_{\text{ном.тр}}. \qquad (2.36)$$

2.4.4. Тепловой импульс тока короткого замыкания

Определяется в месте установки выключателя по выражению:

$$B_{\text{КЗ}} = \left(I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}\right)^2 \cdot \left(t_{\text{откл}} + T_{\text{а.ср}}\right) + 1{,}5\left(I''_{\text{дв}}\right)^2 \cdot T_{\text{а.ср}} + 4I''_{\text{дв}} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} \cdot T_{\text{а.ср}}, \qquad (2.37)$$

где $t_{\text{отк}} = t_{\text{с.о}} + t_{\text{а}}$ – время отключения короткого замыкания; $t_{\text{с.о}}$ – выдержка времени срабатывания отсечки селективного автомата, для автоматов отходящих линий обычно принимают минимальные установки по времени; $t_{\text{а}}$ – время гашения дуги, для автоматических выключателей серии «Электрон» оно равно 0,06 с, для А3700 – 0,01 с; $T_{\text{а.ср}}$ – усредненное время затухания свободной составляющей тока КЗ, принимается 0,03 с; $I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$ – расчетный ток КЗ, для металлического короткого замыкания равен $I^{(3)}_{\text{КЗ max}}$, для КЗ через переходные сопротивления – $I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}$.

Пример 2.12.

Комплектная трансформаторная подстанция с трансформатором мощностью 1000 кВА, напряжением 6,3/0,4 кВ и $u_{\text{КЗ}} = 5{,}5$ % питается от энергосистемы. Ток КЗ со стороны энергосистемы на зажимах 6,3 кВ трансформатора составляет в максимальном режиме 17 кА, в минимальном – 10 кА. Определить параметры для выбора автоматических выключателей отходящих от КТП линий, а также минимальный ток двухфазного КЗ на шинах 0,4 кВ КТП и в конце отходящей кабельной линии с алюминиевыми жилами сечением 3×120 мм^2 длиной 100 м.

Решение.

1. Расчет при металлическом КЗ в максимальном режиме работы питающей энергосистемы.

Сопротивление питающей энергосистемы, приведенное к напряжению 0,4 кВ по соотношениям (2.1) и (2.2), составляет:

$$x_{\text{с.НН}} = x_{\text{с.ВН}}\left(\frac{U_{\text{ном.тр.НН}}}{U_{\text{ном.тр.ВН}}}\right)^2 = \frac{U_{\text{с.ВН}}}{\sqrt{3}\cdot I^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}}\left(\frac{U_{\text{ном.тр.НН}}}{U_{\text{ном.тр.ВН}}}\right)^2 = \frac{6{,}3\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 17\cdot 10^3}\left(\frac{0{,}4\cdot 10^3}{6{,}3\cdot 10^3}\right)^2 =$$

$= 0{,}86\cdot 10^{-3}$ Ом $= 0{,}86$ мОм.

Сопротивления трансформатора по таблице 2.1: $x_{\text{тр}} = 8{,}5$ мОм, $r_{\text{тр}} = 2$ мОм.

Максимальный ток металлического трехфазного КЗ на шинах 0,4 кВ определяется по (2.27) и составляет:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ max}} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{(0{,}86+8{,}5)^2 + 2^2}} = 24\ \text{кА}.$$

Периодическая составляющая тока подпитки от электродвигателей:

$$I''_{\text{дв}} = 2{,}29 I_{\text{ном.тр}} = 2{,}29\frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3}\cdot U_{\text{ном}}} = 2{,}29\frac{1000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 3{,}3\ \text{кА}.$$

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры (с учетом подпитки от электродвигателей):

$$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,\Sigma} = I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} + I''_{\text{дв}} = 24 + 3{,}3 = 27{,}3\ \text{кА}.$$

Отношение результирующих сопротивлений от шин 0,4 кВ:

$$\frac{x_\Sigma}{r_\Sigma} = \frac{x_{\text{с.НН}} + x_{\text{тр}}}{r_{\text{тр}}} = \frac{0{,}86 + 8{,}5}{2} = 4{,}67\,.$$

С учетом этого отношения определяем ударный коэффициент тока короткого замыкания $\kappa_{\text{уд}} = 1{,}5$, а ударный ток от системы составит:

$$i_{\text{уд}} = \kappa_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ max}} = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot 24 = 50{,}9\ \text{кА}.$$

Суммарный ударный ток с учетом подпитки от двигателей:

$$i_{\text{уд}\,\Sigma} = i_{\text{уд}} + 3{,}22 \cdot I_{\text{ном.тр}} = i_{\text{уд}} + 3{,}22\frac{S_{\text{ном.тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = 50{,}9 + 3{,}22\frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 55{,}5\ \text{кА}.$$

Тепловой импульс тока КЗ для автоматов серии «Электрон» при выдержке времени срабатывания отсечки $t_{\text{с.о}} = 0{,}25$ с:

$$B_{\text{КЗ}} = \left(I^{(3)}_{\text{КЗ max}}\right)^2 \cdot \left(t_{\text{с.о}} + t_{\text{а}} + T_{\text{а.ср}}\right) + 1{,}5\left(I''_{\text{дв}}\right)^2 \cdot T_{\text{а.ср}} + 4I''_{\text{дв}} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ max}} \cdot T_{\text{а.ср}} =$$

$$= 24^2\left(0{,}25 + 0{,}06 + 0{,}03\right) + 1{,}5 \cdot 3{,}3^2 \cdot 0{,}03 + 4 \cdot 3{,}3 \cdot 24 \cdot 0{,}03 = 206\ \text{кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Аналогично для выключателей А3700 при $t_{\text{с.о}} = 0{,}1$ с имеем $B_{\text{КЗ}} = 90{,}6\ \text{кА}^2 \cdot \text{с}$.

2. Расчет при двухфазном металлическом КЗ в минимальном режиме работы питающей энергосистемы.

Сопротивление питающей энергосистемы:

$$x_{\text{с.НН}} = x_{\text{с.ВН}}\left(\frac{U_{\text{ном.тр.НН}}}{U_{\text{ном.тр.ВН}}}\right)^2 = \frac{U_{\text{с.ВН}}}{\sqrt{3} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ ВН}}}\left(\frac{U_{\text{ном.тр.НН}}}{U_{\text{ном.тр.ВН}}}\right)^2 = \frac{6{,}3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3}\left(\frac{0{,}4 \cdot 10^3}{6{,}3 \cdot 10^3}\right)^2 =$$

$$= 1{,}47 \cdot 10^{-3}\ \text{Ом} = 1{,}47\ \text{мОм}.$$

При КЗ на шинах 0,4 кВ:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ min}} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(1{,}47 + 8{,}5\right)^2 + 2^2}} = 22{,}7\ \text{кА},$$

$$I^{(2)}_{\text{КЗ min}} = 0{,}867\ I^{(3)}_{\text{КЗ min}} = 0{,}867 \cdot 22{,}7 = 19{,}7\ \text{кА}.$$

Сопротивления кабелей линии:

$$x_{\text{каб}} = x_0 \cdot l = 0{,}057 \cdot 100 = 5{,}7\ \text{мОм};$$

$$r_{\text{каб}} = r_0 \cdot l = 0{,}32 \cdot 100 = 32\ \text{мОм}.$$

При КЗ в конце кабеля:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ min}} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(1{,}47 + 8{,}5 + 5{,}7\right)^2 + \left(2 + 32\right)^2}} = 6{,}2\ \text{кА};$$

$$I^{(2)}_{\text{КЗ min}} = 0{,}867\ I^{(3)}_{\text{КЗ min}} = 0{,}867 \cdot 6{,}2 = 5{,}38\ \text{кА}.$$

3. Расчет с учетом токоограничивающего действия дуги в месте короткого замыкания.

Ток КЗ на шинах 0,4 кВ с учетом $R_{\text{пер}} = 15$ мОм в максимальном режиме работы питающей системы:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,R} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{(0{,}86+8{,}5)^2 + (2+15)^2}} = 12\,\text{кА}.$$

Среднее значение тока короткого замыкания:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ ср}} = \frac{I^{(3)}_{\text{КЗ max}} + I^{(3)}_{\text{КЗ}\,R}}{2} = \frac{24+12}{2} = 18\,\text{кА}.$$

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры с учетом токоограничивающего действия электрической дуги и подпитки от двигателей:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,\Sigma} = I^{(3)}_{\text{КЗ ср}} + I''_{\text{дв}} = 18 + 3{,}3 = 21{,}3\,\text{кА}.$$

Ударный ток с учетом подпитки от двигателей:

$$i_{\text{уд}\,\Sigma} = \kappa_{\text{уд}}\cdot\sqrt{2}\cdot I^{(3)}_{\text{КЗ ср}} + 3{,}22\cdot I_{\text{ном.тр}} = 1{,}3\cdot\sqrt{2}\cdot 18 + 3{,}22\frac{1000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 37{,}6\ \text{кА}.$$

Тепловой импульс тока КЗ для автоматов серии «Электрон» ($t_{\text{с.о}} = 0{,}25$ с):

$$B_{\text{КЗ}} = \left(I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}\right)^2\cdot\left(t_{\text{с.о}} + t_{\text{а}} + T_{\text{а.ср}}\right) + 1{,}5\left(I''_{\text{дв}}\right)^2\cdot T_{\text{а.ср}} + 4I''_{\text{дв}}\cdot I^{(3)}_{\text{КЗ ср}}\cdot T_{\text{а.ср}} =$$

$$= 18^2\left(0{,}25 + 0{,}06 + 0{,}03\right) + 1{,}5\cdot 3{,}3^2\cdot 0{,}03 + 4\cdot 3{,}3\cdot 18\cdot 0{,}03 = 117{,}8\ \text{кА}^2\cdot\text{с}.$$

Аналогично для автоматов А3700 ($t_{\text{с.о}} = 0{,}1$ с) $B_{\text{КЗ}} = 53$ кА^2·с.

4. Расчет токов при двухфазном КЗ через переходные сопротивления в минимальном режиме питающей энергосистемы.

При коротком замыкании на шинах 0,4 кВ:

$$I^{(3)}_{КЗ\,R} = \frac{U_{ср.Н}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{(1{,}47+8{,}5)^2 + (2+15)^2}} = 11{,}7\,\text{кА};$$

$$I^{(2)}_{КЗ\,R} = 0{,}867\cdot I^{(3)}_{КЗ\,R} = 0{,}867\cdot 11{,}7 = 10{,}1\,\text{кА}.$$

При КЗ за кабелем:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ}\,R} = \frac{U_{\text{ср.Н}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{(1{,}47+8{,}5+5{,}7)^2 + (2+15+32)^2}} = 4{,}5\,\text{кА};$$

$$I^{(2)}_{\text{КЗ}\,R} = 0{,}867\cdot I^{(3)}_{\text{КЗ}\,R} = 0{,}867\cdot 4{,}5 = 3{,}9\,\text{кА}.$$

2.4.5. Распределение тока короткого замыкания по параллельно включенным элементам сети

В общем случае сопротивления элементов различны и различно отношение *r/x* для каждого из них. Если известен полный ток I, проводящий по эквивалентному сопротивлению $z_{эк}$, состоящему из двух параллельно включенных элементов с сопротивлением x_1, r_1, z_1 и x_2, r_2, z_2, причем $r_1/x_1 \neq r_2/x_2$, то токи, проходящие по каждому элементу, определяются:

$$I_1 = I \cdot \frac{\sqrt{x_2^2 + r_2^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}; \qquad (2.38)$$

$$I_2 = I \cdot \frac{\sqrt{x_1^2 + r_1^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}. \qquad (2.39)$$

Пример 2.13.

Определить токи, проходящие через элементы цеховой сети из примера 2.8, если полный ток I равен 100 А.

Решение.

$$I_1 = I_2 = I \cdot \frac{\sqrt{x_2^2 + r_2^2}}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{5^2 + 0^2}}{\sqrt{(0+5)^2 + (5+0)^2}} = 70{,}5 \text{ А}.$$

Токи I_1 и I_2 в данном примере сдвинуты между собой по фазе на 90°, полный ток является их геометрической суммой и равен:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{70{,}5^2 + 70{,}5^2} = 100 \text{ А}.$$

Если отношение r/x для всех параллельно включенных элементов равно, то выражения (2.38) и (2.39) упрощаются:

$$I_1 = I \cdot \frac{z_2}{z_1 + z_2}; \quad I_2 = I \cdot \frac{z_1}{z_1 + z_2}. \qquad (2.40)$$

Ток, проходящий по параллельно включенным линиям разной длины, но одинаковой конструкции, имеющим равные значения погонных сопротивлений (r_0, x_0, z_0), определяется:

$$I_1 = I \cdot \frac{l_2 z_0}{(l_1 + l_2) z_0}; \quad I_2 = I \cdot \frac{l_1 z_0}{(l_1 + l_2) z_0} \qquad (2.41)$$

или, сократив z_0:

$$I_1 = I \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}; \quad I_2 = I \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}. \qquad (2.42)$$

Рассмотрим, как распределяются токи по параллельным линиям при перемещении места короткого замыкания на одной из них.

Обычно параллельные линии имеют одинаковую длину l и одинаковые сопротивления $r_л$, $x_л$, $z_л$. Схема замещения при одностороннем питании приведена на рис. 2.4.

Примем длину линий $l = 1$. Если короткое замыкание произойдет на расстоянии d от шин подстанции A, то сопротивления параллельно включенных участков линий будут равны $d \cdot z_л$ и $(2 \cdot l - d) z_л$. Величина d берется в долях единицы. Эквивалентное сопротивление двух участков линий при $l = 1$ будет равно:

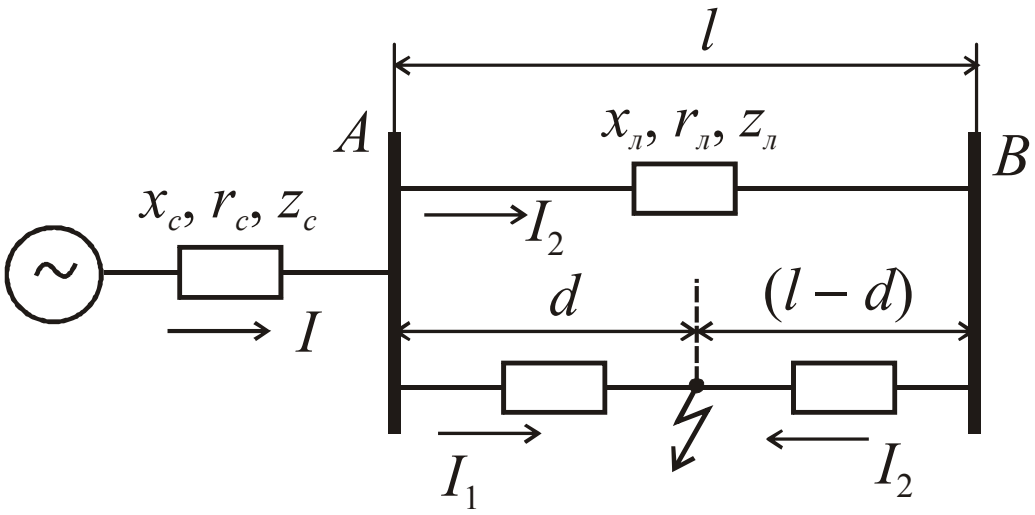


Рис. 2.4. К расчету распределения токов в параллельных линиях

$$z_{эк} = \frac{d \cdot z_л \cdot (2-d) \cdot z_л}{d \cdot z_л + (2-d) \cdot z_л} = z_л \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = z_л \cdot k. \qquad (2.43)$$

Аналогично для активного и индуктивного сопротивлений:

$$r_{эк} = r_л \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = r_л \cdot k; \quad x_{эк} = x_л \left(d - \frac{d^2}{2} \right) = x_л \cdot k. \qquad (2.44)$$

Ток короткого замыкания в любой точке линии будет равен:

$$I^{(3)}_{КЗ\,расч} = \frac{U_{ср.\,Н}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(x_с + k \cdot x_л)^2 + (r_с + k \cdot r_л)^2}}, \qquad (2.45)$$

а токи I_1 и I_2, протекающие к месту КЗ, определятся по соотношению (2.40). Так как величины z_1 и z_2 в выражении (2.40) пропорциональны d и $(2 - d)$, то отношения $\frac{z_2}{z_1 + z_2}$ и $\frac{z_1}{z_1 + z_2}$ можно заменить отношениями:

$$k_1 = \frac{2-d}{2} = 1 - \frac{d}{2} \quad \text{и} \quad k_2 = \frac{d}{2}. \qquad (2.46)$$

Пользуясь коэффициентами (2.46), токи для любого значения d можно определить:

$$I_1 = k_1 \cdot I; \quad I_2 = k_2 \cdot I. \qquad (2.47)$$

Пример 2.14.

Построить кривые токов короткого замыкания, проходящих по линиям, для схемы на рис. 2.4. Сопротивление $x_с = 4{,}6$ мОм, $r_с = 0{,}285$ мОм; $x_л = 1{,}9$ мОм, $r_л = 6{,}4$ мОм. Расчетное напряжение 0,4 кВ.

Решение.

Определяем величины k уравнения (2.44), подставляем значения $k \cdot x_л$ и $k \cdot r_л$ в выражение (2.45). Для каждого значения d определяем величину полного тока $I_{КЗ}^{(3)}$. С использованием коэффициентов k_1 и k_2 (уравнения (2.46) по соотношениям (2.47) определяются токи I_1 и I_2. Результаты расчета заносятся в таблицу 2.2, а по ним строятся кривые на рис. 2.5.

Таблица 2.2

Токи при коротком замыкании на параллельных линиях

Параметры расчета	Численные значения				
d	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$k = d - \frac{d^2}{2}$	0	0,219	0,375	0,468	0,5
$k_1 = 1 - \frac{d}{2}$	1	0,875	0,750	0,625	0,5
$k_2 = d/2$	0	0,125	0,250	0,375	0,5
$I_{КЗ}^{(3)}$, кА	50,10	43,64	38,80	36,11	35,24
I_1, кА	50,10	38,18	29,10	22,57	17,62
I_2, кА	0	5,46	9,70	13,54	17,62

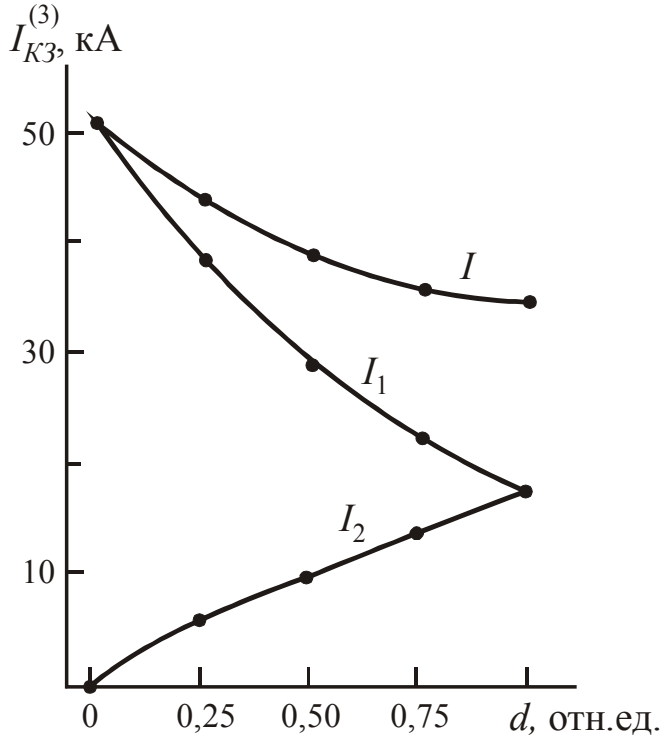


Рис. 2.5. Кривые распределения токов при коротком замыкании на параллельных линиях

2.4.6. Расчет напряжений при коротких замыканиях

Для сети с односторонним питанием междуфазные напряжения при трехфазном коротком замыкании равны:

$$U^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} \cdot z, \qquad (2.48)$$

где z – сопротивление от точки КЗ до места установки защиты.

При духфазном коротком замыкании выражение принимает вид:

$$U^{(2)} = 2 \cdot I^{(2)}_{\text{КЗ расч}} \cdot z. \qquad (2.49)$$

В выражении (2.49) $U^{(2)}$ – междуфазное напряжение между поврежденными фазами. Напряжения между здоровой и поврежденными фазами всегда будет больше $U^{(2)}$ и никогда не снижаются ниже 0,867 нормального напряжения.

Подставив в соотношение (2.49) $I^{(2)}_{\text{КЗ расч}} = \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}_{\text{КЗ расч}}$, определим, что:

$$U^{(2)} = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} \cdot z = \sqrt{3} \cdot I^{(3)}_{\text{КЗ расч}} \cdot z = U^{(3)}. \qquad (2.50)$$

Поэтому достаточно все расчеты остаточных напряжений выполнять для трехфазного КЗ, если не требуется определять напряжения между здоровой и поврежденными фазами при двухфазном коротком замыкании.

Пример 2.15.

Определить остаточное напряжение на шинах распределительного пункта А (рис. 2.6) при трехфазном КЗ за реактором РТТ–0,38–50–0,14–У3 распредустройства 0,4 кВ подстанции Б. Ток короткого замыкания равен 1150 А.

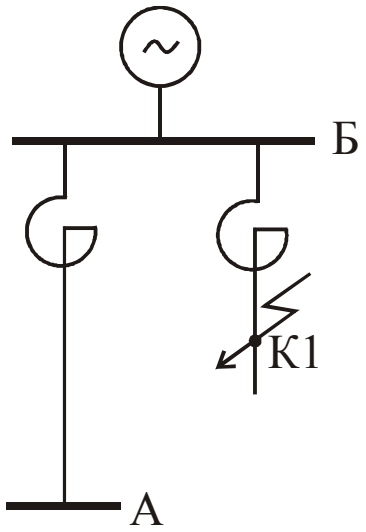


Рис. 2.6. Схема к примеру 2.15

Решение.

Данные реактора РТТ–0,38–50–0,14–У3 даны в разделе 2.2: $U_{ном}$ = 380 В, $I_{ном}$ = 50 А, $x_р$ = 140 мОм, $r_р$ = 17 мОм.

Напряжение на шинах распредустройства 0,4 кВ подстанции Б равно:

$$U^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I_{КЗ}^{(3)} \cdot z = \sqrt{3} \cdot 1150 \cdot \sqrt{140^2 + 17^2} \cdot 10^{-3} = 280\,\text{В}.$$

Пренебрегая потерями напряжения от тока нагрузки в линии между распределительным пунктом А и подстанцией Б, можно считать, что и на шинах распределительного пункта А напряжение равно 280 В.

2.5. Расчет токов однофазного короткого замыкания при питании от энергосистемы

Обеспечение отключения аппаратами защиты токов двух- и трехфазного КЗ не является гарантией отключения токов однофазного КЗ, так как токи однофазного короткого замыкания в несколько раз меньше токов двух- и трехфазного КЗ. В установках в сетях с глухозаземленной нейтралью при замыкании фазы на корпус необходимо обеспечить быстрое отключение поврежденного участка. Достигается это созданием высокой проводимости в петле фаза-нуль за счет системы зануления.

