

658.26

к43

**Библиотека электротехника**

**Э. А. Киреева  
В. В. Орлов  
Л. Е. Старкова**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ЦЕХОВ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ  
ЭНЕРГЕТИК**

## Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

### **“Библиотечки электротехника”:**

Могузов В. Ф. **Обслуживание силовых трансформаторов** (часть 1).

Киреева Э. А. **Повышение надежности, экономичности и безопасности систем цехового электроснабжения.**

Овчинников В. В. **Защита электрических сетей 0,4 – 35 кВ** (части 1 и 2).

Иноземцев Е. К. **Ремонт турбогенераторов** (часть 2).

Овчаренко Н. И. **Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий электропередачи напряжением 110 – 220 кВ ДФЗ-201.**

Георгиади В. Х. **Поведение энергоблоков ТЭС при перерывах электроснабжения собственных нужд** (части 1 – 3).

Конюхова Е. А. **Определение потерь мощности по потерям напряжения в электрических сетях промпредприятий.**

Вавилов В. П., Александров А. Н. **Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике.**

Файбисович Д. Л., Карапетян И. Г. **Укрупненные стоимостные показатели электрических сетей 35 – 1150 кВ.**

Добрусин Л. А. **Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники.**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **“ПРЕССА РОССИИ”**. Том 1. **Российские и зарубежные газеты и журналы.**

### **Индексы “Библиотечки электротехника”**

— приложения к журналу **“Энергетик”**

**88983** — для предприятий и организаций;

**88982** — для индивидуальных подписчиков.

Адрес редакции  
журнала **“Энергетик”:**

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06

E-mail: energy@mail.magelan.ru

## Библиотечка электротехника

— приложение к журналу **“Энергетик”**

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 12(60)

**Э. А. Киреева**

**В. В. Орлов**

**Л. Е. Старкова**



## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЦЕХОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2003

АВ035

НИГРЭС

НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),  
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,  
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,  
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,  
Ю. В. Усачев, М. А. Шабал

**Киреева Э. А., Орлов В. В., Старкова Л. Е.**

К 43 Электроснабжение цехов промышленных предприятий.  
— М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2003. — 120 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”, Вып. 12(60)].

Изложены вопросы цехового электроснабжения. приведены сведения по цеховым трансформаторным подстанциям, внутрицеховому распределению электроэнергии, выбору электрооборудования, а также справочные материалы по современному электрооборудованию цеховых сетей.

Для ИТР, занимающихся электроснабжением цехов промышленных предприятий, может быть полезна студентам высших и средних учебных заведений энергетических специальностей.

Передача, распределение и потребление электроэнергии на промышленных предприятиях должны производиться с высокой экономичностью, надежностью и требуемым качеством электроэнергии.

В цеховых электрических сетях используется огромное количество проводникового материала и электрической аппаратуры, поэтому выбор схемы питания определяет не только качество и особенности работы электрооборудования, но и технико-экономические показатели всей системы электроснабжения.

В цеховых сетях широко используются комплектные распределительные устройства, комплектные трансформаторные подстанции, а также комплектные силовые и осветительные токопроводы. Применение комплектного электрооборудования и выбор его рациональной компоновки, а также конструктивного выполнения цеховых сетей обеспечивают безопасное обслуживание и ремонт, необходимую степень локализации повреждений и высокую эксплуатационную надежность.

Настоящая брошюра посвящена вопросам цехового электроснабжения и электрооборудования и в значительной степени учитывает запросы специалистов, занимающихся эксплуатацией цеховых электрических сетей.

В брошюре содержатся материалы по цеховым трансформаторным подстанциям, внутрицеховому распределению электроэнергии, выбору электрооборудования. Кроме того, в брошюре имеются справочные материалы по современному электрооборудованию цеховых сетей.

Брошюра может быть полезна инженерно-техническому персоналу, занимающемуся электроснабжением цеховых сетей промышленных предприятий, а также студентам высших и средних учебных заведений энергетических специальностей.

Авторы выражают глубокую благодарность Е. С. Киреевой за помощь при оформлении рукописи.