Методика расчета токов однофазного КЗ изложена в [4]. Для расчета необходимо знать величины активного и индуктивного сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей цепи. Их значения определяются конструктивным исполнением сети, схемами соединения обмоток трансформатора и сопротивлениями элементов, входящих в расчетную цепочку.

2.5.1. Расчет активного и индуктивного сопротивлений силовых кабелей

Сопротивление некоторых конструкций кабелей (например, четырехжильных) и кабельных линий (например, одножильных, расположенных в одной плоскости) не является симметричным при нарушении симметрии нагрузки одной из фаз. Предельный случай однофазной несимметрии – это режим однофазного короткого замыкания. Для кабелей с резиновой и бумажной пропитанной изоляцией при разном исполнении линий полное сопротивление петли короткого замыкания приводится в справочниках (см., например, [4]). Информация о сопротивлениях многожильных силовых кабелей на напряжениях 0,6/1 кВ и одножильных кабелей на напряжение 6/10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена в настоящее время либо отсутствует,

либо весьма ограничена. В связи с этим параметры таких кабелей могут быть получены расчетным путем.

Основа методики расчета. В основу метода расчета положено представление несимметричных напряжений (токов) в трехфазной симметричной сети в виде суммы трех симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательностей, различающихся чередованием фаз. В этом случае значения фазных напряжений $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ будут определены в виде комплексных величин:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \\ \dot{U}_B = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 \cdot a^2 + \dot{U}_2 \cdot a \\ \dot{U}_C = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 \cdot a + \dot{U}_2 \cdot a^2, \end{cases} \qquad (2.51)$$

где $a = \exp\left(j\frac{2\pi}{3} \right)$, $a^2 = \exp\left(-j\frac{2\pi}{3} \right)$ – единичные векторы.

Решая систему уравнений (2.51) относительно U_1, U_2 и U_0, получим:

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C \right) \\ \dot{U}_1 = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + a \cdot \dot{U}_B + a^2 \cdot \dot{U}_C \right) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_A + a^2 \cdot \dot{U}_B + a \cdot \dot{U}_C \right), \end{cases} \qquad (2.52)$$

где $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{U}_0$ – симметричные составляющие фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, соответственно.

Если к симметричной цепи приложена симметричная система фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, то в ней возникает симметричная система токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Отношения симметричных составляющих фазных напряжений к соответствующим симметричным составляющим токов является комплексными сопротивлениями прямой z_1, обратной z_2 и нулевой z_0 последовательностей. Для симметричной трехфазной цепи сопротивления прямой и обратной последовательностей равны:

$$z_1 = z_2 = R + j \cdot \omega \cdot L, \qquad (2.53)$$

где R – активное сопротивление жилы кабеля, Ом/м;

L – индуктивность жилы кабеля, Гн/м.

Средняя индуктивность. Для несимметричных кабелей и кабельных линий при определении сопротивлений используется средняя индуктивность $L_{ср}$, которая рассчитывается:

$$L_{\text{ср}} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{2\cdot l_{\text{ср}}}{d_0} + \frac{1}{4}\right], \tag{2.54}$$

где $l_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между центрами жил кабеля, мм;

d_0 – диаметр токопроводящей жилы, мм;

$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – относительная магнитная проницаемость.

Для четырехжильных кабелей (рис. 2.7) среднее расстояние между центрами жил рассчитывается по соотношению:

$$l_{\text{ср}} = \sqrt[3]{l_{\text{AB}}\cdot l_{\text{AC}}\cdot l_{\text{BC}}}, \tag{2.55}$$

где l_{AB}, l_{AC}, l_{BC} – расстояние между центрами жил кабеля, мм.

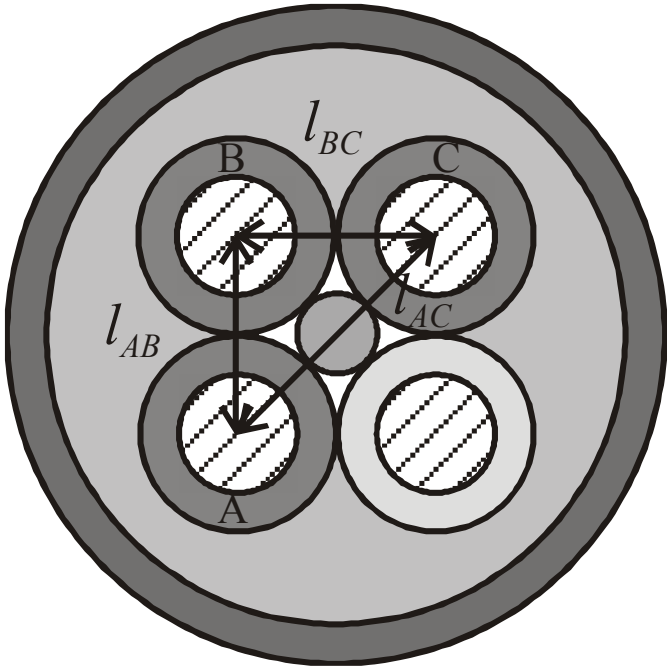


Рис. 2.7. Схема четырехжильного кабеля

При прокладке одножильных кабелей в одной плоскости среднее расстояние между центрами жил будет равно:

$$l_{\text{ср}} = l\sqrt[3]{2}, \tag{2.56}$$

где l – расстояние между центрами кабелей (рис. 2.8).

Эффект близости. При расчете индуктивности следует учитывать влияние поверхностного эффекта и эффекта близости. Индуктивность симметричной цепи из двух изолированных жил рассчитывается по формуле:

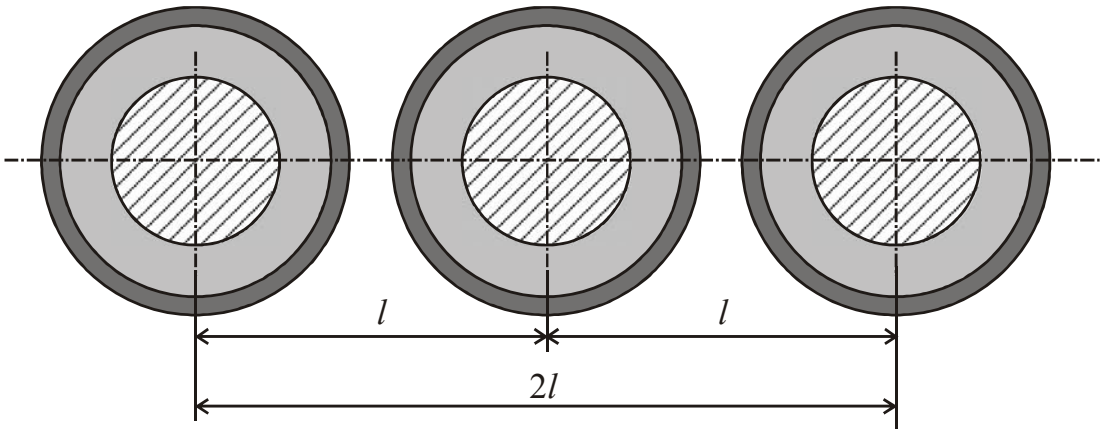


Рис. 2.8. Схема прокладки одножильных кабелей

$$L_{1-2} = \left[4 \ln \frac{2 \cdot l}{d_0} + Q(X) \right] \cdot 10^{-4}, \qquad (2.57)$$

где L_{1-2} – индуктивность цепи, Гн/км;

d_0 – диаметр токопроводящей жилы, мм;

l – расстояние между центрами жил;

$Q(X)$ – коэффициент, учитывающий внутреннюю индуктивность токопроводящей жилы.

Значения $Q(X)$ в зависимости от параметра X приведены в [11]. Параметр X рассчитывается по формуле:

- для медных жил:

$$X = 0{,}105 \cdot d_0 \cdot \sqrt{f}\,, \qquad (2.58)$$

- для алюминиевых жил:

$$X = 0{,}0084 \cdot d_0 \cdot \sqrt{f}\,, \qquad (2.59)$$

где f – частота, Гц.

При расчетах индуктивности кабелей с секторными жилами следует принимать значение эквивалентного диаметра жилы, который равен диаметру круглой жилы, имеющей ту же площадь поперечного сечения, что и секторная жила. Для четырехжильных кабелей среднее расстояние между центрами основных жил (рис. 2.7):

$$l_{\text{ср}} = l\left(\sqrt{2}\right)^{1/3} = 1{,}12 \cdot l\,. \qquad (2.60)$$

Тогда индуктивность в пересчете на одну жилу составит:

$$L = 0{,}1\left[2 \ln \frac{2 \cdot \kappa \cdot l}{d_0} + \frac{1}{2} Q(X) \right], \qquad (2.61)$$

где L – индуктивность в пересчете на одну жилу четырехжильного кабеля, мГн/км;

κ – коэффициент формы.

Для трехжильных кабелей $\kappa = 1$, для четырехжильных – $\kappa = 1{,}12$ (см. формулу (2.60)). Значение коэффициента $Q(X)$ в зависимости от сечения токопроводящей жилы принимают от 0,5 до 1,0. Как правило, для большинства типов силовых кабелей его значение 0,5 или 0,75 [12].

Результаты расчета параметров четырехжильных кабелей типа АПвПГ (АПвВГ) на 0,6/1 кВ приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Сопротивления прямой последовательности кабелей марки АПвПГ (АПвВГ) на 0,6/1 кВ

Сечение токопроводящих жил, мм^2	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Толщина изоляции, мм	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
Наружный диаметр, мм	24	26	27	32	35	39	42	47	52
Активное сопротивление при 90 °С, Ом/км	1,54	1,11	0,822	0,568	0,411	0,325	0,265	0,211	0,162
Индуктивность, мГн/км	0,267	0,260	0,255	0,252	0,247	0,246	0,247	0,248	0,245
Индуктивное сопротивление, Ом/км	0,083	0,082	0,080	0,079	0,076	0,77	0,076	0,078	0,077

Особенности расчета сопротивлений одножильных кабелей. При расчете сопротивлений одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией среднего напряжения необходимо учитывать, что токи в металлических экранах приводят к увеличению эффективного активного сопротивления и снижению индуктивного сопротивления. В этом случае полное сопротивление одножильного кабеля в трехфазной системе можно рассчитывать по формуле:

$$z = R_1(1 + y) + j \cdot \omega\left(L - \omega \cdot M_{\text{эк}} \cdot m^2\right), \tag{2.62}$$

где y – коэффициент потерь энергии в металлическом экране:

$$y = m^2 \cdot \frac{R_{\text{эк}}}{R_1}, \tag{2.63}$$

$$m^2 \approx \frac{(\omega \cdot M_{\text{эк}})^2}{R_{\text{эк}}^2}, \tag{2.64}$$

где $R_{\text{эк}}$ – активное сопротивление металлического экрана, Ом/км;

R_1 – активное сопротивление токопроводящей жилы, Ом/км;

$M_{\text{эк}}$ – коэффициент взаимной индуктивности для экранов, мГн/км:

$$M_{\text{эк}} = 0{,}46 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot l}{d_{\text{эк}}}\right), \tag{2.65}$$

где $d_{эк}$ – диаметр металлического экрана, мм.

При расположении одножильных кабелей в плоскости с расстоянием между кабелями, равными диаметру кабеля, значение взаимной индуктивности примерно равно $M_{эк} = 0{,}322$ мГн/км, $\omega \cdot M_{эк} = 0{,}1$ Ом/км. Значение $m^2 \cdot M_{эк}$ при сечениях экрана до 35 мм^2 не более 2 % от общей индуктивности кабеля, поэтому его влиянием можно пренебречь. Однако увеличение сопротивления жилы за счет потерь в экране кабеля при сечении токопроводящих жил более 300 мм^2 достигает 22,6 %, поэтому оно должно учитываться при расчетах полного сопротивления одножильного кабеля.

Результаты расчета параметров одножильного кабеля марки АПвП на 6/10 кВ даны в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Расчетные значения параметров кабеля марки АПвП (АПвВ) 6/10 кВ

Сечение жилы, мм^2	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
Сечение экрана, мм^2	16	16	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35
Наружный диаметр кабеля, мм	23	24	26	27	29	30	32	33	36	39	42	45
Активное сопротивление при 90 °С, Ом/км	1,540	1,110	0,820	0,568	0,410	0,324	0,264	0,210	0,160	0,128	0,0997	0,0776
Активное сопротивление с учетом потерь в экране, Ом/км	1,550	1,120	0,825	0,570	0,414	0,332	0,276	0,222	0,173	0,141	0,118	0,0955
Индуктивное сопротивление при прокладке треугольником, Ом/км	0,163	0,156	0,149	0,141	0,136	0,131	0,119	0,117	0,112	0,110	0,104	0,100
Индуктивное сопротивление при прокладке в плоскости, Ом/км	0,230	0,214	0,208	0,199	0,193	0,188	0,176	0,172	0,170	0,167	0,162	0,158

Расчет сопротивлений нулевой последовательности. Для расчета сопротивлений нулевой последовательности рассмотрим схему токов нулевой последовательности в четырехжильном кабеле, приведенную на рис. 2.9. Падение напряжения в цепи нулевой последовательности (фаза – нулевая жила) рассмотрим по схеме замещения цепи, приведенной на рис. 2.10:

$$U_0 = I_0 \cdot z_0, \qquad (2.66)$$

где U_0 – падение напряжения нулевой последовательности;

I_0 – ток нулевой последовательности;

z_0 – сопротивление нулевой последовательности.

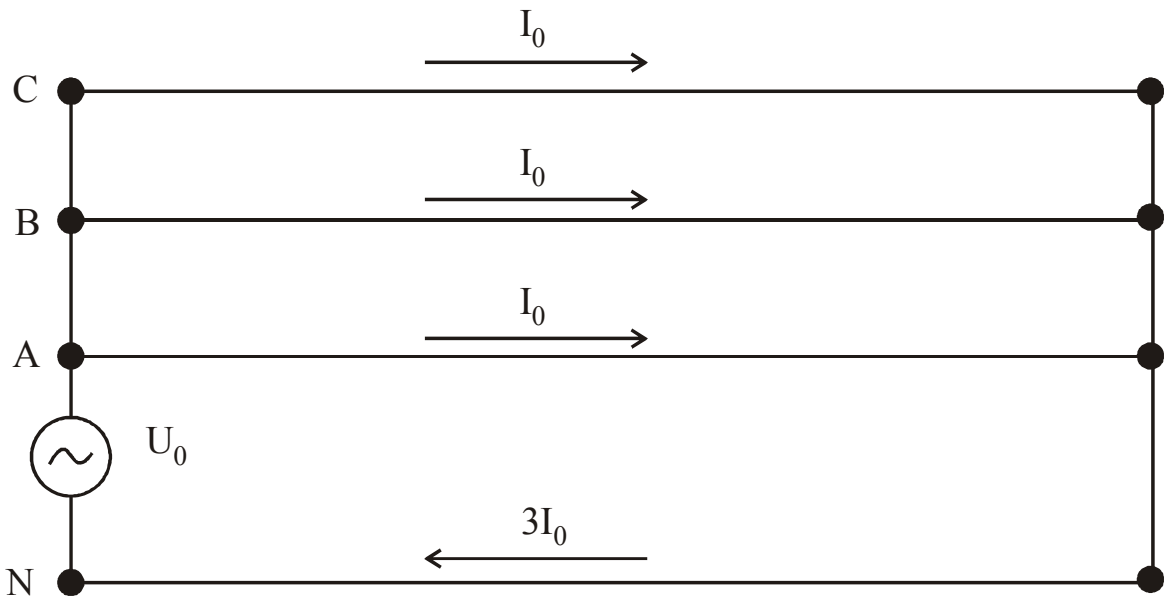


Рис. 2.9. Схема токов нулевой последовательности в четырехжильном кабеле

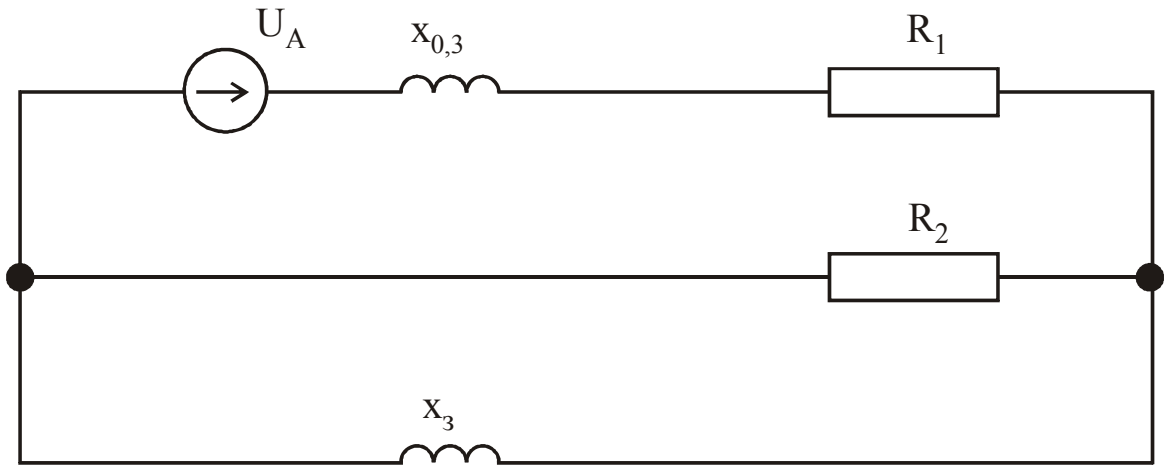


Рис. 2.10. Схема замещения цепи «фаза – нулевая жила»

Сопротивление нулевой последовательности равно:

$$z_0 = R_1 + 3jx_{0,3} + 3z_{0,3}, \qquad (2.67)$$

где R_1 – активное сопротивление прямой последовательности жилы кабеля, Ом/км;

$x_{0,3}$ – индуктивное сопротивление прямой последовательности: три жилы – нулевой проводник;

$z_{0,3}$ – суммарное сопротивление нулевого проводника (R_0) и реактивного сопротивления земли ($x_з$).

Значение $z_{0,3}$ можно рассчитать по формуле:

$$z_{0,з} = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{jx_з} \right), \tag{2.68}$$

где R_0 – активное сопротивление нулевого проводника, Ом/км.

Активная $\mathrm{Re}z_0$ и реактивная $\mathrm{Im}z_0$ составляющие z_0 рассчитываются по формулам:

$$\mathrm{Re}\, z_0 = R_1 \cdot \left[1 + 3 \frac{\left(x_з / R_1 \right)^2}{1 + \left(x_з / R_1 \right)^2} \right], \tag{2.69}$$

$$\mathrm{Im}\, z_0 = 3 \cdot \left[x_{0,3} + \frac{x_з}{1 + \left(x_з / R_1 \right)^2} \right]. \tag{2.70}$$

Значение реактивного сопротивления $x_{0,3}$ для четырехжильного кабеля можно определить по формуле:

$$x_{0,3} = j\omega L_{0,3}, \tag{2.71}$$

где $L_{0,3}$ – индуктивность прямой последовательности: три жилы – нулевой проводник, которую можно рассчитать по формуле (2.61).

Расчет параметров четырехжильных кабелей марки АПвВГ (АПвПГ) приведен в таблице 2.5, $x_з$ принято равным 0,6 Ом/км.

Таблица 2.5

Расчетные значения параметров нулевой последовательности кабеля марки АПвВГ (АПвПГ) на 0,6/1 кВ

Сечение жилы, мм^2	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Толщина изоляции, мм	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
Индуктивность (при $Q(x) = 0{,}5$), мГн/км	0,282	0,272	0,271	0,263	0,263	0,257	0,260	0,262	0,261
Индуктивное сопротивление	0,0880	0,0852	0,0850	0,0826	0,0826	0,0810	0,0816	0,0822	0,0820
Активное сопротивление жилы при 90 °С, Ом/км	1,54	1,11	0,822	0,568	0,411	0,325	0,265	0,211	0,162
Активная составляющая сопротивления нулевой последовательности ($\mathrm{Re}z_0$), Ом/км	2,060	1,790	1,780	1,480	1,220	1,030	0,880	0,735	0,580
Реактивная составляющая сопротивления нулевой последовательности ($\mathrm{Im}z_0$),Ом/км	0,490	0,446	0,40	0,367	0,316	0,294	0,282	0,270	0,260

Следует отметить, что индуктивное сопротивление одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в трехфазной сети в значительной мере зависит от взаимного расположения кабелей. Эта зависимость особенно проявляется в случае параллельной прокладки в плоскости двух и более кабелей на одну фазу. В этом случае при расчете индуктивности по выражению (2.54) необходимо в качестве среднего расстояния между осями кабелей ($l_{ср}$) использовать среднее геометрическое значение расстояния между осями проложенных совместно кабелей. Если кабель содержит металлическую оболочку или броню из стальных лент или других ферромагнитных материалов, то дополнительно необходимо учитывать увеличение его индуктивности.

Пути протекания токов нулевой последовательности в сетях до 1000 В. Выражения (2.69) и (2.70) получены в предположении, что нулевой проводник заземлен и со стороны источника питания, и со стороны потребителя (рис. 2.10). Однако сооружение заземлителя у всех потребителей в сети до 1000 В с глухозаземленной нейтралью не обязательно.

Согласно ПУЭ (п. 1.7.3.[13]), система TN – это система, в которой нейтраль источника питания глухо заземлена, а открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника посредством нулевых защитных проводников. При этом в системе TN–C нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены в одном проводнике на всем ее протяжении (раздел 1.1.1), а в системе TN–S нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены на всем ее протяжении, кроме начальной точки у источника питания (раздел 1.1.2). Повторное заземление нулевых защитных проводников рекомендуется выполнять на вводах в здания, на распределительных щитах и т. п. местах. В ряде случаев это сделать невозможно или нецелесообразно. Например, нулевую жилу PEN- или PE-кабеля, подходящего к распределительным этажным или квартирым щиткам высотных зданий, присоединить к земле (в прямом смысле этого слова) у этих щитков никак нельзя. То же самое относится к кабелям, питающим отдельных потребителей.

При однофазном КЗ в системе TN–S возможны два повреждения:

- замыкание фазы на нулевой рабочий проводник N;
- замыкание фазы на защитный проводник PE.

В первом случае токи нулевой последовательности возвращаются только по нулевому рабочему проводнику, не связанному с заземляющими устройствами со стороны потребителя. Во втором – ток возвращается по защитному проводнику, который в зависимости от конкретных условий может быть связан с заземляющим устройством со

стороны потребителя. Эти случаи могут существенно отличаться величиной сопротивлений нулевой последовательности, если отличаются характер и сечения проводников N и PE, а также их расположение относительно фазных. Нулевой рабочий проводник обычно находится в одном кабеле с фазными, а нулевой защитный – может быть проложен отдельно. Кроме того, согласно ПУЭ (п. 1.7.121 [13]) в качестве нулевого защитного проводника могут использоваться такие сторонние токопроводящие части, как:

- металлические строительные конструкции зданий и сооружений (фермы, колонны и т. п.);
- арматура железобетонных строительных конструкций зданий (при условии выполнения требований п. 1.7.122 [13]);
- металлические конструкции производственного назначения (подкрановые рельсы, галереи, площадки, шахты лифтов, подъемников, элеваторов, обрамления каналов и т. п.).

При таком разнообразии нулевых защитных проводников их сопротивления будут заметно отличаться. Это необходимо учитывать в расчетах.

О сопротивлениях контура нулевой последовательности. В соотношения (2.69) и (2.70) введено индуктивное сопротивление земли x_3. Для кабеля с проводящей оболочкой, проложенного в земле с проводимостью грунта 0,1 $Ом^{-1}·м^{-1}$, его значение принимают равным 0,6 Ом/км.

В кабелях с непроводящей оболочкой токи нулевой последовательности могут возвращаться через землю, только пройдя через заземляющее устройство у потребителя (или в промежуточных точках). Таким образом, последовательно с x_3 в эту цепочку должно войти сопротивление заземляющих устройств. При питании кабелями величину сопротивлений повторных заземлителей ПУЭ не нормирует, следовательно, оно может быть весьма большим. Для воздушных линий 380/220 В сопротивление повторных заземлителей не должно превышать 10 Ом. Таким образом, сопротивление заземляющих устройств, как и сопротивление нулевых проводников N и PE, может в десятки раз превышать величину x_3 = 0,6 Ом. Из этого следует, что учет пути тока однофазного КЗ непосредственно через землю практически теряет смысл.

На промышленных объектах путь обратного тока однофазного КЗ часто проходит не через землю, а через другие токопроводящие части. Обусловлено это тем, что на современных предприятиях кабели прокладываются в основном не в земле, а по кабельным конструкциям на электротехнических и технологических эстакадах, в туннелях и

каналах. В промышленных зданиях машиностроительных предприятий прокладка кабелей выполняется в межфермерном пространстве, по специальным кабельным конструкциям, в трубах, коробах, на лотках. Перечисленные конструкции и коммуникации выполнены из металла, поэтому при однофазном КЗ в сети TN они могут выполнять роль проводника обратного тока.

При прокладке кабеля в пластмассовых трубах и коробах ветвь, параллельная нулевому рабочему или защитному проводнику, отсутствует. В этих случаях ток нулевой последовательности может возвращаться только по нулевой жиле кабеля N, PEN или по защитному проводнику PE.

Режимы однофазного КЗ в сети до 1000 В с глухозаземленной нейтралью могут быть достаточно разнообразны. В каждом случае необходимо выбирать тот, который отвечает цели расчета. Так, при проверке чувствительности или времени работы защитной аппаратуры расчетным режимом будет тот, при котором ток однофазного короткого замыкания оказывается минимальным. В некоторых случаях расчетный режим является очевидным. Например, во внутренних сетях административно-бытовых и жилых зданий сторонние проводящие части в цепи тока однофазного КЗ обычно не участвуют и ток проходит по специально проложенным проводникам N, PEN или PE. В цехах машиностроительных и им подобных предприятий, где ПУЭ допускают использование сторонних проводящих частей в качестве единственных нулевых защитных проводников, может потребоваться рассмотрение нескольких режимов однофазного короткого замыкания: замыкание «фаза–сторонняя проводящая часть», «фаза–нулевой рабочий проводник» или «фаза–нулевой защитный проводник».

2.5.2. Сопротивления силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ с разными схемами соединения обмоток

Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ мощностью от 25 до 250 кВА могут изготавливаться со схемами соединения обмоток;

- звезда–звезда – $Y/Y_н$;
- треугольник–звезда – $\Delta/Y_н$;
- звезда–зигзаг – $Y/Z_н$.

Принципиальное отличие технических характеристик трансформаторов с различными схемами соединения обмоток заключается в разной реакции на несимметричные токи, содержащие составляющую нулевой последовательности. Это прежде всего однофазные сквозные

короткие замыкания, а также рабочие режимы с неравномерной загрузкой фаз.

Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ имеют трехстержневой стальной сердечник, на каждом стержне которого располагаются первичная и вторичная обмотки соответствующей фазы. Магнитные потоки трех фаз в симметричных режимах работы циркулируют в стальном сердечнике трансформатора и за его пределы не выходят.

Несимметричные режимы работы исследуются с использованием теории симметричных составляющих – составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Рассмотрим режим максимальной однофазной несимметрии – однофазное короткое замыкание (ОКЗ) на стороне 0,4 кВ трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y_н$. Векторные диаграммы токов симметричных составляющих в обмотках приведены на рис. 2.11. В неповрежденных фазах на стороне 0,4 кВ геометрическая сумма трех симметричных составляющих тока равна нулю (рабочей нагрузкой фаз пренебрегаем), а в поврежденной фазе эта сумма максимальна и равна току ОКЗ. Его величина определяется по соотношению:

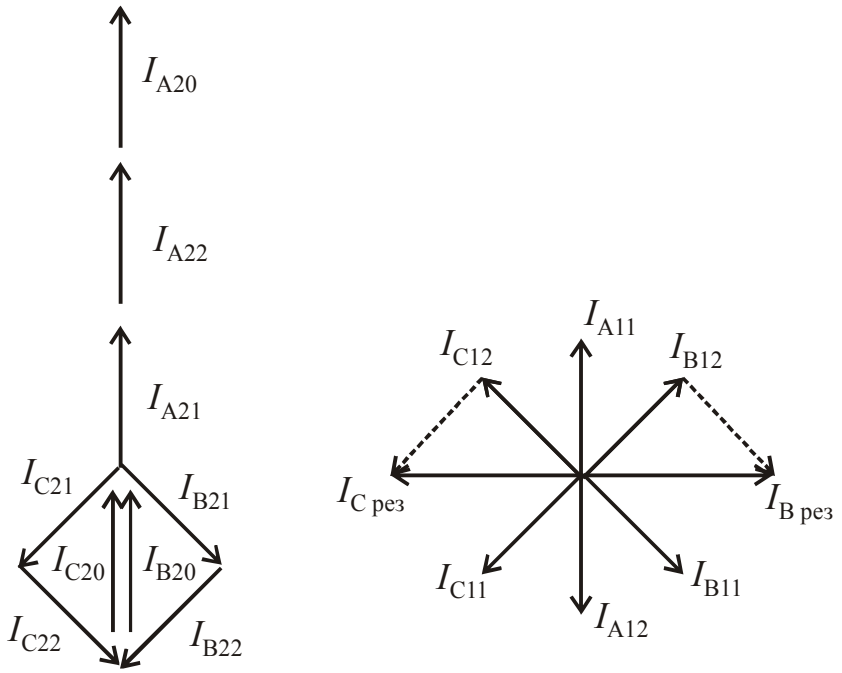


Рис. 2.11. Токи симметричных составляющих в обмотках трансформатора в режиме однофазного короткого замыкания: I_{A21}, I_{A22}, I_{A20}, I_{B21}, I_{B22}, I_{B20}, I_{C21}, I_{C22}, I_{C20} – токи фаз А, В, С прямой, обратной и нулевой последовательностей вторичной обмотки; I_{A11}, I_{A12}, I_{A10}, I_{B11}, I_{B12}, I_{B10}, I_{C11}, I_{C12}, I_{C10} – токи фаз А, В, С прямой, обратной и нулевой последовательностей первичной обмотки

$$I_{\text{окз}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{лин}}}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2}}, \qquad (2.72)$$

где $U_{\text{лин}}$ – линейное напряжение;

R_1, R_0, X_1, X_0 – соответственно активные и реактивные сопротивления прямой и нулевой последовательности.

Сопротивления прямой последовательности. Сопротивления прямой последовательности R_1 и X_1 трансформаторов с разными схемами соединения обмоток определяются одними и теми же формулами и отличаются незначительно:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}}} = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}}}{3I^2_{\text{ном}}}; \quad X_1 = \sqrt{Z^2 - R_1^2}; \; Z = \frac{u_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном}}}{100 \cdot S_{\text{ном}}}. \qquad (2.73)$$

Входящие в эти соотношения известные величины $\Delta P_{\text{КЗ}}$ и $u_{\text{КЗ}}$ от схем соединения обмоток трансформатора практически не зависят, а следовательно, от них не зависят и сопротивления прямой последовательности.

В отличие от этих сопротивлений, сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с разными схемами соединения обмоток отличаются принципиально.

Сопротивления нулевой последовательности. Рассмотрим картину векторов токов и магнитных потоков в трансформаторе со схемой соединения обмоток $\Delta/Y_н$ (рис. 2.12).

В таких трансформаторах токи прямой, обратной и нулевой последовательностей протекают как в первичной, так и во вторичной обмотках. При этом токи нулевой последовательности в первичной обмотке замыкаются внутри нее и в сеть не выходят. Создаваемые токами нулевой последовательности первичных и вторичных обмоток намагничивающие силы (ампер–витки) направлены встречно и почти полностью компенсируют друг друга. Это обуславливает небольшую величину реактивных сопротивлений трансформатора. При этом сопротивления прямой и нулевой последовательностей приблизительно равны $R_1 \approx R_0$; $X_1 \approx X_0$.

В трансформаторах со схемой соединения обмоток $Y/Z_н$ в аналогичном режиме ОКЗ токи нулевой последовательности протекают лишь во вторичной обмотке трансформатора, но магнитного потока нулевой последовательности они не создают, что обусловлено особенностью схемы зигзаг. Особенность в том, что на каждом стержне магнитопровода трансформатора расположено по одной вторичной полуобмотке двух разных фаз (рис. 2.13). В режиме ОКЗ

намагничивающие силы, создаваемые токами нулевой последовательности в этих полуобмотках, направлены встречно и друг друга взаимно компенсируют. При этом токи нулевой последовательности в первичной обмотке отсутствуют. В таких трансформаторах сопротивления нулевой последовательности оказываются меньше сопротивлений прямой последовательности: $R_1 < R_0$; $X_1 < X_0$. Как следует из соотношения (2.72), это обеспечивает большую величину тока ОКЗ у трансформаторов со схемами $Y/Z_н$ по сравнению с трансформаторами со схемами $\Delta/Y_н$.

В трансформаторах со схемой соединения $Y/Y_н$ в обмотках, соединенных в звезду без выведенной нулевой точки, токи нулевой последовательности протекать не могут. В режиме ОКЗ токи этой последовательности протекают только во вторичной обмотке трансформатора.

Совпадающие по фазе магнитные потоки нулевой последовательности, создаваемые токами вторичной обмотки, выходят за пределы магнитного сердечника и замыкаются через корпус трансформатора (рис. 2.14). Это определяет значительно большую величину сопротивлений нулевой последовательности таких трансформаторов: $R_1 >> R_0$; $X_1 >> X_0$.

Сопротивления прямой последовательности трансформаторов могут быть рассчитаны (см. (2.73)). Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$ расчету не поддаются. Их можно определить только экспериментально. Схема замера сопротивлений нулевой последовательности приведена в ГОСТ 3484.1–88 [14]. Величина этих сопротивлений во многом зависит от конструкции корпуса трансформатора, от величины зазоров между сердечником и корпусом и т. п. Реактивные сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$ могут превышать сопротивления прямой последовательности на один–два порядка.

При выборе аппаратов защиты, проверке селективности их срабатывания необходимо знать реальные значения сопротивлений нулевой последовательности, так как они определяют величину тока ОКЗ. Чем больше эти сопротивления, тем меньше ток однофазного короткого замыкания, соответственно труднее осуществить защиту трансформатора.

Если принять $R_1 = R_0$; $X_1 = X_0$, что характерно для трансформаторов со схемами соединения обмоток $\Delta/Y_н$, то получим:

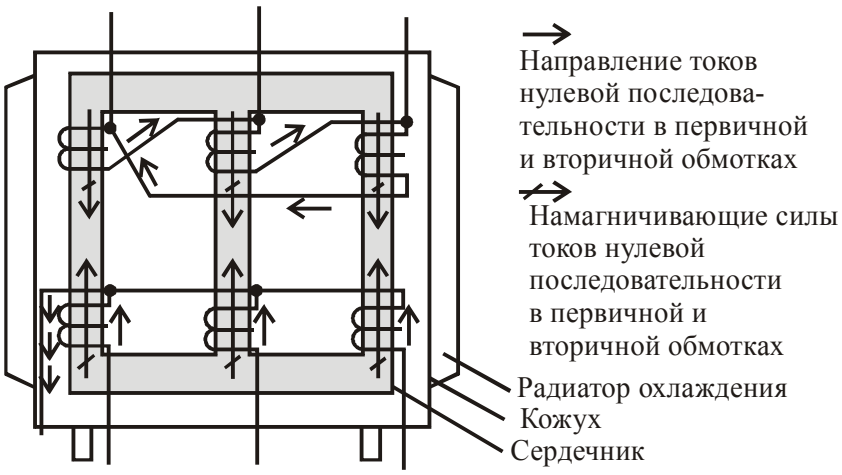


Рис. 2.12. Направления токов и магнитных потоков нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $\Delta/Y_н$

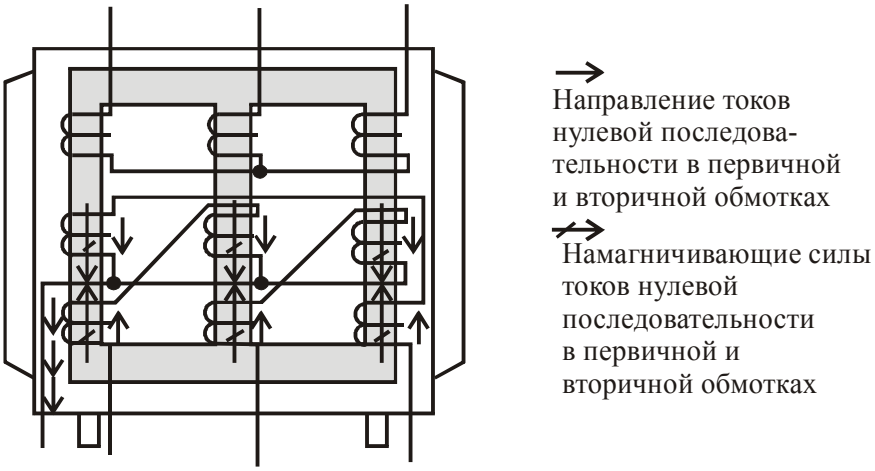


Рис. 2.13. Направления токов и магнитных потоков нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/Z_н$

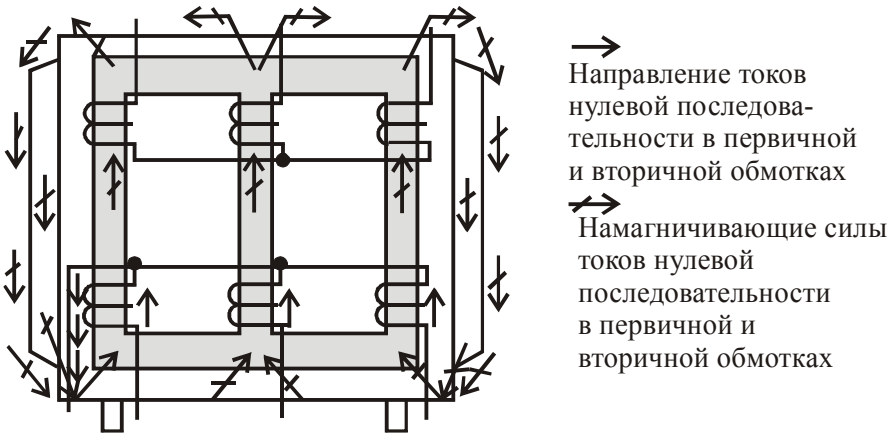


Рис. 2.14. Направления токов и магнитных потоков нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$

$$I_{ОКЗ} = \frac{\sqrt{3}\cdot U_{\text{лин}}}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2}} = \frac{3\cdot U_{\text{фазн}}}{\sqrt{(2R_1 + R_0)^2 + (2X_1 + X_0)^2}} =$$
$$= \frac{3\cdot U_{\text{фазн}}}{\sqrt{9(R_1 + X_1)^2}} = \frac{U_{\text{фазн}}}{Z_1}. \qquad (2.74)$$

Таким образом, при этих условиях ток однофазного КЗ на выводах 0,4 кВ трансформатора будет равен току трехфазного короткого замыкания.

Однако, если $R_1 >> R_0$ и $X_1 >> X_0$, что характерно для трансформаторов со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$, то величина тока ОКЗ оказывается значительно меньше тока трехфазного КЗ. Возникают трудности с защитой, особенно если она выполнена со стороны обмотки высокого напряжения предохранителями 6(10) кВ. Надежность защиты повышается при применении трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Z_н$.

Рекомендуется обмотки трансформаторов мощностью 400 кВА и выше включать по схеме $\Delta/Y_н$, а трансформаторы от 250 кВА и ниже – по схеме $Y/Z_н$.

Не всегда большая величина сопротивлений нулевой последовательности трансформатора является недостатком. Например, при применении трансформаторов более 1000 кВА может возникнуть проблема устойчивости однофазной коммутационной аппаратуры 0,4 кВ к току ОКЗ. В этом случае большая величина сопротивлений нулевой последовательности трансформатора со схемой $Y/Y_н$ может решить эту проблему.

Снижение сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$. Недостатки трансформаторов со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ проявляются и в нормальных режимах работы. В эксплуатации они экономичны только при симметричной нагрузке фаз. Реально же в сетях с большим удельным весом однофазных нагрузок равномерность их подключения во времени пофазно нарушается и потери электрической энергии в таких трансформаторах и линиях возрастают.

При подключении к трансформаторам однофазной нагрузки необходимо учитывать, что ток в наиболее нагруженной фазе не должен быть больше номинального, а нейтраль должна нагружаться не более:

25 % – при схеме соединения обмоток $Y/Y_н$;
40 % – при схеме соединения обмоток $Y/Z_н$;
75 % – при схеме соединения обмоток $\Delta/Y_н$.

Потери короткого замыкания $\Delta P_{КЗ}$ трансформатора $Y/Y_н$ зависят от величины тока в нулевом проводе и с его увеличением резко растут. Этот рост обусловлен появлением потоков нулевой последовательности в магнитных системах трехфазных трансформаторов $Y/Y_н$, создаваемых токами небаланса $I_{нб}$ (равными $3I_0$), протекающими в нулевом проводе сети. Потоки нулевой последовательности носят характер потоков рассеяния, аналогичных потокам короткого замыкания, но по величине они значительно больше, о чем позволяют судить соотношения полных сопротивлений Z_0 и $Z_{КЗ}$. Экспериментальные данные показывают, что Z_0 больше $Z_{КЗ}$ в 5−8 раз, а для некоторых конструкций трансформаторов – в 12 и более раз.

Последствием неравномерности нагрузки фаз в сетях с трансформаторами $Y/Y_н$ является искажение системы фазных напряжений (на практике это называют смещением нулевой точки). Как результат – увеличение потерь и в линиях 0,4 кВ.

Искажение фазных напряжений в условиях эксплуатации нередко вызывает их отклонение, превышающее уже на низковольтных вводах трансформатора нормы ГОСТ. В конце линий это отклонение напряжений может быть в два раз больше. При таком качестве питания потребителей повышение в них уровня потерь электроэнергии и отказов в работе вполне естественно. Практика показывает, что экономический урон от искажения напряжения у потребителей огромен.

Завышение установленной мощности трансформаторов $Y/Y_н$ сверх требуемой по расчету (для понижения несимметрии напряжения) дает незначительный эффект, но при этом повышается уровень потерь электроэнергии в сети. Кроме того, при несимметрии нагрузки токи нулевой последовательности создают в магнитной системе трансформатора $Y/Y_н$ потери нулевой последовательности, которые замыкаясь через его бак, дно, крышку, разогревают их, ухудшая охлаждение активной части. Это повышает температуру изоляции обмоток, и трансформатор, при суммарной нагрузке ниже номинальной, оказывается перегруженным. Возникает необходимость увеличения номинальной мощности трансформатора на одну–две ступени относительно расчетной со всеми вытекающими последствиями.

Недостатки трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ могут быть устранены при применении встраиваемого симметрирующего устройства (рис. 2.15). Симметрирующее устройство – это отдельная обмотка, уложенная в виде бандажа поверх обмоток высокого напряжения. Она рассчитана на длительное протекание номинального тока трансформатора, то есть на полную номинальную однофазную нагрузку.

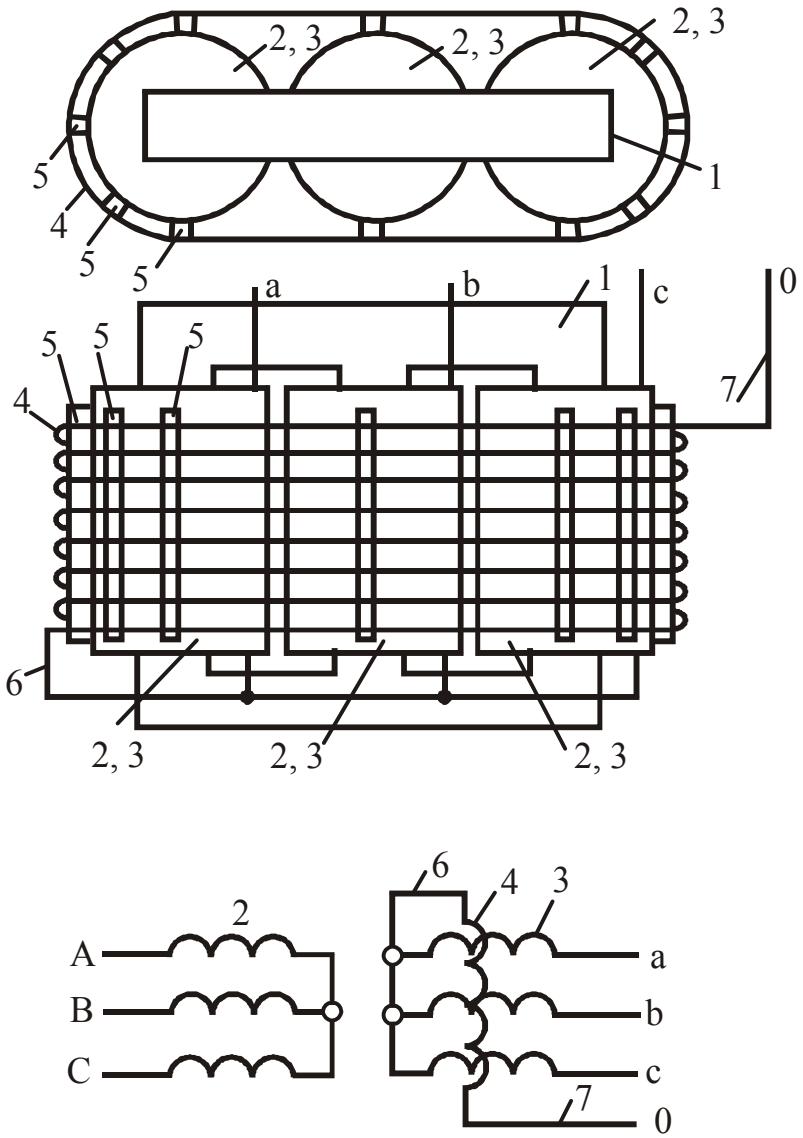


Рис. 2.15. Схемы включения основных и дополнительной обмоток трансформатора: 1 – трехстержневой магнитопровод трехфазного трансформатора; 2 – обмотки высокого напряжения; 3 – обмотки низкого напряжения; 4 – обмотка из компенсационных витков; 5 – дистанционные клинья; 6 – конец компенсационной обмотки, подключаемой к нейтрали обмоток низкого напряжения; 7 – конец компенсационной обмотки, который выводиться наружу

Обмотка симметриующего устройства включена в рассечку нулевого провода трансформатора из расчета, что при несимметричной нагрузке и появлении тока в нулевом проводе создаваемые в магнитопроводе потоки нулевой последовательности в рабочих обмотках трансформатора полностью компенсируются противоположно направленными потоками нулевой последовательности от симметрирующего устройства. Этим предотвращается перекос фазных напряжений.