**Замечания и предложения по данной брошюре  
просьба направлять по адресу:  
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.  
Редакция журнала “Энергетик”.**

## Цеховые трансформаторные подстанции

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В электроснабжении промышленных предприятий широкое применение находят комплектные трансформаторные подстанции (КТП), состоящие из силовых трансформаторов, шкафов ввода высшего и низшего напряжения, шкафов отходящих линий и, в случае двух- или трехтрансформаторных подстанций — секционных шкафов.

Силовые трансформаторы КТП имеют следующие номинальные мощности: 250, 400, 630, 1000, 1600 и 2500 кВ · А и номинальные напряжения: высшее — 6; 10 кВ; низшее — 0,4; 0,69 кВ.

В зависимости от системы охлаждения различают трансформаторы сухие — ТСЗ (естественное воздушное охлаждение при защищенном исполнении), масляные — ТМЗ (масляное охлаждение, защита масла с помощью азотной подушки без расширителя); с негорючим жидким диэлектриком — ТНЗ (естественное охлаждение диэлектриком, защита диэлектрика с помощью азотной подушки без расширителя).

По количеству трансформаторов все подстанции подразделяют на однотрансформаторные, двухтрансформаторные, трехтрансформаторные. Однотрансформаторные подстанции применяют для питания потребителей III категории, а также части приемников II категории, допускающих перерыв питания на время замены трансформатора. Для электроприемников I и II категорий по надежности электроснабжения, требующих резервирования питания, как правило, устанавливают двухтрансформаторные подстанции.

Если питание получают преимущественно потребители I категории, то на стороне низшего напряжения подстанции предусматри-

вают устройство АВР, срабатывающее при аварийном отключении одного из трансформаторов.

При питании потребителей II категории в аварийном режиме допускается ручное подключение резерва.

Двухтрансформаторные подстанции применяют также для питания отдельно стоящих объектов общезаводского назначения — компрессорных, насосных станций.

Принципиальная схема двухтрансформаторной подстанции приведена на рис. 1.1.

В последние годы разработана серия трехтрансформаторных подстанций, применение которых с симметричным распределением нагрузки в послеаварийном режиме на оставшиеся в работе два трансформатора позволяет увеличить загрузку каждого из трех трансформаторов в нормальном режиме.

Принципиальная схема трехтрансформаторной подстанции приведена на рис. 1.2.

В общем виде соотношения между коэффициентами загрузки трансформатора в нормальном режиме  $k_{\Sigma}$  и в послеаварийном режиме  $k_{\Sigma,ав}$  равны:

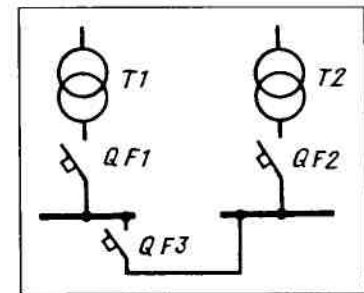


Рис. 1.1. Схема двухтрансформаторной подстанции:

$QF1, QF2$  — автоматические выключатели ввода низшего напряжения трансформаторов  $T1, T2$ ;  $QF3$  — секционный автоматический выключатель

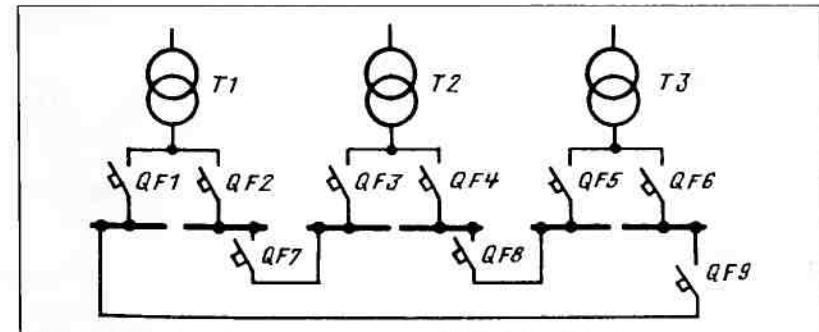


Рис. 1.2. Схема трехтрансформаторной подстанции:

$QF1, QF2, QF3, QF4, QF5, QF6$  — автоматические выключатели ввода низшего напряжения трансформаторов  $T1, T2$  и  $T3$  соответственно;  $QF7, QF8, QF9$  — секционные автоматические выключатели

для двухтрансформаторных подстанций  $k_3 = 0,5 k_{3,ав}$ ;  
для трехтрансформаторных подстанций  $k_3 = 0,666 k_{3,ав}$

Применение трехтрансформаторных подстанций при условии полного резервирования нагрузки обеспечивает 25 %-ную экономию трансформаторной мощности по сравнению с двухтрансформаторными подстанциями.

К преимуществам трехтрансформаторных подстанций относится также значительное снижение токов вводных и секционных выключателей в послеаварийных режимах. В то же время у трехтрансформаторных подстанций сборные шины РУ до 1 кВ конструктивно выполнить труднее вследствие необходимости соединений секций между собой, а схема АВР получается более сложной по сравнению с двухтрансформаторной подстанцией. Трехтрансформаторные подстанции целесообразно применять для питания потребителей I и II категорий как при сосредоточенной, так и при распределенной нагрузке, питаемой по магистральным сетям.

Цеховые трансформаторные подстанции напряжением 6 – 10/(0,4 ÷ 0,69) кВ выполняют без сборных шин первичного напряжения как при радиальном, так и при магистральном питании. При радиальной схеме питания цеховой трансформатор обычно имеет глухое присоединение к линии 6 – 10 кВ, идущей от распределительной подстанции. Коммутационный аппарат (разъединитель или выключатель нагрузки) перед цеховым трансформатором применяют в следующих случаях: источник питания находится в ведении другой эксплуатирующей организации, подстанция значительно (более 3 км) удалена от источника питания, она питается по воздушной линии, на стороне низшего напряжения не установлен отключающий аппарат.

При магистральной схеме питания на вводе к цеховому трансформатору в большинстве случаев устанавливают выключатель нагрузки последовательно с предохранителем или разъединитель в комплекте с предохранителем, позволяющий осуществить селективное отключение цеховой ТП при повреждении или ненормальном режиме работы трансформатора. Рекомендуется схема включения предохранителя — перед выключателем нагрузки.

Выбор типа трансформаторов осуществляется в зависимости от требований окружающей среды. Для внутренней установки преимущественно рекомендуется применение масляных трансформаторов, но с ограничениями по числу и мощности. Для внутрицеховых подстанций с трансформаторами сухими или с негорючим жидким (твердым) диэлектриком мощность трансформаторов, их число,

расстояние между ними, этаж, на котором они могут быть установлены, не ограничиваются.

Трансформаторы с охлаждением негорючей жидкостью целесообразно применять в тех производственных помещениях, где по условиям среды, по числу, значению мощности и этажности нельзя применять масляные трансформаторы. Сухие трансформаторы мощностью не более 100 – 630 кВ · А применяют главным образом на испытательных станциях, в лабораториях и других установках с ограничениями по условиям пожарной безопасности.

## 1.2. ВЫБОР ЧИСЛА И МОЩНОСТИ ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Выбор числа цеховых трансформаторов осуществляется одновременно с выбором компенсирующих устройств.

Минимальное число цеховых трансформаторов определяют по формуле:

$$N_{\min} = \frac{S_p}{k_3 S_{T,ном}}, \quad (1.1)$$

где  $S_p$  — полная расчетная нагрузка потребителей на напряжение до 1 кВ;  $k_3$  — коэффициент загрузки трансформаторов, принимаемый в зависимости от категории надежности потребителей электроэнергии;  $S_{T,ном}$  — номинальная мощность цехового трансформатора, принимаемая в зависимости от удельной плотности нагрузки.

Полученное значение  $N_{\min}$  округляется до ближайшего большего целого числа.