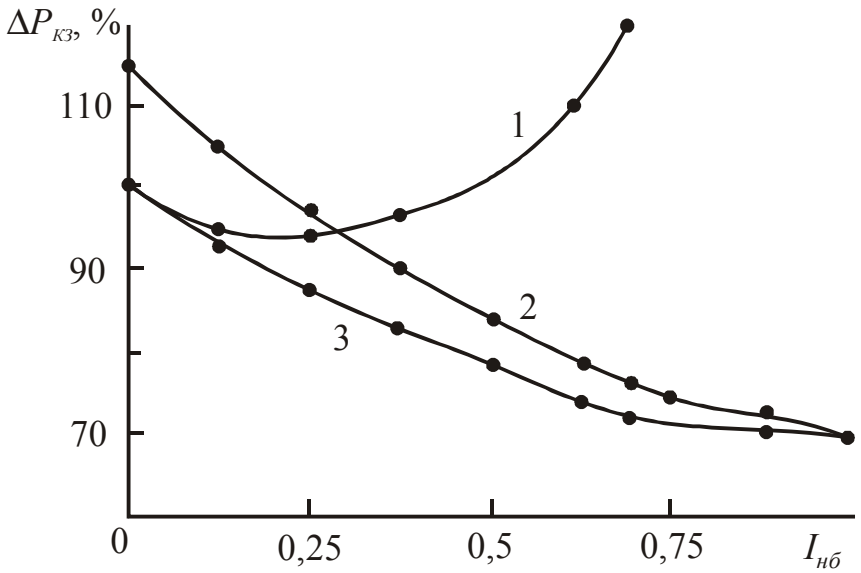


Рис. 2.16. Зависимость потерь короткого замыкания трансформатора ТМ-100/10 от схем соединения обмоток и величины тока в нулевом проводе (3 I_0): 1 – трансформатор Y/$Y_н$; 2 – трансформатор Y/$Z_н$; 3 – трансформатор Y/$Y_н$ с симметрирующим устройством

На рис. 2.16 показаны зависимости потерь короткого замыкания $\Delta P_{КЗ}$ трансформатора ТМ-100/10 от величины тока в нулевом проводе при $I_b = I_c = I_н$ и $0 \le I_a \le I_н$ при различных схемах соединения обмоток. Характеристики трансформаторов $Y/Y_н$ (потери короткого замыкания, холостого хода и др.) от наложения симметрирующего устройства практически не меняются, но при этом сокращаются потери электроэнергии в сети. Система фазных напряжений при неравномерной нагрузке фаз симметрируется так же, как и при схеме соединения обмоток $Y/Z_н$.

При правильном согласовании витков рабочих и компенсационной обмоток напряжение на витках компенсационной обмотки при токе в нулевом проводе, равном номинальному, достигает величины номинального фазного напряжения и уравновешивает на нейтрали обмотки низкого напряжения электродвижущую силу нулевой последовательности от рабочих обмоток до нулевого значения.

Симметрирующее устройство снижает и сопротивление нулевой последовательности силового трансформатора. Это увеличивает токи однофазного КЗ и является одним из достоинств трансформаторов $Y/Y_н$ с симметрирующим устройством, так как обеспечивает надежную наладку релейной защиты и ее четкую работу при коротких замыканиях. Кроме того, разрушающее воздействие увеличенного тока ОКЗ на обмотки трансформатора $Y/Y_н$ с симметрирующим устройством ниже, чем от тока КЗ при отсутствии компенсирующей обмотки, так как

мощный несимметричный разрушающий поток нулевой последовательности полностью компенсируется.

2.5.3. Расчет однофазного металлического короткого замыкания

Методика и порядок расчета точного значения тока однофазного короткого замыкания даны в [4].

Для упрощенных расчетов при большой мощности питающей энергосистемы ($x_c < 0{,}1x_{тр}$) ток однофазного металлического КЗ определяется по соотношению:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{ф-0}}, \qquad (2.75)$$

где $U_ф$ – фазное напряжение сети;

$Z_{ф-0}$ – полное сопротивление петли фаза – нуль от трансформатора до точки КЗ, измеренное при испытаниях или найденное из расчета;

$Z_{тр}^{(1)}$ – полное сопротивление понижающего трансформатора токам однофазного КЗ.

Величина $Z_{тр}^{(1)}$ принимается по таблице 2.1 или находится по выражению:

$$Z_{тр}^{(1)} = \sqrt{\left(x_{1тр} + x_{2тр} + x_{0тр}\right)^2 + \left(r_{1тр} + r_{2тр} + r_{0тр}\right)^2}. \qquad (2.76)$$

Полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ сильно зависит от схемы соединения его обмоток (см. раздел 2.5.2). При схемах соединений $\Delta/Y_н$ и $Y/Z_н$ величина $Z_{тр}^{(1)}/3$ равна сопротивлению трансформатора при трех- или двухфазном КЗ и определяется по выражению:

$$Z_{тр} = \frac{u_{КЗ} \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном.\,тр}}. \qquad (2.77)$$

Для указанных схем соединений при питании от системы бесконечной мощности ток однофазного КЗ на выводах трансформатора равен току трехфазного КЗ:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{Z_{тр}} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot Z_{тр}} = I_{КЗ}^{(3)}. \qquad (2.78)$$

При соединении $Y/Y_н$ $Z_{тр}^{(1)} \neq 3Z_{тр}$. Определенная экспериментально величина $Z_{тр}^{(1)}$ приведена в таблице 2.1 (или в табл. 6.7 [4]).

Полное сопротивление петли короткого замыкания $Z_{ф-0}$ состоит из сопротивлений фазного и нулевого проводников, принимается по данным [4] или рассчитывается по методике, представленной в разделе 2.5.1. Сопротивление контактов шин, аппаратов, трансформаторов тока не учитывается, так как расчет по выражению (2.75) дает некоторый запас по току вследствие арифметического сложения $Z_{тр}^{(1)}/3$ и $Z_{ф-0}$.

Если питающая энергосистема имеет ограниченную мощность, то $Z_{тр}^{(1)}$ рассчитывается с учетом сопротивления энергосистемы:

$$Z_{тр}^{(1)} = \sqrt{\left(x_{1тр} + x_{2тр} + x_{0тр} + 2x_с\right)^2 + \left(r_{1тр} + r_{2тр} + r_{0тр} + 2r_с\right)^2}. \qquad (2.79)$$

Приближенно $Z_{тр}^{(1)}$ с учетом сопротивления энергосистемы можно принимать по таблице 2.6.

Таблица 2.6

Значения $Z_{тр}^{(1)}/3$ для расчета металлических однофазных КЗ при различной электрической удаленности трансформаторов от источника питания

Трансформатор		Значение $Z_{тр}^{(1)}/3$, мОм		
$S_{ном}$, кВА	$u_{КЗ}$, %	$x_с = 0{,}1x_{тр}$	$x_с = x_{тр}$	$x_с = 2x_{тр}$
		$Y/Y_н$		
400	4,5	65,96	75,70	86,66
630	5,5	43,77	51,65	60,50
1000	5,5	27,53	32,46	38,00
1600	5,5	16,90	19,73	22,92
		$\Delta/Y_н$		
400	4,5	19,07	28,94	40,10
630	5,5	14,80	22,76	31,68
1000	5,5	9,39	14,47	20,17
1600	5,5	5,86	9,07	12,65

Примечание. Активное сопротивление энергосистемы не учитывалось.

Пример 2.16.

Определить ток однофазного КЗ в конце линий для схемы на рис. 2.17. Схема соединения обмоток трансформатора $\Delta/Y_н$ и $Y/Y_н$, номинальная мощность 400 кВА, напряжение 6/0,4 кВ. Кабельная линия выполнена кабелем с алюминиевыми жилами сечением (3×70+1×25), воздушная – алюминиевыми проводами сечением (3×70+1×35).

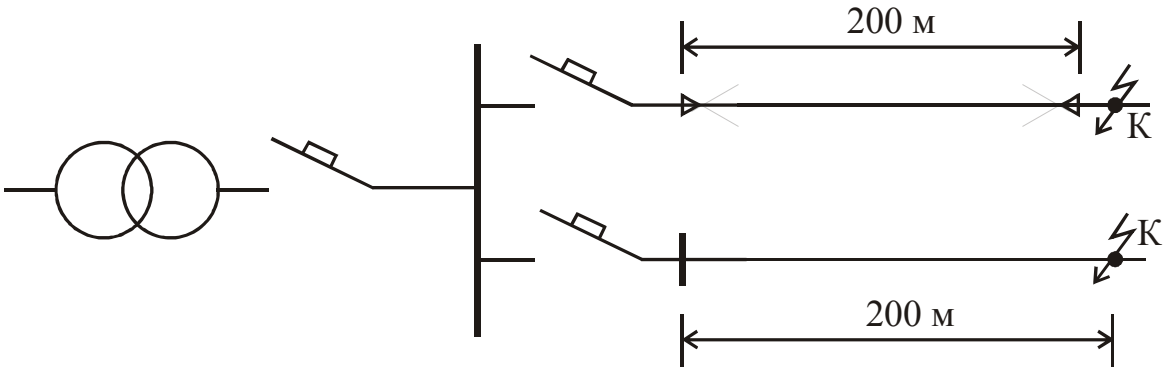


Рис. 2.17. Схема сети к примеру 2.16

Решение.

По таблице 2.1 для схемы соединения обмоток $\Delta/Y_н$ величина $Z_{тр}^{(1)}/3 = 0{,}0187$ Ом. По [4, табл. 6.20] сопротивление петли фаза–нуль воздушной линии при расстоянии между фазой и нулем 1 м равно:

$$Z_{ф-0} = Z_{0(ф-0)} \cdot l = 1{,}82 \cdot 0{,}2 = 0{,}364 \text{ Ом}.$$

Сопротивление четырехжильного кабеля с учетом алюминиевой оболочки по [4, табл. 6.24]:

$$Z_{ф-0} = Z_{0(ф-0)} \cdot l = 0{,}87 \cdot 0{,}2 = 0{,}174 \text{ Ом}.$$

Ток короткого замыкания в конце воздушной линии электропередачи:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{ф-0}} = \frac{220}{0{,}0187 + 0{,}364} = 575 \text{ А}.$$

При КЗ в конце кабельной линии:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{ф-0}} = \frac{220}{0{,}0187 + 0{,}174} = 1142 \text{ А}.$$

Ток увеличился за счет малого индуктивного сопротивления кабеля.

Если кабель будет трехжильный с использованием алюминиевой оболочки в качестве нулевого провода, то его полное сопротивление [4, табл. 6.23]:

$$Z_{ф-0} = Z_{0(ф-0)} \cdot l = 1{,}07 \cdot 0{,}2 = 0{,}214 \text{ Ом},$$

а ток при однофазном КЗ:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{ф-0}} = \frac{220}{0{,}0187 + 0{,}214} = 945{,}4 \text{ А}.$$

Ток уменьшился, так как активное сопротивление одной алюминиевой оболочки трехжильного кабеля больше суммарного активного сопротивления четвертой жилы и алюминиевой оболочки четырехжильного кабеля.

Если кабель будет трехжильный в свинцовой или пластмассовой оболочке, то в качестве нулевого провода обычно используется стальная полоса, прокладываемая рядом с кабелем. Сопротивление стали зависит от протекающего по ней тока. Чтобы удовлетворить требованию ПУЭ о 50 %-й проводимости стальной полосы, сечение следует выбирать по таблице 2.7 с учетом значения тока КЗ.

Таблица 2.7

Сечение стальных полос и трехжильных кабелей с алюминиевыми жилами, обеспечивающие проводимость полосы около 50 % проводимости фазной жилы

Сечение фазы, мм^2	Размер полосы (ширина × толщина), мм, при токах однофазного КЗ, А							
	100	200	300	400	600	800	1500	3000
6	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3			
10	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3		
16	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3	25×3	
25	40×4	40×4	40×4	40×4	40×4	40×4	25×3	
35	60×4	40×4	40×4	40×4	40×4	40×4	40×4	40×4
50	80×4	80×4	60×4	60×4	60×4	60×4	40×4	60×4
70				80×4	60×4	60×4	60×4	80×4
95					80×4	80×4	80×4	80×4
120					80×4	80×4	80×4	80×4
150						80×4	80×4	80×4
185						80×4	80×4	80×4
240								80×4

В данном случае, предполагая ток однофазного КЗ порядка 600 А, сечение стальной полосы принимают 60×4 мм. При расстоянии между кабелем и полосой 0,2 м и токе 600 А сопротивление петли фаза–полоса по [4, табл. 6.21] составит:

$$Z_{ф-0} = Z_{0(ф-0)} \cdot l = 1{,}94 \cdot 0{,}2 = 0{,}388\ \text{Ом},$$

а ток однофазного короткого замыкания в конце линии:

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{U_ф}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{ф-0}} = \frac{220}{0{,}0187 + 0{,}388} = 570\ \text{А}.$$

Разница между полученным и принятым заранее током около 8 %, что можно считать допустимым и не производить перерасчет.

Для трансформатора с соединением обмоток Y/Y$_н$ величина $Z_{тр}^{(1)}/3 = 0{,}065$ Ом (см. табл. 2.1). Ток однофазного КЗ в конце воздушной линии:

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф}-0}} = \frac{220}{0{,}065 + 0{,}364} = 512{,}8 \text{ А}.$$

Ток при однофазном КЗ в конце четырехжильного кабеля с учетом оболочки:

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф}-0}} = \frac{220}{0{,}065 + 0{,}174} = 920{,}5 \text{ А}.$$

Ток при однофазном КЗ в конце трехжильного кабеля:

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф}-0}} = \frac{220}{0{,}065 + 0{,}214} = 788{,}5 \text{ А}.$$

Для трехжильного кабеля в пластмассовой оболочке и стальной полосы в качестве четвертого провода ток КЗ принимается около 500 А, сечение полосы 60×4 мм (табл. 2.7). Сопротивление петли по [4, табл. 6.21] составит $Z_{0(\text{ф}-0)} \approx 1{,}9$ Ом/км. При этом ток КЗ:

$$I_{\text{КЗ}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\text{тр}}^{(1)}}{3} + l \cdot Z_{0(\text{ф}-0)}} = \frac{220}{0{,}065 + 0{,}2 \cdot 1{,}9} = 494{,}4 \text{ А},$$

что близко к принятому значению.

2.5.4. Расчет однофазного короткого замыкания через переходные сопротивления

Ток однофазного КЗ при любой мощности питающей энергосистемы и с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения определяется по выражению:

$$I_{\text{КЗ R}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{\frac{Z_{\Sigma}^{(1)}}{3} + Z_{\text{ф}-0}}, \qquad (2.80)$$

где $Z_{\Sigma}^{(1)}$ – условная величина, численно равная геометрической сумме сопротивлений току ОКЗ питающей энергосистемы, трансформатора, а также переходных сопротивлений $R_{\text{пер}}$.

Численное значение $Z_{\Sigma}^{(1)}$ определяется по соотношению:

$$Z_{\text{тр}}^{(1)} = \sqrt{\left(x_{1\text{тр}} + x_{2\text{тр}} + x_{0\text{тр}} + 2x_{\text{с}}\right)^2 + \left(r_{1\text{тр}} + r_{2\text{тр}} + r_{0\text{тр}} + 2r_{\text{с}} + 3R_{\text{пер}}\right)^2}. \qquad (2.81)$$

Значения $Z_{\Sigma}^{(1)}/3$ с учетом $R_{\text{пер}} = 15$ мОм и в зависимости от соотношения сопротивлений питающей энергосистемы $x_{\text{с}}$ и трансформатора $x_{\text{тр}}$ приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Значения $Z_{\Sigma}^{(1)}/3$ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения ($R_{пер}$ = 15 мОм) при различной электрической удаленности трансформаторов от источников питания

Трансформатора		Значение $Z_{\Sigma}^{(1)}/3$, мОм		
$S_{ном}$, кВА	$u_{КЗ}$, %	$x_с = 0{,}1x_{тр}$	$x_с = x_{тр}$	$x_с = 2x_{тр}$
		Y/Y$_н$		
400	4,5	72,40	81,37	91,66
630	5,5	50,00	57,08	65,20
1000	5,5	34,84	38,85	43,58
1600	5,5	25,60	27,56	29,92
		Δ/Y$_н$		
400	4,5	27,67	35,21	44,84
630	5,5	23,36	29,07	36,48
1000	5,5	19,32	22,24	26,31
1600	5,5	17,11	18,44	20,44

Для всех трансформаторов с одинаковыми схемой соединения обмоток и напряжением короткого замыкания произведение $S_{ном} \cdot \left(Z_{тр}^{(1)}/3 \right) = \beta \approx const$ (с учетом сопротивления питающей энергосистемы – при сопоставимом отношении сопротивлений $x_с / x_{тр}$). Отсюда можно найти значение $Z_{тр}^{(1)}/3$ для трансформатора другой мощности, в том числе старого типа.

Пример 2.17.

Вычислить ток однофазного КЗ с учетом переходных сопротивлений на зажимах трансформатора мощностью 400 кВА, $u_{КЗ}$ = 4,5 %, соединение обмоток Y/Y$_н$, присоединенного к энергосистеме сопротивлением $x_с = 0{,}1x_{тр}$.

Решение.

По таблице 2.1 для данного трансформатора $x_{1тр} = x_{2тр}$ = 17,1 мОм; $r_{1тр} = r_{2тр}$ = 5,5 мОм; $x_{0тр}$ = 148,7 мОм; $r_{0тр}$ = 55,6 мОм. Сопротивление системы $x_с$ = 1,71 мОм; $r_с \approx 0$; $R_{пер}$ = 15 мОм. По соотношению (2.81) имеем:

$$Z_{\Sigma}^{(1)}/3 = \sqrt{\left(x_{1\text{тр}} + x_{2\text{тр}} + x_{0\text{тр}} + 2x_{\text{с}}\right)^2 + \left(r_{1\text{тр}} + r_{2\text{тр}} + r_{0\text{тр}} + 2r_{\text{с}} + 3R_{\text{пер}}\right)^2}/3 =$$

$$= \sqrt{\left(2\cdot 17{,}1 + 148{,}7 + 2\cdot 1{,}71\right)^2 + \left(2\cdot 5{,}5 + 55{,}6 + 2\cdot 0 + 3\cdot 15\right)^2}/3 = 72{,}4 \text{ мОм}.$$

Приняв в соотношении (2.80) $z_{\text{ф}-0} = 0$, получим:

$$I_{\text{КЗ R}}^{(1)} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\Sigma}^{(1)}/3} = \frac{400/\sqrt{3}}{72{,}4} = 3{,}2 \text{ кА}.$$

Пример 2.18.

Для трансформатора мощностью 750 кВА, имеющего схему соединения обмоток $Y/Y_{\text{н}}$ и $u_{\text{КЗ}} = 5{,}5$ %, определить $Z_{\text{тр}}^{(1)}/3$ при $x_{\text{с}} / x_{\text{тр}} = 0{,}1$.

Решение.

По таблице 2.6 для трансформаторов 630–1600 кВА, имеющих $u_{\text{КЗ}} = 5{,}5$ % и схему соединения обмоток $Y/Y_{\text{н}}$, при $x_{\text{с}} / x_{\text{тр}} = 0{,}1$ произведение $S_{\text{ном}} \cdot \left(Z_{\text{тр}}^{(1)}/3\right) \approx 27000$. Следовательно, для трансформатора $S_{\text{ном}} = 750$ кВА (при прочих равных условиях) $Z_{\text{тр}}^{(1)}/3 \approx 27000/750 = 36$ мОм.

2.6. Расчет токов короткого замыкания при питании от аварийных генераторов

Аварийные генераторы предназначены для электроснабжения при потере основных источников питания и обычно имеют небольшую мощность. Они подключаются либо непосредственно к шинам 0,4 кВ, либо через понижающие трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Расчет токов КЗ выполняется только с целью выбора уставок и проверки чувствительности и селективности действия защит, так как по отключающей способности аппаратура рассчитана на работу от более мощных основных источников питания.

В зависимости от расчетных условий максимальным может оказаться ток однофазного или трехфазного КЗ, минимальным – ток трех-, двух- или однофазного КЗ. Например, ток однофазного КЗ может оказаться максимальным (по сравнению с другими видами КЗ) на зажимах генератора и минимальным – в удаленных точках сети.

Особенности расчета токов короткого замыкания при питании от источников ограниченной мощности подробно рассмотрены в [15].

2.7. Влияние нагрузки на ток короткого замыкания

Нагрузка может оказывать существенное влияние на токи короткого замыкания. На рис. 2.18 приведены простейшие схемы включения нагрузки. В нормальном режиме сопротивление нагрузки определяется по соотношению:

$$z_{\text{н}} = \frac{U}{\sqrt{3} I_{\text{н}}} = \frac{U^2}{S}, \qquad (2.82)$$

где U – расчетное напряжение, равное вторичному напряжению питающего трансформатора;

$I_{\text{н}}$ и $S_{\text{н}}$ – ток и мощность нагрузки.

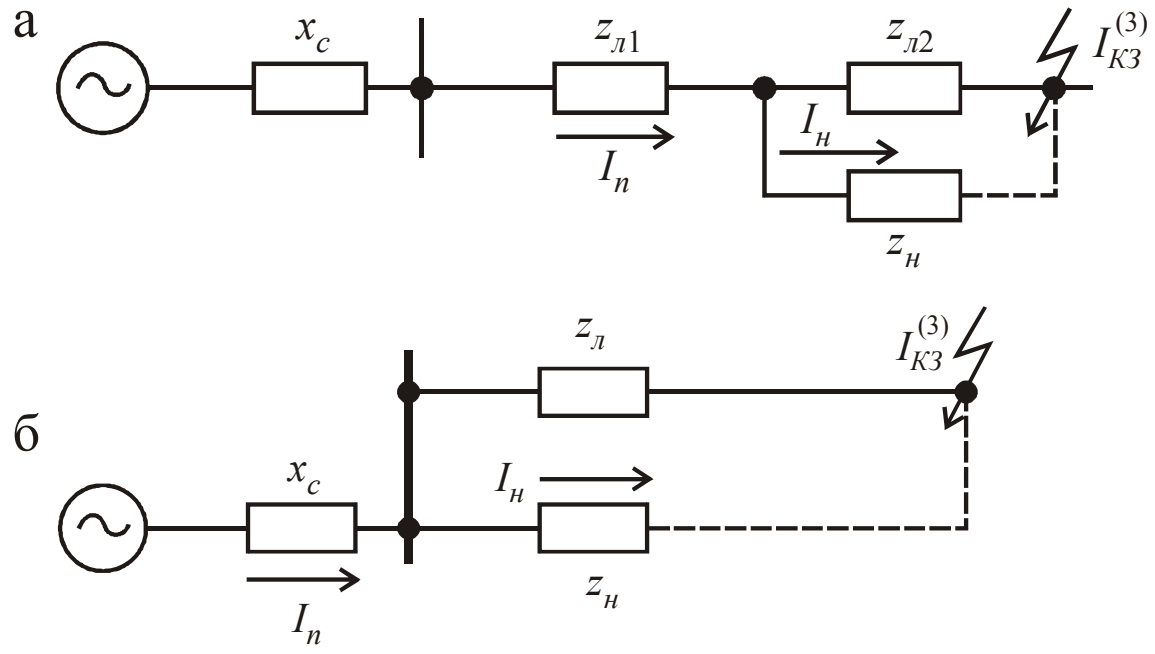


Рис. 2.18. Распределение тока с учетом нагрузки, подключенной к линии (а) и к шинам (б)

Характер нагрузок и соотношения их разные (асинхронные и синхронные двигатели, бытовая нагрузка, освещение), величина меняется в разные дни года, время суток, для различной сменности работ предприятий. Определить действительное значение нагрузки и увеличение ее сопротивления в момент короткого замыкания практически невозможно.

Условно считается, что сопротивление нагрузки постоянно по величине, имеет $\cos\varphi = 0{,}8$ и величину $z_{\text{н}}$, определенную по (2.82). Мощность нагрузки $S_{\text{н}}$ принимается в зависимости от числа питающих трансформаторов. При одном трансформаторе мощность нагрузки

принимается равной мощности трансформатора. При двух одинаковых трансформаторах мощность нагрузки принимается равной 0,65–0,7 мощности одного трансформатора. При аварийном отключении одного из двух трансформаторов всю нагрузку должен принять оставшийся в работе трансформатор. Нагрузка его при этом составит 130–140 % номинальной мощности.

Из рис. 2.18 видно, что при удаленном КЗ, когда напряжение на шинах снижается не до нуля, полный ток $I_{\text{п}}$, проходящий через трансформатор, состоит из тока, ответвляющегося в нагрузку $I_{\text{н}}$, и тока в месте короткого замыкания $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$. Для схемы на рис. 2.18, а полный ток определится по соотношению:

$$I_{\text{п}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(z_{\text{с}} + z_{\text{л1}} + \dfrac{z_{\text{н}} \cdot z_{\text{л2}}}{z_{\text{н}} + z_{\text{л2}}} \right)}, \tag{2.83}$$

а для схемы на рис. 2.18, б – по соотношению:

$$I_{\text{п}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(z_{\text{с}} + \dfrac{z_{\text{н}} \cdot z_{\text{л}}}{z_{\text{н}} + z_{\text{л}}} \right)}, \tag{2.84}$$

В действительности сопротивления $z_{\text{с}}$, $z_{\text{н}}$, $z_{\text{л}}$ имеют разные соотношения *x/r* и вычислять токи по формулам (2.83) и (2.84) следовало бы в комплексной форме. Но для большинства сетей отношение *z* и *L* нагрузки и линий близки, $z_{\text{с}}$ мало по сравнению с $z_{\text{л}}$, и для упрощения расчетов уравнения (2.83) и (2.84) решаются в полных сопротивлениях *z*. Такое допущение тем более оправдано, что действительная нагрузка в момент КЗ неизвестна.

Полный ток $I_{\text{п}}^{(3)}$ делится на две части: часть тока $I_{\text{КЗ}}^{(3)}$, идущая к месту КЗ в схеме на рис. 2.18, а, определяется:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left[z_{\text{с}} + z_{\text{л1}} + z_{\text{л2}} + \dfrac{\left(z_{\text{с}} + z_{\text{л1}} \right) \cdot z_{\text{л2}}}{z_{\text{н}}} \right]}, \tag{2.85}$$

а для схемы на рис. 2.18, б – по формуле:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\left(z_{\text{с}} + z_{\text{л}} + \dfrac{z_{\text{с}} \cdot z_{\text{л}}}{z_{\text{н}}} \right)}, \tag{2.86}$$

Из выражения (2.86) видно, что при $z_с = 0$ ток к месту КЗ составляет $I_{КЗ}^{(3)} = \dfrac{U_{ном}}{\sqrt{3} z_л}$, то есть нагрузка не влияет на значение тока короткого замыкания, если она подключена к шинам бесконечной мощности.

Анализ выражений (2.83)–(2.86) и рис. 2.18 позволяет сделать следующие выводы:

- в схеме на рис. 2.18, а при отсутствии нагрузки ток в месте КЗ и ток, проходящий через трансформатор от системы, близки по значению;
- при наличии нагрузки ток в месте КЗ по схеме на рис. 2.18, а наименьший, по нему проверяется чувствительность защит сети; ток от системы через трансформатор наибольший, по нему согласовываются защиты трансформатора и сети.

Пример 2.19.

От шин подстанции с трансформатором мощностью 630 кВА и вторичным напряжением 0,4 кВ питаются две линии. Первая выполнена кабелем с алюминиевыми жилами 4×50 мм^2, вторая – алюминиевым проводом А–50. Длина каждой линии 100 м. Ток трехфазного короткого замыкания на шинах 0,4 кВ равен $I_{КЗ.Ш}^{(3)}$ 2000 А. Определить ток трехфазного КЗ в конце кабельной линии с учетом нагрузки.

Решение.

Ток в месте короткого замыкания с учетом нагрузки определяется по соотношению (2.86). Входящие в это выражение сопротивления рассчитываются:

- сопротивление системы:

$$z_с = \frac{U}{\sqrt{3} I_{КЗ.Ш}^{(3)}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 2000} = 0{,}115 \text{ Ом};$$

- погонные сопротивления кабеля 4×50 мм^2 по [4, табл. 6.13] равны: $r_{ок} = 0{,}625$ мОм/м, $x_{ок} = 0{,}0625$ мОм/м; полное сопротивление кабельной линии составляет:

$$z_{кл} = \sqrt{(r_{ок} \cdot l)^2 + (x_{ок} \cdot l)^2} = \sqrt{(0{,}625 \cdot 100)^2 + (0{,}0625 \cdot 100)^2} = 62{,}812 \text{ мОм} \approx 0{,}063 \text{ Ом};$$

- сопротивление нагрузки определяется по соотношению (2.82):

$$z_н = \frac{U^2}{S_{тр}} = \frac{400^2}{630 \cdot 1000} = 0{,}254 \text{ Ом}.$$

Ток трехфазного короткого замыкания в конце кабельной линии с учетом нагрузки составляет:

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3}\left(z_с + z_{кл} + \dfrac{z_с \cdot z_{кл}}{z_н}\right)} = \frac{400}{\sqrt{3}\left(0{,}115 + 0{,}063 + \dfrac{0{,}115 \cdot 0{,}063}{0{,}254}\right)} = 1127{,}5 \text{ А},$$

а без учета нагрузки:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3}\sqrt{(x_{\text{с}} + x_{\text{кл}})^2 + r_{\text{кл}}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{(0{,}115 + 0{,}00625)^2 + 0{,}0625^2}} = 1695\,\text{А}.$$

Полный ток через трансформатор:

$$I_{\text{п}}^{(3)} = \frac{U}{\sqrt{3}\left(z_{\text{с}} + \dfrac{z_{\text{н}} \cdot z_{\text{кл}}}{z_{\text{н}} + z_{\text{кл}}}\right)} = \frac{400}{\sqrt{3}\left(0{,}115 + \dfrac{0{,}115 \cdot 0{,}063}{0{,}115 + 0{,}063}\right)} = 1485\,\text{А}.$$

Ток, уходящий в нагрузку:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{п}}^{(3)} - I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 1485 - 1127{,}5 = 357{,}5\,\text{А}.$$

Номинальный ток нагрузки при номинальном напряжении:

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{тр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909\,\text{А}.$$

Сопротивление нагрузки определяется мощностью трансформатора: чем больше мощность трансформатора, тем больше мощность нагрузки, меньшее ее сопротивление, поэтому при увеличении мощности питающего трансформатора полный ток через трансформатор увеличивается, а ток в месте короткого замыкания уменьшается.

Ток нагрузки определяется простым вычитанием. Это связано с тем, что все сопротивления $z_{\text{с}}$, $z_{\text{н}}$, $z_{\text{л}}$ условно приняты с одинаковым отношением r/x, вследствие чего все токи совпадают по фазе.

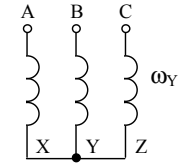
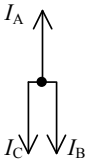
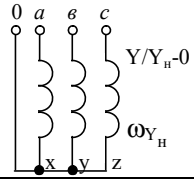
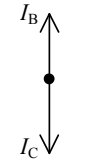
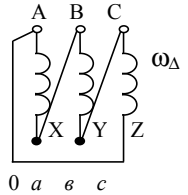
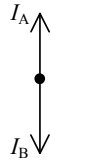
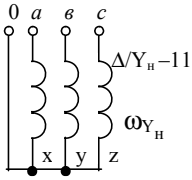
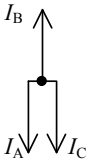
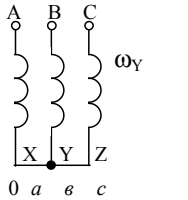
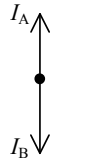
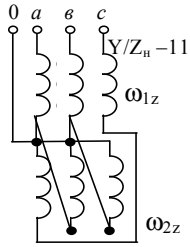
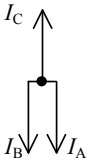
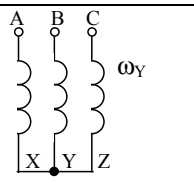
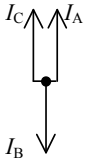
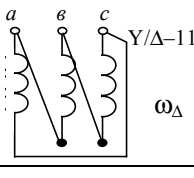
2.8. Несимметричные короткие замыкания за трансформаторами

Для расчета защит трансформаторов необходимо знать значение и направление токов в первичной обмотке трансформатора при КЗ на его вторичной стороне. В таблице 2.9 даются выражения для пересчета токов и их векторные диаграммы. Особенностью приведенных в таблице 2.9 выражений является то, что за исключением однофазного КЗ за трансформатором со схемой соединения $\text{Y} / \text{Y}_{\text{н}}$ все токи при разных видах коротких замыканий и разных схемах соединений обмоток трансформатора выражены через ток трехфазного КЗ в той же точке $I_{\text{кз}}^{(3)}$. При выводе выражений принято, что коэффициент трансформации трансформатора равен отношению линейных напряжений холостого хода $\text{U}_{1\text{х}} / \text{U}_{2\text{х}} = 1$. По этому условию определены и соотношения чисел витков обмоток трансформатора.

Пользоваться выражениями, приведенными в таблице 2.9, можно двояко: или определить ток требуемого вида КЗ, приведенный ко вторичному напряжению U_2, и пересчитать его по действительному коэффициенту трансформации на первичную сторону, или вести расчет для трехфазного КЗ, относя ток и сопротивления к первичному напряжению U_1 и по выражениям таблицы 2.9 определить токи при требующемся виде КЗ.

Таблица 2.9

Значения и векторные диаграммы токов несимметричных коротких замыканий при разных схемах соединений обмоток трансформаторов

Схема соединений обмоток	Вид КЗ	Ток КЗ на вторичной стороне при $U_1/U_2 = 1$				Количество витков
		в месте КЗ		на первичной стороне		
	*a – 0*		$I_a = \frac{3U_ф}{z_{тр}^{(1)}}$		I_A=2/3 I_a I_B=I_C=1/3 I_a	$\omega_Y=\omega_{Yн}$
	*b – c*		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}$		$I_B=I_C=\frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}=$ $= 0{,}866\, I_{кз}^{(3)}$	
	*a – 0*		$I_a = \frac{3U_ф}{z_{тр}^{(1)}} = \frac{U_ф}{z_{тр}} = I_{кз}^{(3)}$		$I_A = I_B = \frac{I_a}{\sqrt{3}} =$ $= 0{,}58\, I_{кз}^{(3)}$	$\omega_\Delta=\sqrt{3}\,\omega_Y$
	*b – c*		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}$		$I_B = \frac{2}{\sqrt{3}} I_b = I_{кз}^{(3)}$ $I_A = I_C = \frac{I_B}{2}$	
	*a – 0*		$I_a = \frac{3U_ф}{z_{тр}^{(1)}} = \frac{U_ф}{z_{тр}} = I_{кз}^{(3)}$		$I_A = I_B = \frac{I_a}{\sqrt{3}} =$ $= 0{,}58\, I_{кз}^{(3)}$	$\omega_{1z}=\omega_{2z}=$ $=\omega_Y / \sqrt{3}$
	*b – c*		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}$		$I_C = \frac{2}{\sqrt{3}} I_в = I_{кз}^{(3)}$ $I_B = I_A = \frac{I_C}{2}$	
	*b – c*		$I_b = I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}$		$I_A = I_C = \frac{I_B}{2}$ $I_B = \frac{2}{\sqrt{3}} I_b = I_{кз}^{(3)}$	$\omega_\Delta=\sqrt{3}\,\omega_Y$
						

Пример 2.20.

Определить токи трех-, двух- и однофазного КЗ на выводах низшего напряжения трансформатора 400 кВА, 6/0,4 кВ при схемах соединений обмоток Y / $Y_н$ и Δ / $Y_н$. Питание от системы бесконечной мощности.

Решение.

Соединение обмоток **Δ / $Y_н$**. Расчет для напряжения 0,4 кВ. Сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению 0,4 кВ, по таблице 2.1 равно $z_{тр} = 0{,}018$ Ом. Ток однофазного и трехфазного КЗ, отнесенные к стороне 0,4 кВ, составляет:

$$I_{кз}^{(1)} = I_{кз}^{(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\ z_{тр}} = \frac{400}{\sqrt{3}\ 0{,}018} = 12900\ \text{А}.$$

Ток двухфазного КЗ:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} 12900 = 11200\ \text{А}.$$

Расчет для напряжения 6 кВ. Сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению 6 кВ, равно:

$$z_{тр} = \frac{u_{кз}\ U_{ном}}{100\ S_{ном}} = \frac{4{,}5 \cdot (6 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 400 \cdot 10^3} = 4{,}05\ \text{Ом},$$

а ток трехфазного КЗ составляет:

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}\ z_{тр}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}\ 4{,}05} = 860\ \text{А}.$$

Такое же значение получится пересчетом тока $I_{кз}^{(3)}$, отнесенного к 0,4 кВ, на напряжение 6 кВ: 12900·400 / 6000 = 860 А.

Ток $I_{кз}^{(1)}$, отнесенный к 6 кВ, по таблице 2.9 равен:

$$I_{кз}^{(1)} = 0{,}58\ I_{кз}^{(3)} = 0{,}58 \cdot 860 = 500\ \text{А}.$$

Такой ток протекает в двух фазах на стороне 6 кВ. Аналогичное значение тока получается пересчетом с напряжения 0,4 кВ на напряжение 6 кВ: 0,58·12900·400 / 6000 = 500 А.

Наибольший ток двухфазного КЗ со стороны 6 кВ по таблице 2.9 равен току трехфазного КЗ: $I_{кз}^{(2)} = I_{кз}^{(3)} = 860$ А; в двух других фазах – вдвое меньше – 430 А.

Соединение обмоток **Y / $Y_н$**. Ток трехфазного КЗ от схемы соединений обмоток не зависит и равен 12900 А на стороне 0,4 кВ и 860 А на стороне 6 кВ.

Ток двухфазного КЗ на стороне 0,4 кВ также не зависит от схемы соединения обмоток и равен 11200 А.

Для схемы соединений Y / $Y_н$ ток двухфазного КЗ со стороны 6 кВ равен:

$$I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 860 = 745\ \text{А}.$$

Для однофазного КЗ сопротивление трансформатора $z_{тр}^{(1)} = 0{,}195$ Ом (табл. 2.1), а ток:

$$I_{\text{кз}}^{(1)} = \frac{3\,U_{\text{ф}}}{z_{\text{тр}}^{(1)}} = \frac{3 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0{,}195} = 3570 \text{ А}$$

вместо 12900 А для соединения $\Delta / Y_{\text{н}}$. Со стороны 6 кВ максимальный ток будет равен $\frac{2}{3} 3570 \frac{400}{6000} = 159$ А; в двух других фазах токи в 2 раза меньше и равны 79,5 А.

Результаты расчета сведены в таблицу 2.10.

Малое значение тока при однофазных КЗ для схемы соединений $Y / Y_{\text{н}}$ значительно затрудняет выполнение защиты таких трансформаторов и вынуждает применять более сложные защиты с увеличенным количеством реле и трансформаторов тока.

Таблица 2.10

Значения токов короткого замыкания (для примера)

Напряжение, кВ	Схема соединений	$I_{\text{кз}}^{(3)}$	$I_{\text{кз}}^{(2)}$	$I_{\text{кз}}^{(1)}$
0,4	$\Delta / Y_{\text{н}}$ $Y / Y_{\text{н}}$	12900 12900	11200 11200	12900 3570
6	$\Delta / Y_{\text{н}}$ $Y / Y_{\text{н}}$	860 860	860 / 430 745	500 159 / 79,5

2.9. Тестовые и расчетные задания по определению токов короткого замыкания

При выполнении заданий данного раздела рекомендуется, кроме материала пособия, пользоваться также и приведенной в библиографическом списке литературой [4, 8–10, 13].

2.9.1. Тестовые задания

Инструкция: в заданиях 1–25 дополните или вставьте пропущенное.

1. Короткое замыкание – замыкание, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая …… .

2. …… – короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной системе.

3. …… – короткое замыкание на землю в трехфазной системе с глухо заземленными или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.

4. Двойное короткое замыкание на землю – совокупность …… в различных, но электрически связанных частях электроустановки.

5. Несимметричное короткое замыкание – короткое замыкание в электроустановке, при котором ……. .

6. Установившийся ток короткого замыкания – значение тока короткого замыкания после затухания …… этого тока и прекращения изменения тока от воздействия устройств …… .

7. Термическое действие тока короткого замыкания – тепловое действие тока КЗ, вызывающее ……. .

8. Минимальный ток однофазного металлического короткого замыкания определяется для ……. .

9. Одна из особенностей расчета токов КЗ в сетях 0,4 кВ – учет активных и индуктивных сопротивлений всех элементов цепи короткого замыкания. Сопротивления автоматических выключателей, рубильников и переходные сопротивления принимают …… .

10. Для обеспечения точности расчетов токов КЗ в сетях до 1000 В сопротивление дуги в месте короткого замыкания необходимо учитывать как постоянную величину, равную …….. при трехфазных КЗ и ……. при однофазных КЗ.

11. При трехфазном коротком замыкании ток определяется фазным напряжением и результирующим полным сопротивлением z_{Σ} одной фазы. Схема замещения имеет вид …… .

12. Токи двух- и трехфазного короткого замыкания связаны соотношением …… .

13. Наибольшее амплитудное значение полного тока наблюдается через …….. после начала короткого замыкания. Этот ток называется …….. короткого замыкания.

14. Проверка термической стойкости и невозгораемости кабелей должна производиться по наибольшему расчетному значению …...

15. Основной защитой от коротких замыканий в электроустановках до 1000 В является …… , реагирующий на …… значения токов.

16. Несимметричный режим работы трехфазной сети представляется в виде геометрической суммы трех симметричных составляющих тока и напряжения – это составляющие ……. .

17. Полное сопротивление петли фаза–нуль состоит из сопротивлений ……. от трансформатора до точки короткого замыкания.

18. При однофазном коротком замыкании в TN–S системе возможны два повреждения: замыкание фазы на нулевой рабочий проводник N и замыкание фазы на нулевой защитный проводник PE. Эти два случая могут существенно отличаться величиной сопротивлений нулевой последовательности, если отличаются …….. .

19. При расчете сопротивлений одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена среднего напряжения необходимо учитывать, что токи в металлических экранах приводят к увеличению …….. и снижению ……. .

20. При расчете сопротивления нулевой последовательности в сети до 1000 В, выполненной кабелем, необходимо учитывать параметры …….. и параметры ……., по которым возможно протекание токов нулевой последовательности.

21. Рекомендуется обмотки трансформаторов мощностью 400 кВА и выше включать по схеме ……., а трансформаторы от 250 кВА и ниже – по схеме …….. .

22. Схема соединения обмоток трансформаторов $Y/Y_н$ может применяться при необходимости ограничения ……. с целью повышения устойчивости коммутационной аппаратуры.

23. В несимметричном режиме магнитные потоки нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ замыкаются через …….., что определяет величину сопротивлений нулевой последовательности.

24. Сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ снижаются с помощью симметрирующего устройства (СУ). Обмотка СУ уложена в виде бандажа поверх обмотки высокого напряжения трансформатора и включена в ……. .

25. Расчеты остаточных напряжений достаточно проводить для ……., если не требуется определять напряжения между здоровой и поврежденными фазами при ……. .

Инструкция: в заданиях 26–64 с выбором одного правильного ответа из предложенных обведите кружком номер правильного ответа.

26. Трехфазное короткое замыкание – это короткое замыкание:
    1) при котором с землей соединяются три фазы;
    2) между тремя фазами в трехфазной системе;
    3) каждой из трех фаз на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки.

27. Однофазное короткое замыкание – это короткое замыкание:
    1) между различными точками электроустановки;
    2) на землю

в трехфазной системе с глухо заземленными или эффективно заземленными нейтралями силовых элементов, при котором:
    1) одна из фаз соединена с другой фазой и землей;
    2) с изолированным от земли корпусом электроустановки соединяется только одна фаза;
    3) с землей соединяется только одна фаза.

28. Короткое замыкание в электроустановке, при котором все ее фазы находятся в одинаковых условиях, относится к:
    1) симметричным;
    2) устойчивым;
    3) неизменяющимся;
    4) установившимся

коротким замыканиям.

29. Удаленным КЗ считается короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды:
    1) периодической;
    2) апериодической

составляющей тока данного источника энергии в начальный и произвольный момент времени:
    1) изменяются под действием автоматических регуляторов возбуждения синхронных машин;
    2) существенно отличаются;
    3) различаются в $\sqrt{2}$;
    4) практически одинаковы;
    5) практически одинаковы, а рабочая частота различается в 2 раза.

30. Короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и произвольный момент времени существенно отличаются, считается:

1) удаленным;
2) неустойчивым;
3) изменяющимся;
4) близким

коротким замыканием.

31. Наибольшее возможное мгновенное значение тока КЗ называется:

1) установившимся;
2) отключаемым;
3) ударным;
4) переходным;
5) сверхпереходным

током короткого замыкания.

32. Сквозной ток короткого замыкания:

1) ток КЗ после окончания переходного процесса;
2) ток КЗ электрической цепи в момент начала расхождения дугогасительных контактов ее коммутационного электрического аппарата;
3) ток, проходящий через включенный коммутационный электрический аппарат при внешнем коротком замыкании.

33. При выборе аппаратуры расчетным считается:

1) аварийный;
2) послеаварийный;
3) ремонтный;
4) минимальный;
5) максимальный

режим работы системы электроснабжения.

34. При проверке чувствительности защит расчетным является:

1) аварийный;
2) послеаварийный;
3) ремонтный;
4) минимальный;
5) максимальный

режим работы системы электроснабжения.