На выбор номинальной мощности трансформатора влияют следующие факторы: затраты на питающую сеть 0,4 кВ, потери мощности в этой сети и потери мощности в трансформаторах, затраты на строительную часть подстанции.

Число и мощность трансформаторов зависят от распределения потребителей по площади цеха, наличия места для расположения цеховых подстанций, характера и режима работы электроприемников.

В проектной практике для двухтрансформаторных цеховых подстанций при преобладании потребителей I категории коэффициент загрузки трансформаторов  $k_{з,тр}$  принимается в пределах 0,6 – 0,7. Для однострановых подстанций при наличии взаимного резервирования по перемычкам с другими подстанциями на вторичном напряжении мощность трансформаторов выбирается с учетом степени резервирования. Коэффициент загрузки цеховых

трансформаторов может быть принят: при преобладании потребителей II категории 0,7 – 0,8, а при потребителях III категории — 1.

При этом число трансформаторов  $N_{тр}$  связано с их номинальной мощностью следующим образом:

$$N_{тр} = S_p / (k_{з.тр} S_{т.ном.э}), \quad (1.2)$$

где  $S_{т.ном.э}$  — экономически целесообразная номинальная мощность трансформатора.

Значение  $S_{т.ном.э}$  в выражении (1.2) принимают в зависимости от удельной плотности расчетной нагрузки. Максимальная мощность трансформаторов при плотностях нагрузки:

до 0,2 кВ · А/м<sup>2</sup> — до 1000 кВ · А;

от 0,2 до 0,5 кВ · А/м<sup>2</sup> — от 1000 до 1600 кВ · А;

свыше 0,5 кВ · А/м<sup>2</sup> — 1600 и 2500 кВ · А.

Если  $S_{уд} \geq 0,4$  кВ · А/м<sup>2</sup>, то независимо от требований надежности электроснабжения целесообразно применять двухтрансформаторные подстанции. Выражение (1.2) не означает, что если вначале целесообразна установка трансформаторов 1000 кВ · А, то через 5 лет при росте нагрузок их заменят на большие. Обычно осуществляют дополнительную установку трансформаторов, стараясь сохранить тип и мощность. Трансформаторы мощностью 630 кВ · А и менее следует применять для питания вспомогательных цехов и участков предприятий.

С целью наибольшего приближения цеховых подстанций к электроприемникам сети до 1 кВ рекомендуется размещать их внутри цехов открыто, но ограждая или пристраивать в зависимости от производственных условий и требований архитектурно-строительного оформления производственных зданий и сооружений. По возможности внутрицеховые подстанции размещают в центре электрических нагрузок, это позволяет сократить протяженность сетей 0,4 кВ и уменьшить потери мощности и энергии в них. Для цехов небольшой ширины и для случая, когда часть потребителей расположена за пределами цеха, а также при затруднительном размещении подстанции внутри цеха применяют ТП, пристроенные к цеху.

Возможно применение цеховых ТП с размещением щита низкого напряжения в цехе, а трансформатора — снаружи около питаемых им производственных зданий. В результате подстанция занимает значительно меньше площади цеха, чем встроенная.

Отдельно стоящие закрытые цеховые подстанции применяют тогда, когда невозможно разместить ТП внутри цехов или у их наружных стен по требованиям технологии или пожаро- и взрыво-

опасности производства. Отдельно стоящие ТП могут применяться также для небольших предприятий при значительной разбросанности потребителей по их территории.

Внутрицеховые подстанции целесообразны, главным образом, в многопролетных цехах большой ширины и в машинных залах.

На каждой открыто установленной внутрицеховой подстанции могут применяться масляные трансформаторы с суммарной мощностью до 3,2 МВ · А. Расстояние в свету между масляными трансформаторами разных КТП должно быть не менее 10 м. Если масляный трансформатор установлен в закрытой камере (КТП в отдельном помещении) внутри производственного здания, то расстояние не нормируется. В одном помещении внутрицеховой подстанции рекомендуется устанавливать одну КТП.

Суммарная мощность масляных трансформаторов внутрицеховой подстанции, установленных на втором этаже, должна быть не более 1000 кВ · А. Установка выше второго этажа не допускается.