35. Остаточное напряжение при КЗ через дугу используется для:

1) корректировки работы дифференциальной защиты;
2) проверки чувствительности максимальных токовых защит с пуском по напряжению;
3) настройки газового реле,

устанавливаемых на трансформаторах.

36. Погонное индуктивное сопротивление прямоугольных шин определяется по справочникам или рассчитывается по соотношению:

1) $x_0 = 0{,}1445 \cdot h \cdot \lg \dfrac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h}$;

2) $x_0 = 0{,}1445 \cdot \lg \dfrac{h}{4 \cdot a_{\text{ср}}}$;

3) $x_0 = 0{,}1445 \cdot \lg \dfrac{4 \cdot a_{\text{ср}}}{h}$;

где h – высота шины,

$a_{\text{ср}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами 1, 2 и 3, которое вычисляется:

1) $a_{\text{ср}} = a_{12} \sqrt[3]{a_{13} \cdot a_{23}}$;
2) $a_{\text{ср}} = \sqrt{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}$;
3) $a_{\text{ср}} = (a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23})^{-1/3}$;
4) $a_{\text{ср}} = (a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23})^{1/3}$.

37. Активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки трансформатора тока определяют:

1) по справочникам;
2) $r_{\text{тр}} = \dfrac{\Delta P_{\text{КЗ}} \cdot U^2_{\text{ном}}}{S^2_{\text{ном}}}$; $\quad x_{\text{тр}} = \sqrt{\left(\dfrac{u_{\text{КЗ}}}{100}\right)^2 - \left(\dfrac{\Delta P_{\text{КЗ}}}{S_{\text{ном}}}\right)^2} \cdot \dfrac{U^2_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}}$;
3) $r_{\text{тр}} = r_0 \cdot l$; $\quad x_{\text{тр}} = x_0 \cdot l$;

где $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе;
$u_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;
$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора;
r_0, x_0 – погонные сопротивления обмотки;
l – длина обмотки;
$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение трансформатора.

38. При расчете токов КЗ в схему замещения цепи вводится активное сопротивление 15 мОм с целью:

1) оценки термической стойкости коммутационной аппаратуры;
2) учета сопротивления петли фаза–нуль;

3) оценки влияния сопротивления питающей энергосистемы на токи КЗ;

4) определения минимального тока КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения.

39. При выборе аппаратуры влиянием токоограничивающего действия дуги в месте КЗ можно пренебречь, если:

1) распределительная сеть выполнена кабелями сечением больше 70 мм^2;

2) мощность трансформатора менее 400 кВА;

3) распределительные шкафы (пункты) запитаны по радиальной схеме;

4) потребители подключены непосредственно к щиту 0,4 кВ подстанции.

40. При проверке чувствительности защит влиянием токоограничивающего действия дуги в месте КЗ можно пренебречь, если:

1) сеть требует защиты от перегрузки;

2) защита выполнена на основе селективных автоматов;

3) мощность трансформатора менее 250 кВА;

4) распределительная сеть выполнена кабелями сечением менее 35 мм^2;

5) не обеспечивается селективность защиты на участках от щита 0,4 кВ до электроприемников, включая защитный аппарат отходящей от щита линии.

41. При трехфазном КЗ ток $I_{КЗ}^{(3)}$ определяется фазным напряжением $U_ф$ и результирующим полным сопротивлением z_Σ одной фазы. Расчет выполняется по соотношению:

1) $I_{КЗ}^{(3)} = \dfrac{U_ф}{3 \cdot z_\Sigma}$;

2) $I_{КЗ}^{(3)} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot U_ф}{z_\Sigma}$;

3) $I_{КЗ}^{(3)} = \dfrac{U_{лин}}{\sqrt{3} \cdot z_\Sigma}$;

4) $I_{КЗ}^{(3)} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot U_{лин}}{z_\Sigma}$,

где $U_{лин}$ – линейное напряжение сети.

42. Минимальный ток трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения:

1) зависит;

2) почти не зависит

от режима работы питающей системы и определяется:

1) $I^{(3)}_{\text{КЗ R}} = \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{\left(x_{\Sigma}+X_{\text{пер}}\right)^2+\left(r_{\Sigma}+R_{\text{пер}}\right)^2}}$;

2) $I^{(3)}_{\text{КЗ R}} = \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_{\Sigma}^2+r_{\Sigma}^2}}$;

3) $I^{(3)}_{\text{КЗ R}} = \dfrac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{x_{\Sigma}^2+\left(r_{\Sigma}+R_{\text{пер}}\right)^2}}$,

где x_{Σ} и z_{Σ} – индуктивное и активное результирующие сопротивления цепи КЗ без учета сопротивлений рубильников, автоматов, вставных контактов, болтовых соединений;

$X_{\text{пер}}$ и $R_{\text{пер}}$ – переходные сопротивления, совокупно учитывающие сопротивление дуги и контактных соединений, $R_{\text{пер}}$ рекомендуется принимать 15 мОм;

$U_{\text{ном}}$ – среднее номинальное напряжение сети.

43. Среднее (наиболее вероятное) значение тока трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги для любого расчетного случая определяется по выражению:

$$I^{(3)}_{\text{КЗ ср}} = \kappa_{\text{н}}\,\frac{I^{(3)}_{\text{КЗ max}} + I^{(3)}_{\text{КЗ R}}}{2},$$

где $I^{(3)}_{\text{КЗ max}}$ – максимальный ток трехфазного металлического КЗ при максимальном режиме работы питающей энергосистемы;

$I^{(3)}_{\text{КЗ R}}$ – минимальный ток трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения;

$\kappa_{\text{н}}$ – коэффициент:

1) нулевой последовательности;
2) дополнительного нагрева;
3) нагрузки;
4) надежности.

44. Численное значение ударного коэффициента зависит от:

1) отношения результирующих сопротивлений цепи короткого замыкания x_{Σ}/z_{Σ};
2) расчетного тока трехфазного КЗ;
3) продолжительности КЗ.

45. Численное значение ударного коэффициента определяется по графику или рассчитывается по:

1) $\kappa_{\text{уд}} = 1+\exp\left(-\,0{,}01/T_{\text{а}}\right)$; 3) $\kappa_{\text{уд}} = 1-\exp\left(-\,0{,}01/T_{\text{а}}\right)$;

2) $\kappa_{\text{уд}} = 1 + \exp\left(-0{,}1 / T_{\text{а}}\right)$; 4) $\kappa_{\text{уд}} = 1 - \exp\left(-0{,}1 / T_{\text{а}}\right)$,

где $T_{\text{а}}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

46. При коротком замыкании активное сопротивление проводов и кабелей:

1) остается неизменным;
2) увеличивается;
3) уменьшается

следствием чего является:

1) увеличение;
2) уменьшение;
3) стабильность

тока короткого замыкания.

47. Расчетная продолжительность КЗ при проверке кабелей на невозгораемость выбирается исходя из полного времени отключения КЗ резервной защитой. В качестве резервной защиты в электроустановках до 1000 В используют:

1) электромагнитные расцепители;
2) расцепители минимального напряжения;
3) независимые расцепители;
4) расцепители с обратнозависимой защитной характеристикой.

48. При использовании в качестве резервной защиты расцепителя с обратнозависимой защитной характеристикой рекомендуется проверить кабели на невозгораемость по току КЗ в точке, находящейся:

1) в начале линии;
2) в месте перехода кабеля одного сечения к кабелю другого сечения;
3) в конце кабельной линии за резервирующим защитным аппаратом.

49. При приведении сопротивлений к расчетному напряжению для повышения точности расчета необходимо пользоваться:

1) средними номинальными напряжениями;
2) действительными номинальными напряжениями холостого хода;
3) напряжениями короткого замыкания

трансформаторов.

50. Учет подпитки места КЗ электродвигателями необходим при выборе аппаратуры на:

1) основном щите КТП;
2) вторичных сборках 0,4 кВ;
3) третичных сборках 0,4 кВ.

51. В сетях предприятий встречается параллельное включение двух элементов. Полное эквивалентное сопротивление такой схемы $z_{эк}$:

1) $z_{эк} = \dfrac{z_1 \cdot z_2}{z_1 + z_2}$;

2) $z_{эк} = \dfrac{z_1 \cdot z_2}{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}$;

3) $z_{эк} = \dfrac{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}{\sqrt{x_1^2 + r_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + r_2^2}}$;

4) $z_{эк} = \dfrac{z_1 \cdot z_2}{\sqrt{(x_1 + x_2)^2 + (r_1 + r_2)^2}}$,

где r_1, r_2, x_1, x_2, z_1, z_2 –активное, реактивное и полное сопротивления параллельно включенных элементов, соответственно.

52. В системе TN–C при однофазном коротком замыкании возможны повреждения в виде замыкания фазы на:

1) нулевой рабочий проводник;
2) нулевой защитный проводник;
3) совмещенный нулевой рабочий и защитный проводник;
4) другой фазный проводник.

53. В системе TN–S при однофазном коротком замыкании на нулевой рабочий проводник токи нулевой последовательности возвращаются к источнику питания по:

1) N–проводнику;
2) PE–проводнику;
3) PEN–проводнику,

не связанному с заземляющим устройством со стороны потребителя.

54. В расчетах полного сопротивления прямой и обратной последовательностей кабелей несимметричной конструкции используются:

1) справочные данные для трехжильных кабелей;
2) справочные данные для одножильных кабелей;
3) среднее значение индуктивности жилы кабеля.

55. Среднее расстояние между центрами жил одножильных кабелей, проложенных в одной плоскости на расстоянии l между центрами, составляет:

1) $l_{ср} = l \cdot \sqrt{3}$; 3) $l_{ср} = l \cdot \left(\sqrt{2}\right)^{1/3}$;

2) $l_{ср} = l \cdot \sqrt{2}$; 4) $l_{ср} = l \cdot \sqrt[3]{2}$,

и используется для расчета:

1) коэффициента формы жилы кабеля;
2) средней индуктивности жилы кабеля;
3) потерь энергии в металлическом экране кабеля.

56. Индуктивное сопротивление кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в трехфазной сети зависит от:

1) взаимного расположения кабелей;
2) температуры окружающей среды;
3) диэлектрических свойств сшитого полиэтилена;
4) степени разветвления кабелей сети,

эта зависимость особенно проявляется при параллельной прокладке:

1) в плоскости;
2) треугольником

двух и более кабелей на одну фазу.

57. Металлическая оболочка или броня из ферромагнитных материалов:

1) не влияют на;
2) уменьшают;
3) увеличивают

индуктивность силового кабеля.

58. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения обмоток $Y/Y_н$ можно определить:

1) аналитически;
2) графически;
3) графоаналитически;
4) только экспериментально.

59. Сопротивления прямой последовательности трансформаторов с разными схемами соединения обмоток определяются:

1) аналитически по справочным данным;
2) графически;
3) графоаналитически;
4) только экспериментально.

60. Для трансформаторов со схемами соединения обмоток $\Delta/Y_н$ ток однофазного короткого замыкания на выводах 0,4 кВ:

1) существенно меньше;
2) равен;
3) больше

тока трехфазного короткого замыкания.

61. При несимметричной нагрузке магнитные потоки нулевой последовательности в трансформаторе со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ замыкаются через бак, крышку и дно, разогревают их. Это:

1) ухудшает охлаждение активной части трансформатора;
2) способствует разложению трансформаторного масла;
3) вызывает ложные срабатывания газовой защиты.

62. В несимметричном режиме трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$ при суммарной нагрузке ниже номинальной оказывается перегруженным из-за:

1) искажения системы фазных напряжений;
2) загрузки нулевого провода сети;
3) разогрева корпуса магнитными потоками нулевой последовательности и ухудшения охлаждения активной части.

63. В сетях 380/220 В свинцовая оболочка кабеля при расчете токов однофазных КЗ в расчетную схему:

1) включается;
2) включается только совместно с нулевой жилой;
3) не включается.

64. Проводимость зануляющего проводника должна быть:

1) порядка 25 %;
2) порядка 50 %;
3) меньше 50 %

проводимости фазного проводника.

Инструкция: в заданиях 65–73 выберите все верные варианты ответов **да** или **нет** и впишите в графу **ответ**.

65. Несимметричная трехфазная система токов короткого замыкания раскладывается на ток КЗ:

	Ответ
1) продольной последовательности	да/нет
2) поперечной последовательности	да/нет
3) прямой последовательности	да/нет
4) неуравновешенной последовательности	да/нет

5) обратной последовательности да/нет
6) гармонической последовательности да/нет
7) нулевой последовательности. да/нет

66. Цель расчета токов КЗ в сетях до 1000 В:

Ответ

1) выбор проводов и кабелей да/нет
2) выбор магнитных пускателей и контакторов да/нет
3) выбор шинопроводов да/нет
4) выбор коммутационно–защитной аппаратуры да/нет
5) проверка чувствительности защит да/нет
6) проверка возможности пуска двигателей. да/нет

67. Погонное активное сопротивление прямоугольных шин зависит от:

Ответ

1) температуры окружающей среды да/нет
2) способа крепления шин да/нет
3) длины шин да/нет
4) материала изоляционных прокладок да/нет
5) материала шин да/нет
6) высоты шин да/нет
7) среднего геометрического расстояния между фазами. да/нет

68. Сопротивления силового трансформатора определяют:

Ответ

1) $z = \frac{u_{КЗ} \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном}}$ да/нет
2) $x = x_o \cdot l$ да/нет
3) $r = r_o \cdot l$ да/нет
4) $r = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}^2}$ да/нет
5) $x = \sqrt{z^2 - r^2}$ да/нет
6) $x = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{КЗ}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{КЗ}}{S_{ном}}\right)^2}$ да/нет
7) $r = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$ да/нет

где $u_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора;

$\Delta P_{КЗ}$ – потери короткого замыкания в трансформаторе;

$S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора;
$U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора;
r_0, x_0 – погонные сопротивления обмотки;
l – длина обмотки.

69. При расчете токов короткого замыкания в схему замещения цепи вводится активное сопротивление 15 мОм, которое учитывает:

Ответ

1) сопротивление питающей энергосистемы да/нет
2) сопротивление петли фаза–нуль да/нет
3) сопротивление шинопровода от силового трансформатора до распредустройства да/нет
4) все переходные сопротивления да/нет
5) сопротивление электрической дуги в месте повреждения. да/нет

70. При двухфазном КЗ поврежденная цепь питается линейным напряжением $U_{лин}$, а полное сопротивление цепи состоит из последовательно включенных результирующих полных сопротивлений z_Σ двух фаз. Расчет тока двухфазного короткого замыкания $I_{КЗ}^{(2)}$ выполняется по соотношению:

Ответ

1) $I_{КЗ}^{(2)} = \dfrac{\sqrt{3}}{2} I_{КЗ}^{(3)}$ да/нет
2) $I_{КЗ}^{(2)} = \dfrac{U_ф}{2 \cdot z_\Sigma}$ да/нет
3) $I_{КЗ}^{(2)} = \dfrac{U_{лин}}{\sqrt{3} \cdot z_\Sigma}$ да/нет
4) $I_{КЗ}^{(2)} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot U_ф}{2 \cdot z_\Sigma}$ да/нет
5) $I_{КЗ}^{(2)} = \dfrac{U_{лин}}{2 \cdot z_\Sigma}$ да/нет

где $I_{КЗ}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания;
$U_ф$ – фазное напряжение сети.

71. При определении теплового импульса тока короткого замыкания в месте установки выключателя учитывается время отключения КЗ, которое состоит из:

Ответ

1) выдержки времени срабатывания отсечки селективного автомата да/нет
2) времени задержки отключения тока короткого замыкания да/нет
3) времени гашения дуги да/нет
4) времени затухания апериодической составляющей тока КЗ да/нет
5) усредненного значения времени затухания свободных токов КЗ. да/нет

72. В системе TN–S при однофазном коротком замыкании возможны повреждения в виде замыкания фазы на:

Ответ

1) совмещенный нулевой рабочий и защитный проводник да/нет
2) нулевой рабочий проводник да/нет
3) защитный проводник да/нет
4) фазный проводник да/нет
5) два других фазных проводника. да/нет

73. Вид повреждения в TN–S системе влияет на сопротивление нулевой последовательности, если:

Ответ

1) в качестве PE-проводника использованы сторонние токопроводящие части да/нет
2) нулевой рабочий и нулевой защитный проводники одного сечения и находятся в одном кабеле с фазными да/нет
3) отличаются характер и сечения N- и PE-проводников да/нет
4) PEN-проводник имеет изменяющееся сечение да/нет
5) различается расположением N- и PE-проводников относительно фазных. да/нет

Инструкция: в заданиях 74–78 в строке **ответ** запишите букву из второго списка, которая соответствует цифре из первого списка.

74. Установите соответствие между термином и одним из приведенных определений:

1) двухфазное короткое замыкание;	А: КЗ в электроустановке, обусловленное соединением с

2) трехфазное короткое замыкание;
3) двойное короткое замыкание на землю.

землей какого-либо ее элемента
Б: совокупность двух однофазных КЗ на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки
В: КЗ между тремя фазами в трехфазной системе
Г: совокупность трех однофазных КЗ на землю в различных, но электрически связанных частях электроустановки
Д: КЗ между двумя фазами в трехфазной системе

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

75. Сопротивления отдельных элементов схемы замещения для расчета тока КЗ в сети до 1000 В по справочным данным определяются для:

1) силового трансформатора
2) первичной обмотки трансформатора тока
3) реактора

А: $x = (\omega L)^{-1}$
Б: $x = \omega L$
В: по справочнику
Г: $z = \dfrac{S}{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{ном}}^2}$
Д: $z = \dfrac{u_{\text{КЗ}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 \cdot S}$,

где L – индуктивность аппарата;
S – номинальная мощность аппарата;
$u_{\text{КЗ}}$ – напряжение короткого замыкания;
$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение аппарата.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

76. Расчетный ток металлических КЗ при питании от энергосистемы определяется:

1) трехфазного
2) двухфазного
3) однофазного

А: $I_{\text{КЗ}} = \dfrac{U_{\text{ф}}}{\dfrac{z_{\text{тр}}}{3} + z_{\text{ф}-0}}$
Б: $I_{\text{КЗ}} = \dfrac{U_{\text{ф}}}{2 \cdot z_{\Sigma}}$
В: $I_{\text{КЗ}} = \dfrac{U_{\text{ф}}}{z_{\Sigma}}$

Г: $I_{КЗ} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot U_ф}{2 \cdot z_\Sigma}$

Д: $I_{КЗ} = \dfrac{U_ф}{3 \cdot z_\Sigma}$

где $U_ф$ – фазное напряжение сети;

$z_{тр}$ – полное сопротивление трансформатора;

$z_{ф–0}$ – полное сопротивление петли фаза–нуль;

z_Σ – результирующее полное сопротивление цепи КЗ.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

77. При питании однофазной нагрузки от трехфазных трансформаторов нейтраль должна нагружаться при схеме соединения обмоток:

1) $Y/Y_н$	А: не более 15 %
2) $Y/Z_н$	Б: не более 25 %
3) $Δ/Y_н$	В: не более 40 %
	Г: не более 50 %
	Д: не более 75 %
	Е: на 100 %

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

78. Сопротивления прямой и нулевой последовательностей трансформаторов с разными схемами соединения обмоток соотносятся:

1) $Δ/Y_н$	А: $R_0 >> R_1$; $x_0 >> x_1$
2) $Y/Z_н$	Б: $R_0 \approx R_1$; $x_0 << x_1$
3) $Y/Y_н$	В: $R_0 < R_1$; $x_0 < x_1$
	Г: $R_0 > R_1$; $x_0 > x_1$
	Д: $R_0 \approx R_1$; $x_0 \approx x_1$

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

Инструкция: в заданиях 79–80 в строке **правильная последовательность** запишите цифры, соответствующие очередности выполнения расчета. Лишние позиции – исключить.

79. Полное сопротивление цепи до места короткого замыкания вычисляется в следующей последовательности:

1) определяются активное и индуктивное сопротивления каждого из элементов цепи КЗ;

2) определяется полное сопротивление каждого из элементов сети до точки КЗ;
3) полное сопротивление цепи до места КЗ определяется как арифметическая сумма полных сопротивлений всех элементов;
4) определяются отдельно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления;
5) находится геометрическая сумма отдельно вычисленных суммарных активного и индуктивного сопротивлений.

Правильная последовательность:

80. Порядок расчета тока однофазного короткого замыкания:
1) определяются активные и реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности элементов;
2) составляется схема замещения цепи однофазного КЗ, в которую входят сопротивления следующих элементов: фазного провода, переходного сопротивления в месте КЗ, сопротивления обратного (или четвертого) провода с подключенными параллельно ему заземляющими проводниками и сопротивления растекания заземления нейтрали питающего трансформатора;
3) рассчитывается значение периодической составляющей тока однофазного короткого замыкания;
4) определяются сопротивления элементов и цепи при однофазном КЗ в конечной точке сети.

Правильная последовательность:

2.9.2. Расчетные задания

1. По результатам расчета тока трехфазного короткого замыкания на стороне 10 кВ цехового трансформатора, выбранного в задании 1 раздела 1.7.2, мощность короткого замыкания системы составила 50 МВА. Определить сопротивления сети до вентиляторов 1 и 2, если они запитаны непосредственно от распределительного устройства подстанции кабелем НРГ-(4×25), проложенным в воздухе.

2. Определить сопротивления трехфазных трансформаторов ТМ-25/6, ТМ-250/6 и ТМ-2500/6 для высокой и низкой стороны. Оценить вклад активного и индуктивного сопротивлений в полное.

3. Определить, в каких пределах изменяется полное сопротивление и ток трехфазного КЗ трансформаторов, имеющих регулирующее

устройство РПН с пределами ±10 %.

4. Допускается работа трансформаторов при напряжении на его вводе, на 10 % превышающем номинальное напряжение. Приняв за единицу ток трехфазного КЗ при номинальном напряжении $U_{ном}$, определить значения токов КЗ при различных напряжениях питания $U_{раб}$ и следующих положениях переключателя ответвлений: −10, −5, 0, +5, +10 %.

5. От распределительного устройства 0,4 кВ отдельно стоящей подстанции с трансформатором ТМ-630/6 отходят три линии электропередачи. Первая, длиной 85 м, выполнена кабелем АНРГ-(4×120); вторая длиной 800 м – проводом АС-35 на опорах, чертеж которых приведен на рис. 2.19, а; третья, длиной 450 м – проводом АС-35 на опорах по чертежу рис. 2.19, б. Определить сопротивления трансформатора и отходящих линий.

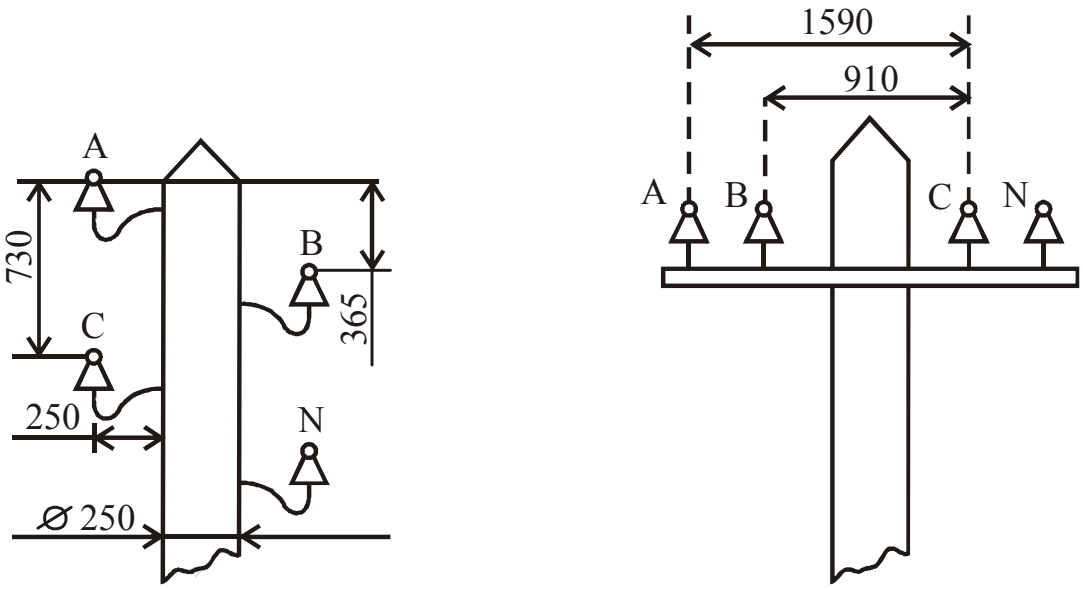
6. Определить ток трехфазного КЗ в точке К (рис. 2.20) цеховой сети.

Трансформатор 630 кВА, 10/0,4 кВ питается от системы бесконечной мощности ($x_c = 0$). Шины *Ш* медные сечением 60×8 мм, длиной 10 м, расстояние между фазами 160 мм, расположение шин по фазам – в одной плоскости. Участки линии *Л* выполнены медными проводами, проложенными открыто по стене, сечение 35 мм^2, общая длина участков 3×50 м. Участки к ШР выполнены проводами ПР16 в газовых трубах (все три провода), длина каждого участка 25 м; $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ – три одинаковые группы двигателей каждый мощностью 120 кВт при КПД $\eta = 0{,}9$; $\cos\varphi = 0{,}85$ и $U_{ном} = 380$ В.

7. Определить ток трехфазного КЗ в точке К (рис. 2.20) цеховой сети с учетом нагрева проводов током КЗ. Температура жил до момента короткого замыкания 50 °С. Остальные данные, как в задании 6.

8. Определить ток трехфазного КЗ за реактором и напряжение на шинах в схеме на рис. 2.21. Тип реактора РТТ-0,38-50-0,14-УЗ; вторичное напряжение питающего трансформатора 0,4 кВ, ток КЗ до реактора 3000 А.

9. На подстанции (рис. 2.22) выведен из работы трансформатор *2Т* и секция шин IV питается от трансформатора *1Т* через реакторы трансформатора *2Т*. Требуется определить ток трех- и двухфазного короткого замыкания на секции шин IV и напряжение на секции шин I. Исходные данные взять из примера 8, коэффициент связи принять равным 0,5.



а б

Рис. 2.19. Конструкции линий: а – на крюках; б – на траверсах

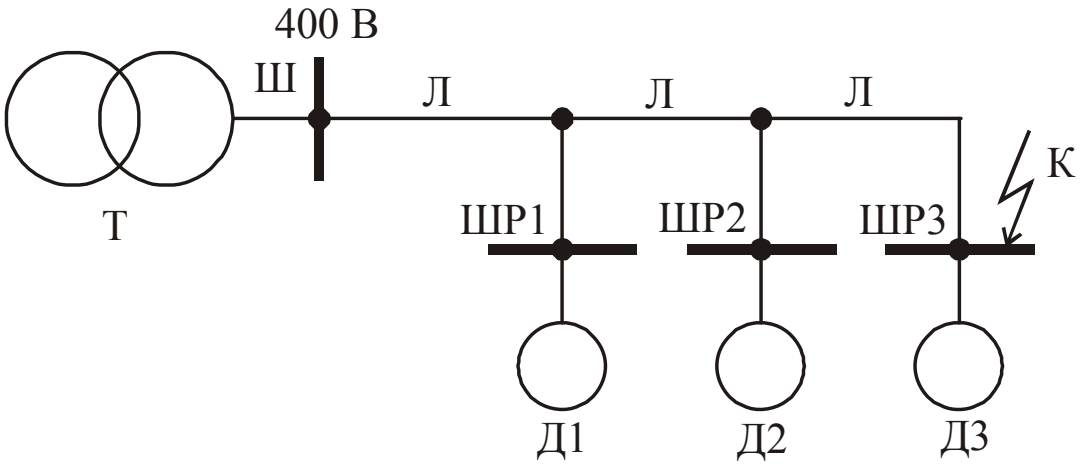


Рис. 2.20. Схема к заданиям 6, 7 для расчета токов КЗ

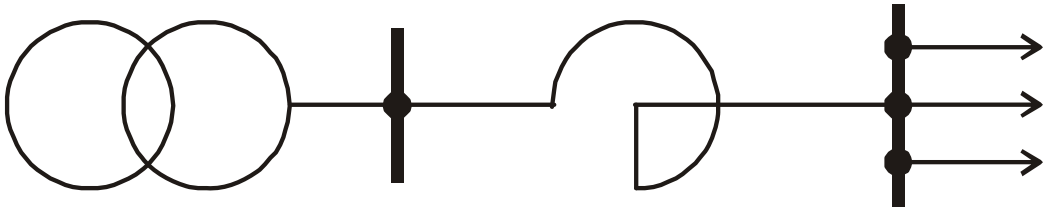


Рис. 2.21. Схема к заданию 8 для расчета тока КЗ

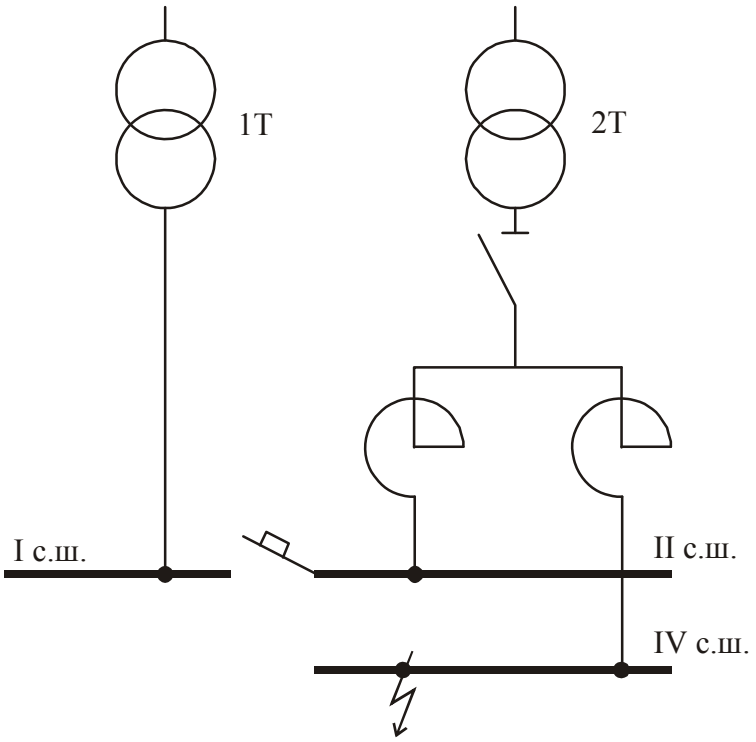


Рис. 2.22. Схема подстанции к заданию 9

10. В сети электроснабжения последовательно включены:
    - повышающий с генераторного напряжения 10,5 кВ трансформатор ТД-16000/35;
    - три понижающих трансформатора ТМФ-630/35, ТС-63/0,66 и ТСЗ-25/0,66 с напряжением на высокой стороне 380 В, на низкой – 36 В.

Привести сопротивление кабельной линии Z, включенной на напряжение 36 В, к генераторному напряжению.

11. Определить токи КЗ в точках сети 0,4 кВ, указанных на рис. 2.23, при условии, что сопротивления элементов схемы электроснабжения высокого напряжения до цехового трансформатора составляют $r_{\Sigma 10} = 338$ мОм, $x_{\Sigma 10} = 447{,}9$ мОм. Длина шинопровода типа ШМА до точки *К2* равна 10 м, до точки *К3* – 20 м; длина шинопровода типа ШРА до точки присоединения ШР1 составляет 20 м, до *М1* – 15 м; длина кабельной линии до ШР1 – 10 м, сечение алюминиевых жил – 35 мм^2; до ШР2 – 20 м, сечение алюминиевых жил – 50 мм^2; двигатели *М2* и *М3* подключены кабелем АНРГ-(4×25) длиной по 12 м.

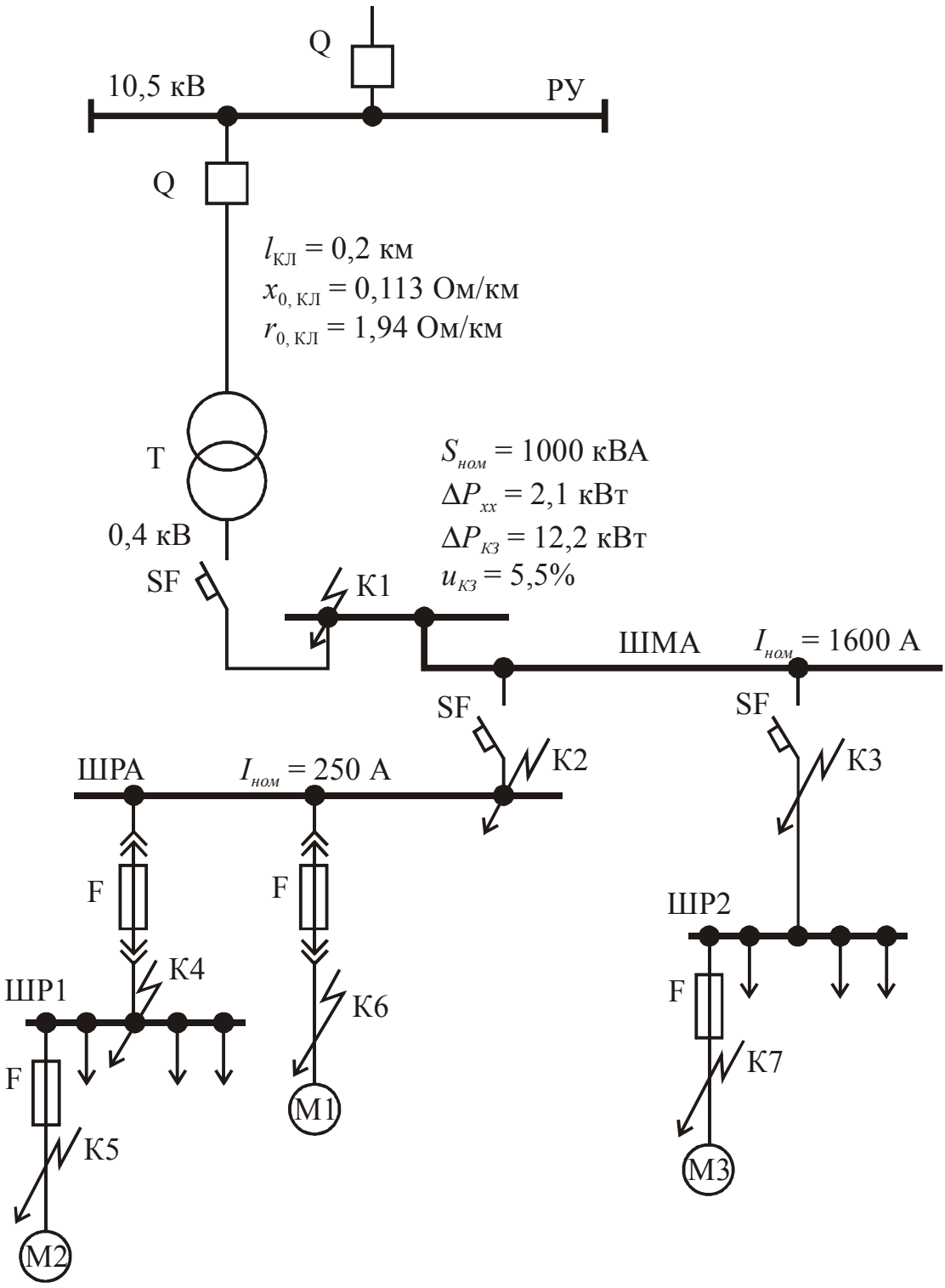


Рис. 2.23. Схема к расчету токов КЗ в сети напряжением до 1000 В (к заданию 11)

12. Определить вероятные максимальное и минимальное значения тока в начальный момент трехфазного короткого замыкания в точке *К1* и к моменту его отключения $t_{отк} = 0{,}6$ с в схеме, представленной на рис. 2.24.

Исходные параметры:

- система С: $S_{КЗ} = 150$ МВА; $U_{ср.номВ} = 6$ кВ;
- трансформатор Т: тип ТСЗС-1000/6; $u_{КЗ} = 8$ %; $U_{номВ} = 6{,}3$ кВ; $U_{номН} = 0{,}4$ кВ; $\Delta P_{КЗ} = 11{,}2$ кВт;
- автоматические выключатели: АВ1 – «Электрон»: $I_{ном} = 1000$ А; $R_{к.в1} = 0{,}25$ мОм; $X_{к.в1} = 0{,}1$ мОм; АВ2 – А3794С: $I_{ном} = 400$ А; $R_{к.в2} = 0{,}65$ мОм; $X_{к.в2} = 0{,}17$ мОм; АВ3 – АЕ2056: $I_{ном} = 100$ А; $R_{к.в3} = 2{,}15$ мОм; $X_{к.в3} = 1{,}2$ мОм, где к.в. – контакты включателя;
- шинопровод Ш: тип ШМА-4-1600; $l_{ш} = 15$ м; $R_{1ш} = 0{,}03$ мОм/м; $X_{1ш} = 0{,}014$ мОм/м; $R_{0ш} = 0{,}037$ мОм/м; $X_{0ш} = 0{,}042$ мОм/м;
- кабельные линии: КБ1 – АВВГ-(3×185 + 1×70): $l_{КБ1} = 50$ м; $R_{1кб1} = 0{,}208$ мОм/м; $X_{1кб1} = 0{,}063$ мОм/м; $R_{0кб1} = 0{,}989$ мОм/м; $X_{0кб1} = 0{,}244$ мОм/м; КБ2 – АВВГ-(3×35 + 1×16): $l_{КБ2} = 20$ м; $R_{1кб2} = 1{,}1$ мОм/м; $X_{1кб2} = 0{,}068$ мОм/м; $R_{0кб2} = 2{,}63$ мОм/м; $X_{0кб2} = 0{,}647$ мОм/м;
- болтовые контактные соединения: $R_{к} = 0{,}003$ мОм; число соединений $n = 10$.

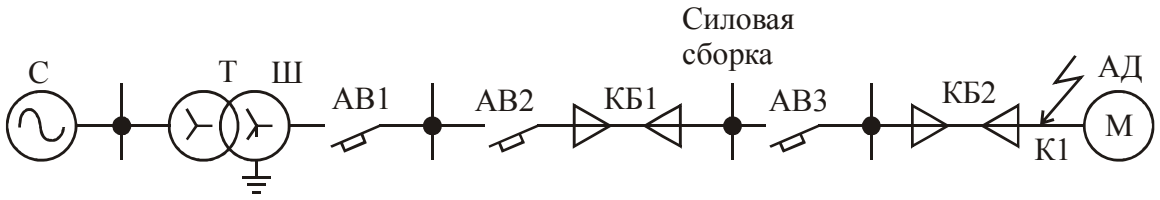


Рис. 2.24. Расчетная схема к заданию 12

13. Комплектная трансформаторная подстанция с трансформатором мощностью 1600 кВА, напряжением 10/0,4 кВ и $u_{КЗ} = 5{,}5$ % питается от энергосистемы. Ток КЗ со стороны энергосистемы на зажимах 10 кВ трансформатора составляет в максимальном режиме 21 кА, в минимальном – 14 кА. Определить параметры для выбора автоматических выключателей отходящих от КТП линий, а также минимальный ток двухфазного КЗ на шинах 0,4 кВ КТП и в конце отходящей кабельной линии с медными жилами сечением 3×95 мм^2 длиной 120 м.

14. Определить уменьшение тока короткого замыкания из-за нагрева обмоток для трансформаторов ТМ-25/10 и ТМ-400/10 при коротком замыкании на выводах 10 и 0,4 кВ. Обмотки выполнены медными проводниками.

Примечание. При выполнении задания руководствоваться следующими положениями:

- Предельная температура обмотки при КЗ для масляных трансформаторов с медными обмотками и изоляцией класса А составляет 250 °С, а для алюминиевых обмоток – 200 °С. Указанной температуры обмотки достигают за время прохождения тока короткого замыкания $t_{КЗ}$, которое определяется $t_{КЗ} = 900/\kappa^2$, где κ – кратность тока КЗ по отношению к номинальному току.
- Потери короткого замыкания, по которым вычисляется активное сопротивление трансформаторов, даются для температуры обмотки 75°С.
- Сопротивление энергосистемы невелико по сравнению с сопротивлением трансформатора, им можно пренебречь.

15. Опираясь на примечание к заданию 14, определить уменьшение тока короткого замыкания из-за нагрева обмоток для трансформаторов ТМ-25/10, ТМ-400/10 и ТМ-630/10 при коротком замыкании на выводах 0,4 кВ, если обмотки будут выполнен алюминиевыми проводниками.

16. Оценить во сколько раз будет различаться спад тока короткого замыкания из-за нагрева обмоток для трансформаторов ТМ-25/10 и ТМ-400/10 с алюминиевыми и медными обмотками при КЗ на выводах 10 и 0,4 кВ.

17. Определить уменьшение тока короткого замыкания из-за нагрева обмоток для трансформаторов ТМ-400/10 и ТМ-630/10 при коротком замыкании на выводах 0,69 кВ. Обмотки выполнены:

- медными проводниками;
- алюминиевыми проводниками.

При выполнении задания руководствоваться примечанием к заданию 14.

18. Распределительный пункт Б у торфяных разработок питается по двум параллельным линиям от одного источника питания (рис. 2.25). Вторичное напряжение трансформатора 0,4 кВ. Длина каждой линии 3 км. Сеть трехпроводная, выполнена на опорах, чертеж которых дан на рис. 2.26, провод АС-50. Сопротивление энергосистемы $x_c = 0{,}5$ Ом.

Построить кривые изменения тока при перемещении точки КЗ по линии.



Рис. 2.25. Схема питания распределительного пункта Б (к заданию 18)

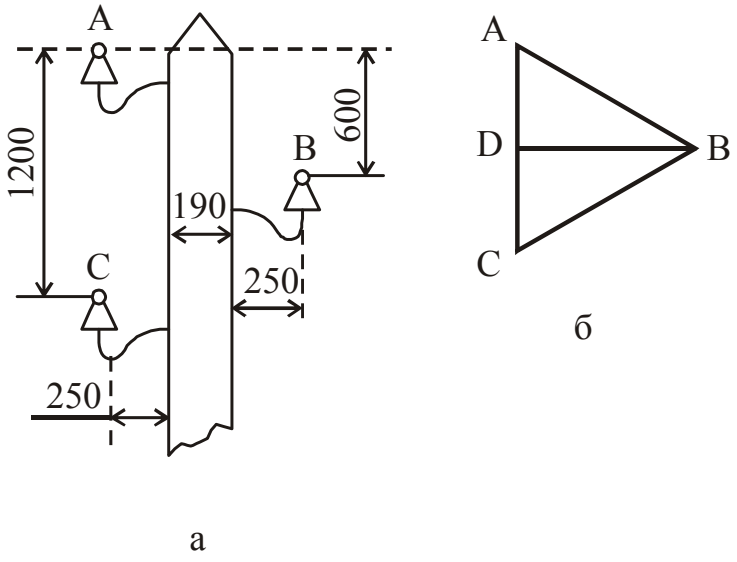


Рис. 2.26. К расчету индуктивного сопротивления линии: чертеж опоры (а) и вспомогательное построение для определения $D_{ср}$ (б) (к заданию 18)

19. Для схемы замкнутого кольца с одной точкой питания (рис. 2.27) дано:

- сопротивление энергосистемы x_c = 0,3 Ом;
- напряжение 0,4 кВ;
- линии выполнены проводом АС-50 на опорах, чертеж которых дан на рис. 2.26;
- длина линии АБ равна 300 м, линии БВ – 1000 м и ВА – 700 м.

Определить ток трехфазного короткого замыкания на шинах распределительных устройств А, Б, В и токи по линиям.

20. Для схемы замкнутого кольца с одной точкой питания (рис. 2.27) дано:

- сопротивление энергосистемы x_c = 0,2 Ом;



Рис. 2.27. Расчетная схема к заданиям 19,20 и 21

- напряжение 0,4 кВ;
- линии выполнены на опорах, чертеж которых дан на рис. 2.26;
- длина линии АБ равна 300 м, провод АС-50;
- длина линии БВ равна 1000 м, провод АС-35;
- длина линии ВА равна 700 м, провод АС-25.

Определить ток трехфазного короткого замыкания на шинах распределительных устройств А, Б, В и токи по линиям.

21. Для схемы замкнутого кольца с одной точкой питания (рис. 2.27) дано:

- сопротивление энергосистемы $x_c = 0{,}2$ Ом;
- напряжение 0,4 кВ;
- воздушные линии электропередачи выполнены в габаритах ЛЭП 0,4 кВ;
- длина линии АБ равна 300 м, провод АС-120;
- длина линии БВ равна 1000 м, кабель СБ-(3×50);
- длина линии ВА равна 700 м, провод АС-50.

Определить ток трехфазного короткого замыкания на шинах распределительных устройств А, Б, В и токи по линиям.

Примечание. Отношения x/r линий различаются значительно.

22. В схеме на рис. 2.28 $x_{C,A} = 0{,}1$ Ом, $x_{C,B} = 0{,}03$ Ом. Линия АБ выполнена проводом АС-70 длиной 500 м, линия БВ – проводом АС-50 длиной 1000 м. Чертеж опор и расстояния между проводами даны на рис. 2.19, б. Напряжение 0,4 кВ. Определить токи при трехфазном КЗ на шинах распредустройства Б. Объяснить неравенство тока в месте КЗ арифметической сумме токов по линиям.

23. В схеме на рис. 2.28 линия АБ выполнена кабелем СБ-(3×50), а линия БВ – проводом АС-120 на опорах в габаритах ЛЭП 0,4 кВ. Остальные условия те же, что и в задании 22. Определить токи при трехфазном КЗ на шинах распределительного пункта Б.