В тех случаях, когда нагрузка не распределена, а сосредоточена на отдельных участках цеха, номинальную мощность трансформаторов по критерию удельной плотности нагрузки не выбирают.

С точки зрения замены поврежденных трансформаторов, а также удобства монтажа и эксплуатации, рекомендуется унифицировать единичные мощности трансформаторов, т.е. иметь ограниченное число типов трансформаторов [1, 2].

Выбранное число трансформаторов  $N_{тmin}$  способно передать в сеть напряжением до 1 кВ при заданном коэффициенте загрузки  $k_3$  реактивную мощность  $Q_T$ , значение которой определяется по формуле:

*для трансформаторов масляных и заполненных негорючей жидкостью*

$$Q_T = \sqrt{(1,1 S_{т.ном} k_3 N_{тmin})^2 - P_p^2}, \quad (1.3)$$

где коэффициент 1,1 учитывает тот факт, что цеховые трансформаторы имеют, как правило, загрузку, не превышающую 0,9, и коэффициент сменности по энергоиспользованию имеет значение менее 0,9. Поэтому для масляных трансформаторов в течение одной смены может быть допущена систематическая перегрузка, равная 10 %;

*для сухих трансформаторов*

$$Q_T = \sqrt{(1,05 S_{т.ном} k_3 N_{тmin})^2 - P_p^2}. \quad (1.4)$$

Коэффициент 1,05 учитывает тот факт, что перегрузочная способность сухих трансформаторов, согласно правилам эксплуатации электроустановок потребителей, примерно вдвое ниже, чем масляных трансформаторов.

Мощность низковольтных конденсаторных батарей составляет:

$$Q_{н.к} = Q_{н.к1} + Q_{н.к2}, \quad (1.5)$$

где  $Q_{н.к1}$  — мощность низковольтных конденсаторных батарей, определенных по критерию выбора минимального числа цеховых трансформаторов;  $Q_{н.к1} = Q_p - Q_T$ ;  $Q_p$  — расчетная реактивная нагрузка потребителей до 1 кВ;  $Q_{н.к2}$  — дополнительная мощность конденсаторных батарей, установленных в сети напряжением до 1 кВ, определенная по критерию минимума потерь в сети 6 — 10 кВ.

Значение  $Q_{н.к2}$  находят по формуле:

$$Q_{н.к2} = Q_p - Q_{н.к1} - \frac{z_{к.н} - z_{к.в}}{2Rc_0} U_{ном}^2, \quad (1.6)$$

где  $z_{к.н}$ ,  $z_{к.в}$  — приведенные затраты на 1 квар мощности конденсаторной батареи, установленной в сети напряжением до и выше 1 кВ соответственно;  $U_{ном}$  — номинальное напряжение сети, кВ;  $R$  — активное сопротивление сети, питающей цеховой трансформатор (в общем случае равно эквивалентному сопротивлению сети  $R = R_{э.кв}$ );  $c_0$  — стоимость 1 кВт · ч электроэнергии.

Мощность низковольтных конденсаторных батарей  $Q_{н.к}$  распределяется пропорционально значениям  $Q_p$  на шинах каждого трансформатора. По найденным значениям мощностей  $Q_{н.к1}$  подбирают номинальную мощность фактически устанавливаемых батарей  $Q_{н.к.фг}$  и уточняют загрузку трансформатора в нормальном режиме работы

$$k_3 = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_p - Q_{н.к.ф})^2}}{N_T S_{т.ном}}, \quad (1.7)$$

Загрузка силовых взаиморезервируемых трансформаторов в послеаварийном режиме характеризуется коэффициентом  $k_{з.ав}$ , кото-

рый определяют по формуле

$$k_{з.ав} = \frac{\sqrt{P_p^2 + (Q_p - \sum Q_{н.кi})^2}}{(N_T - 1) S_{т.ном}}, \quad (1.8)$$

где  $N_T$  — число трансформаторов, принятых к установке с номинальной мощностью  $S_{т.ном}$ .