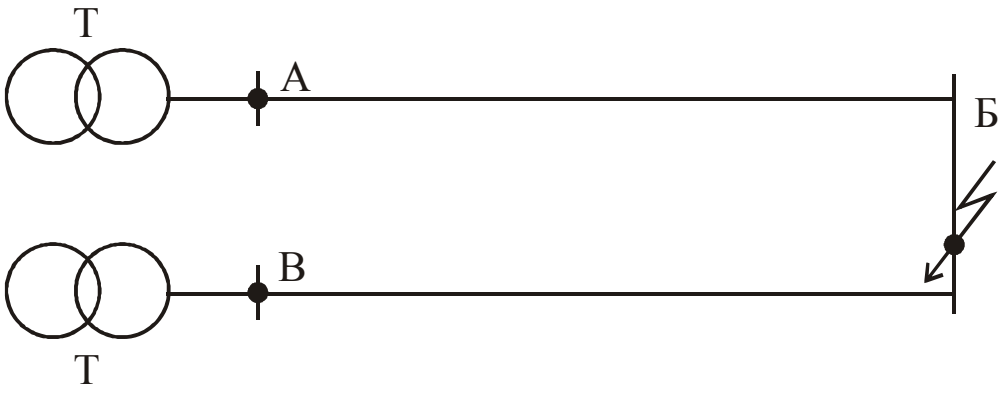


Рис. 2.28. Схема питания распределительного пункта Б (к заданиям 22 и 23)

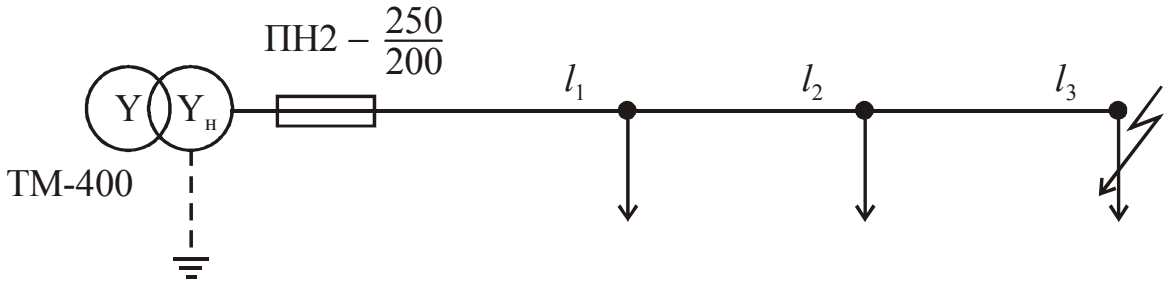
24. В схеме на рис. 2.28 распредустройства А и В соединены линией, выполненной проводом АС-95 на опорах по чертежу рис. 2.19, а, длина линии 870 м. Остальные условия те же, что и в задании 22. Найти токи при трехфазном КЗ в середине линии БВ.

25. Трансформаторы подстанции 2КТПМ-1600/10 включены на параллельную работу. Сопротивление энергосистемы $x_c = 0{,}01$ Ом. Определить токи через трансформаторы при трехфазном коротком замыкании на шинах 0,4 кВ.

26. Параллельно работают два трансформатора напряжением 10/0,69 кВ. Один ТМ-1600/10, другой ТМ-4000/10. Сопротивление энергосистемы $x_c = 0{,}05$ Ом. Определить токи через трансформаторы при трехфазном коротком замыкании на шинах 0,69 кВ.

27. Проверить на отключение при однофазном КЗ воздушную четырехпроводную линию, состоящую из трех участков, предназначенных для питания потребителей трех объектов (рис. 2.29). Сечения нулевых проводов равны половине сечения фазного. Линия питается от трансформаторной подстанции 6/0,4 кВ с трансформатором мощностью 400 кВА и схемой соединения обмоток Y/Yн.

По току нагрузки в начале линии (145 А) достаточно установить на щите подстанции предохранитель с плавкой вставкой на 150 А, но из условий обеспечения селективности по отношению к плавким вставкам потребителей, присоединенных к ВЛЭП, на щите подстанции предусмотрена плавкая вставка на номинальный ток $I_{ном} = 200$ А.



Провода	3×А70 + 1×А35	3×А50 + 1×А25	3×А25 + 1×А16
l_i, км	0,045	0,055	0,070
$d_{ф–0}$, мм	1000	1000	400

Рис. 2.29. Расчетная схема и данные к заданиям 27–29

28. Для обеспечения отключения линии задания 27 требуется увеличить сечение нулевого провода на неотключающемся участке l_3. Оценить необходимое для отключения сечение нулевого провода.

29. Отключение однофазного КЗ в конце третьего участка линии, рассмотренной в задании 27, можно обеспечить секционированием участка l_3 дополнительным предохранителем при сохранении сечений фазных и нулевого проводов на всех участках. Определить расстояние от подстанции, на котором должен быть врезан секционирующий предохранитель.

30. От подстанции с трансформатором ТМ-400/10 требуется проложить новую линию на опорах, чертеж которых дан на рис. 30, а. По проекту линия выполняется проводом 3×А70 + 1×А35, защищается предохранителем ПН2-250/200, установленным в начале линии. Определить предельно допустимую длину новой линии, при которой плавкая вставка на щите подстанции будет обеспечивать отключение однофазного КЗ, происшедшего в конце линии. Расчет выполнить для схем соединения обмоток трансформатора $Y/Y_н$ и $Δ/Y_н$.

31. Оценить предельно допустимую длину новой линии задания 30, если линия будет выполнена на опорах по чертежу рис. 2.30, б.

32. Проверить на отключение при однофазных коротких замыканиях кабельную линию, состоящую из трех последовательно соединенных участков (рис. 2.31). Линия питается от трансформатора ТМ-1000 с первичным напряжением 6 кВ и вторичным – 400/230 В, со схемой соединения обмоток $Y/Y_н$. В случае не отключения какого-либо участка

установленным аппаратом защиты разработать мероприятия по обеспечению его отключения.

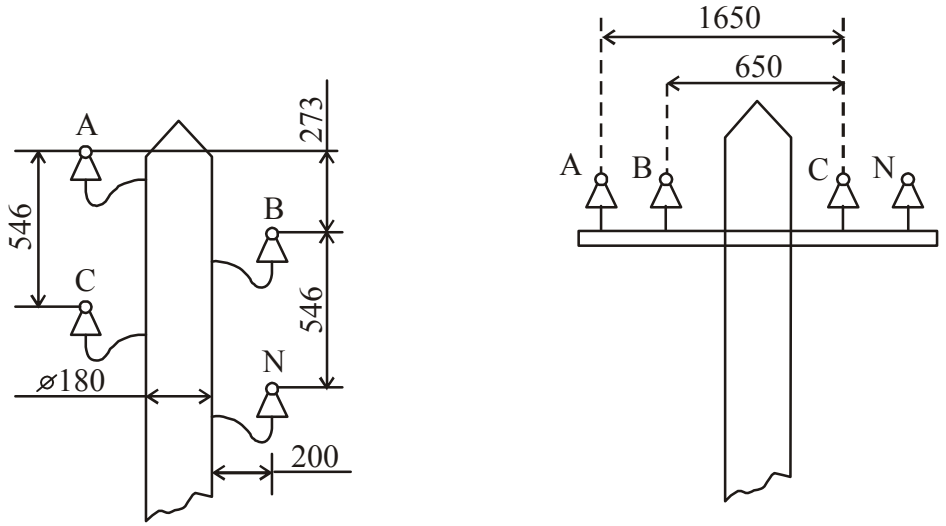
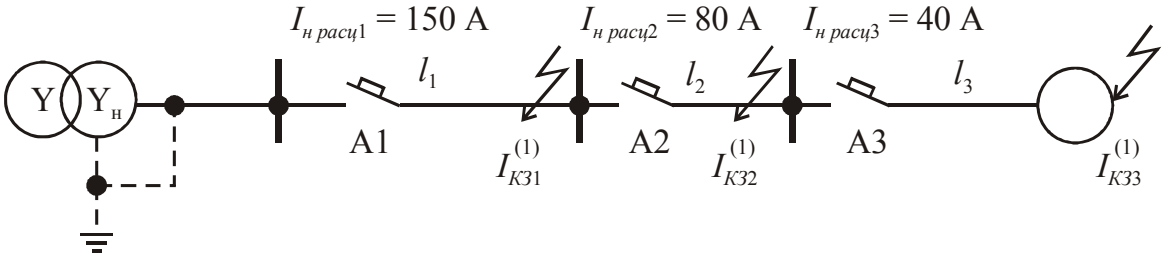


Рис. 2.30. Конструкции линий 0,4 кВ: а – на крюках; б – на траверсах



Участок	l_1	l_2	l_3
Среда	невзрывоопасно	невзрывоопасно	взрывоопасно
Тип кабеля	АВРБ	АВРГ	АВВБ
Сечение кабеля	3×70 + 1×25	3×35 + 1×10	3×16 + 1×10
Длина участка	210 м	85 м	30 м

Рис. 2.31. Расчетная схема и данные к заданиям 32–35

33. При реконструкции кабели линии задания 32 (рис. 2.31) были заменены на четырехжильные с изоляцией из сшитого полиэтилена марки АПвПГ аналогичного сечения. Нулевой проводник заземлен и со стороны источника питания, и со стороны потребителя. На каждом участке его сечения равно сечению фазного. Индуктивное сопротивление земли и заземляющих устройств составляет 0,6 Ом/км.

Рассчитать сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей схемы. Проверить на отключение каждой из участков линии при однофазном КЗ в конце участка.

34. При размещении распределительных пунктов линии задания 32 (рис. 2.31) возникла необходимость увеличить длину первого участка l_1 до 230 м. Определить предельную длину этого участка, при которой будет обеспечено отключение защитного аппарата.

35. Условия те же, что и в задании 32 (рис. 2.31), но на участке l_2 ввиду отсутствия однофазной нагрузки исключается необходимость в нулевом проводе. С учетом этого участок l_2 выполнен проводом АПРТО сечением 3×35 мм^2, проложенным в стальной трубе, которая используется в качестве проводника зануления. Проверить на отключение каждый из участков линии при однофазном КЗ в конце участка.

36. Выбрать сечения стальных полос специально предусмотренных для зануления металлических частей электроустановки, питаемой кабельной линией (рис. 2.32). Линия проложена в цехе с невзрывоопасной средой и состоит из трех последовательно соединены трехжильных кабелей с алюминиевыми жилами с пластмассовой и резиновой изоляцией. Для первых двух участков предусмотрены автоматы с комбинированным расцепителем, для последнего участка – предохранитель. Линия питается от комплектной трансформаторной подстанции с трансформатором мощностью 250 кВА и схемой соединения обмоток $Y/Y_н$. Напряжение вторичной стороны трансформатора 400/230 В.

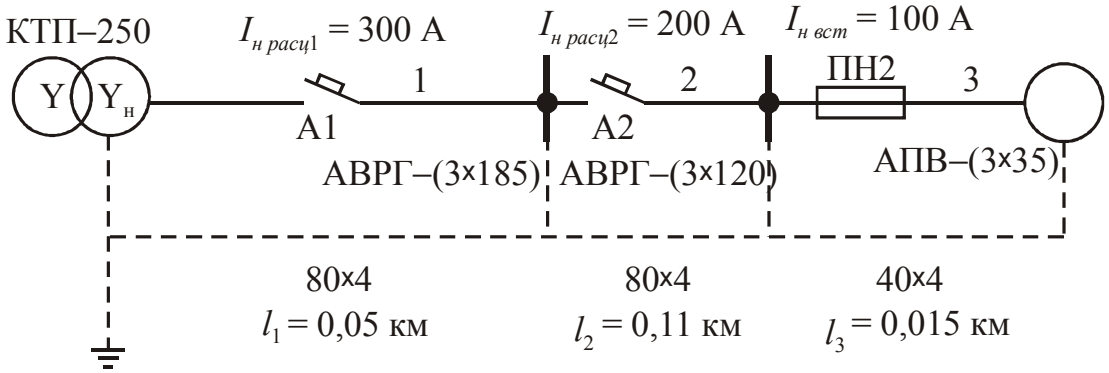


Рис. 2.32. Расчетная схема к заданию 36

37. Определить ток металлического однофазного КЗ в конце воздушной линии длиной 450 м, выполненной алюминиевыми проводами сечением 3×50 + 1×25 на опорах, чертеж которых дан на

рис. 2.30, а. Линия запитана от трансформатора номинальной мощностью 750 кВА, схема соединения обмоток $Y/Y_н$, напряжение 0,4 кВ, $u_{КЗ} = 5{,}5$ %, сопротивление энергосистемы $x_с = 0{,}1x_{тр}$.

38. Распределительный пункт 0,4 кВ запитан от трансформатора мощностью 100 кВА кабелем АВРГ-(3×70 + 1×25) длиной 210 м. С учетом переходных сопротивлений вычислить ток однофазного короткого замыкания на зажимах трансформатора и в распределительном пункте. Сопротивление энергосистемы принять равным $x_с = 0{,}1x_{тр}$. Расчет выполнить для схем соединения обмоток трансформатора $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$.

39. Для условий примера 2.19 оценить уходящий в нагрузку ток при трехфазном КЗ в конце кабельной линии, если мощность трансформатора подстанции составляет 400 и 1000 кВА.

40. Определить токи на стороне 6 кВ трансформатора мощностью 1000 кВА при трех-, двух- и однофазном КЗ на выводах 0,4 кВ при схемах соединения обмоток $Y/Y_н$ и $\Delta/Y_н$. Питание от системы бесконечной мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каялов Г.М., Каждан А.Э., Ковалев И.Н., Куренный Э.Г. Основы построения промышленных электрических сетей. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.
2. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 185 с.
3. Кнорринг Г.М. Осветительные установки. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
4. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 248 с.
5. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. – М.: ЗАО Энергосервис, 2000. – 376 с.
6. Маньков В.Д., Заграничный С.Ф. Защитное заземление и зануление электроустановок. Справочник. – СПб.: Политехника, 2005. – 400 с.
7. Коновалова Л.Л., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
8. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев, В.А. Старшинов и др.; Под ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 416 с.
9. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 52 с.
10. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 406 с.
11. Основы кабельной техники. Учебное пособие для вузов / Под ред. В.А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1975. – 348 с.
12. Электротехнический справочник / Под ред. профессоров МЭИ. Том 2. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 508 с.
13. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 608 с.
14. ГОСТ 3484.1–88 (СТ СЭВ 1070-78). Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 52 с.
15. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СИЛОВЫЕ СЕТИ

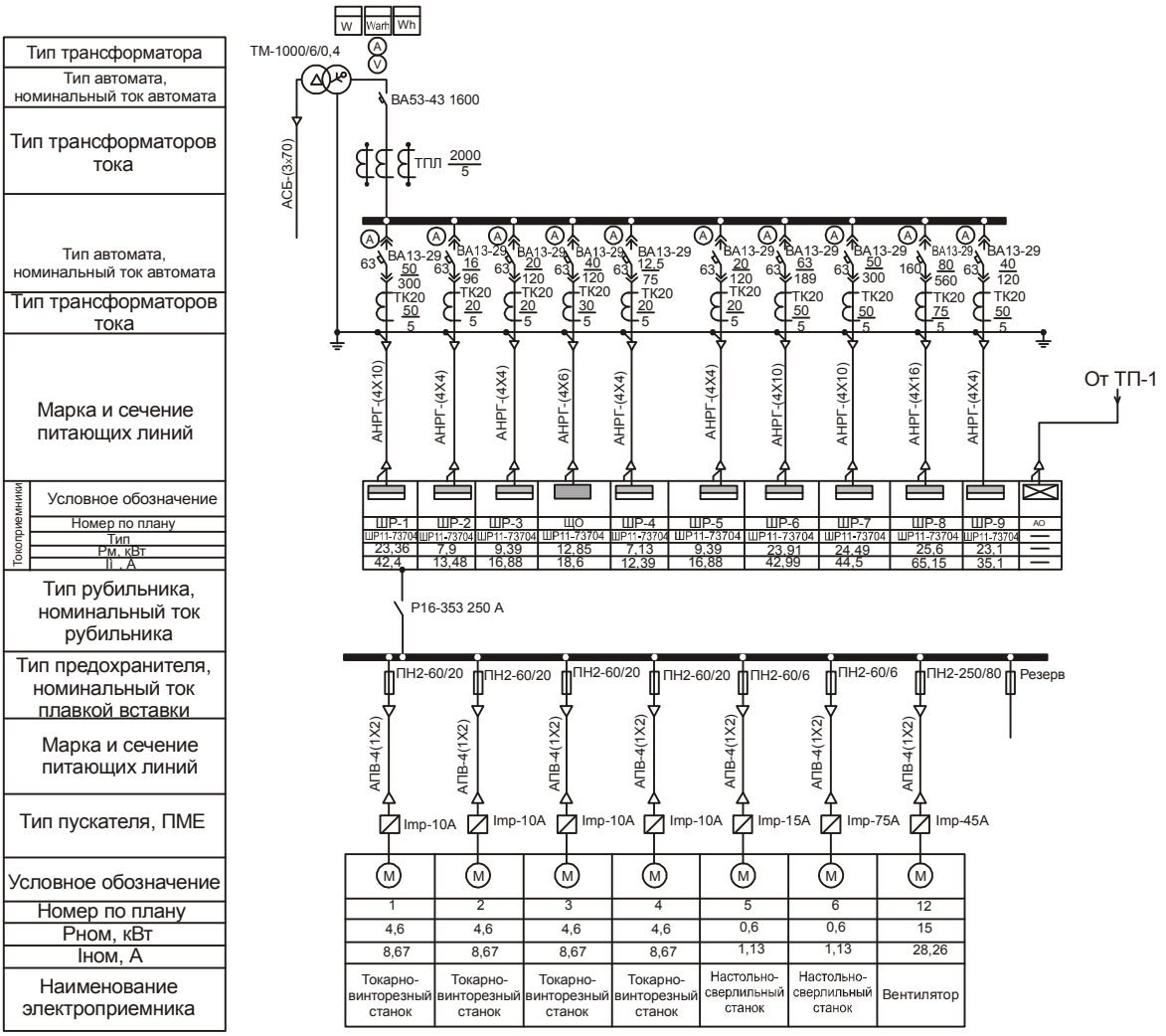
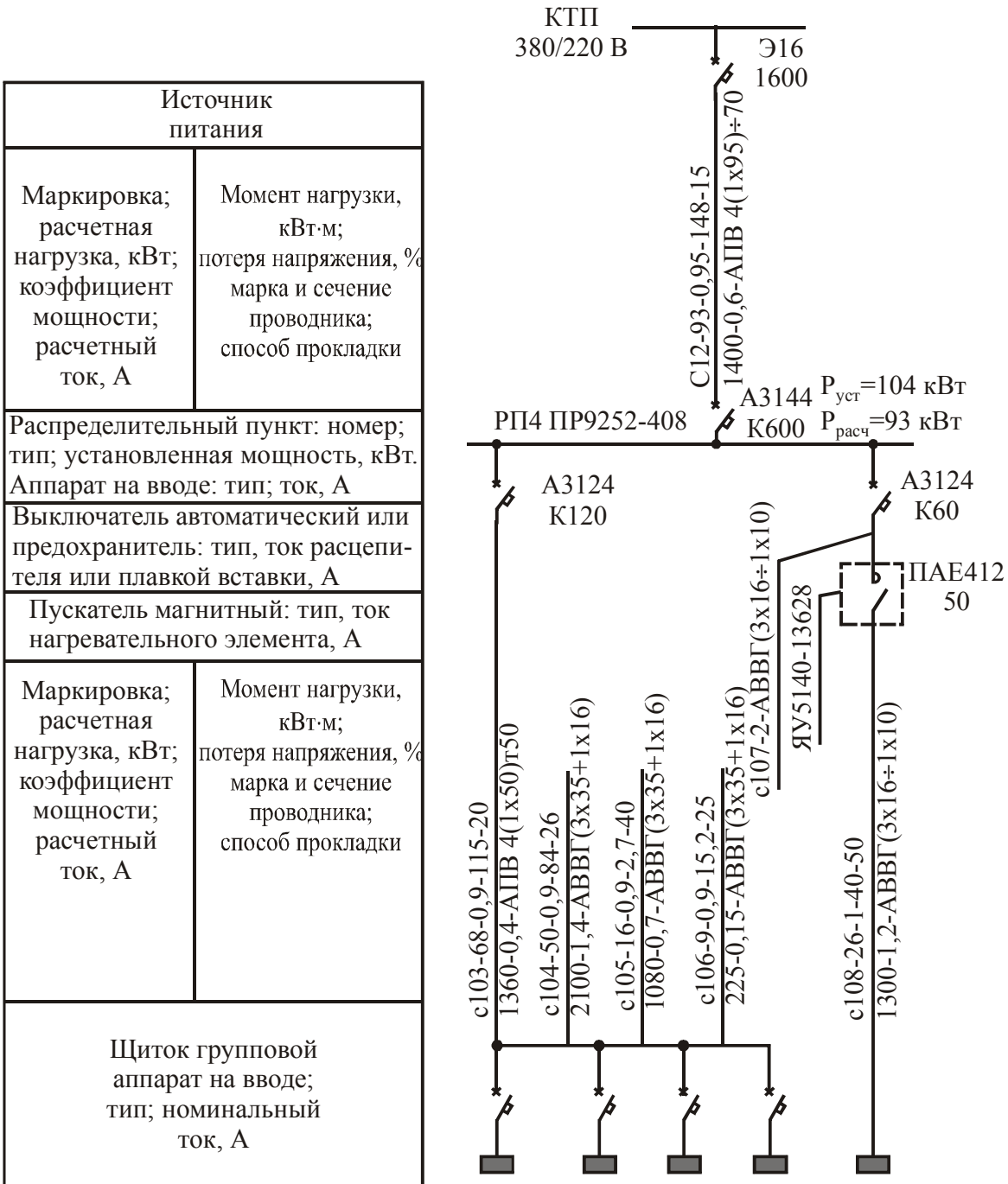


Рис. П1.1. Схема электроснабжения ремонтно-механического цеха

Рис. П1.2. Однолинейная схема электроснабжения корпуса обогащения

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ



Источник питания					
Маркировка; расчетная нагрузка, кВт; коэффициент мощности; расчетный ток, А	Момент нагрузки, кВт·м; потеря напряжения, %; марка и сечение проводника; способ прокладки				
Распределительный пункт: номер; тип; установленная мощность, кВт. Аппарат на вводе: тип; ток, А					
Выключатель автоматический или предохранитель: тип, ток расцепителя или плавкой вставки, А					
Пускатель магнитный: тип, ток нагревательного элемента, А					
Маркировка; расчетная нагрузка, кВт; коэффициент мощности; расчетный ток, А	Момент нагрузки, кВт·м; потеря напряжения, %; марка и сечение проводника; способ прокладки				
Щиток групповой аппарат на вводе; тип; номинальный ток, А					
Номер по схеме расположения на плане		ЩО–5	ЩО–6	ЩО–7	ЩО–8	ЩО–9
Установленная мощность, кВт		20	37	8	10	29
Потеря напряжения до щитка, %		1,0	2,4	3,1	3,25	1,8

Рис. П2.1. Оформление принципиальной схемы питающей сети освещения

Учебное издание

КАБЫШЕВ Александр Васильевич

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ
ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ДО 1000 В

Учебное пособие

Научный редактор
доктор физико-математических наук,
профессор *А.В. Кабышев*

Редактор *Е.О. Фукалова*

Дизайн обложки *Т.А. Фатеева*

Подписано к печати 20.02.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».
Печать RISO. Усл.печ.л. 9,82. Уч.-изд.л. 8,89.
Заказ . Тираж 100 экз.

Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.