Для масляных трансформаторов мощностью до 2500 кВ · А значение  $k_{з.ав}$  не должно превышать 1,4 при длительности послеаварийного режима не менее 6 ч (время, необходимое для замены поврежденного трансформатора) и коэффициенте  $k_3 = 0,9$ .

Для сухих трансформаторов предельное значение  $k_{з.ав}$  составляет 1,2.

Для трансформаторов, заполненных жидким диэлектриком, значения коэффициентов  $k_3$  и  $k_{з.ав}$  принимают как для масляных трансформаторов.

Наиболее простым и дешевым решением является применение однотрансформаторных цеховых подстанций. На крупных предприятиях, имеющих складской резерв трансформаторов, их можно применять для питания электроприемников III и даже I категории. Однотрансформаторные подстанции могут применяться и для питания электроприемников I категории, если мощность последних не превышает 15 — 20 % мощности трансформатора и возможно резервирование подстанций на вторичном напряжении переключками с АВР. Правила проектирования и общая тенденция повышения надежности электроснабжения ведет к установке двухтрансформаторных подстанций и для рассматриваемых случаев, т.е. к обеспечению всех потребителей как потребителей I категории. При установке однотрансформаторных подстанций они могут быть закольцованы на стороне 0,4 кВ (соединены магистралями или кабельными переключками). Это обеспечивает сохранение электроснабжения при отключении любого трансформатора и возможность загрузки каждого трансформатора до номинального значения,

Двухтрансформаторные цеховые подстанции применяют при преобладании электроприемников I и II категорий и в энергоемких цехах.

Число и мощность трансформаторов цеховых подстанций являются взаимосвязанными величинами, поскольку при заданной расчетной нагрузке цеха число трансформаторов будет меняться в зависимости от принятой единичной мощности КТП. При выборе цеховых трансформаторов обычно приходится сравнивать транс-

форматоры КТП единичной мощностью 630, 1000, 1600, 2500 кВ · А. Увеличение единичной мощности снижает общее количество устанавливаемых трансформаторов, но увеличивает протяженность сетей, а также затраты на коммутационную аппаратуру и др., связанные с ростом токов КЗ. Практика проектирования и эксплуатации отдает предпочтение трансформаторам 1000 кВ · А (и в меньшей степени 630 кВ · А), считая эту мощность оптимальной.

Комплектные ТП 6 – 10 кВ общего назначения для внутренней установки выпускаются одно- и двухтрансформаторными с трансформаторами ТМФ, ТМЗ, ТСЗ, НТЗ. Шкала трансформаторов стандартная: 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 кВ · А. Все КТП выпускают со вторичным напряжением 0,4 кВ, модифицированные 2КТПМ-1000-6 и 2КТПМ-2500-10 выпускаются на 0,69 кВ. Шкафы низкого напряжения КТП комплектуют шкафами типа КРН, КН, ШНВ, ШНЛ, ШНС, ШН и др.

Подстанции с трансформаторами 630 и 1000 кВ · А комплектуют шкафами типа КН, КРН, ШРН с универсальными втычными (выкатными) автоматическими выключателями с моторным приводом или без него со следующими схемами заполнения: шкафы ввода — с выводами шин вверх на магистраль и двумя отходящими линиями; шкафы ввода и секционный — с двумя выключателями на отходящих линиях; шкаф отходящих линий — с тремя выключателями.

Подстанции с трансформаторами 1600 и 2500 кВ · А комплектуют выключателями на вводе, которые отключают соответствующие номинальные токи и токи КЗ. На отходящих линиях могут устанавливаться выключатели, как и на подстанциях с трансформаторами 1000 кВ · А.

### 1.3. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ СВАРОЧНЫХ НАГРУЗОК

Особенностью режимов работы сварочного оборудования является то, что нагрузки имеют резко переменный характер. Это, в свою очередь, приводит к возникновению колебаний напряжения в сети. Для создания нормальных условий работы потребителей электроэнергии, чувствительных к колебаниям напряжения, рекомендуется их питание осуществлять отдельно от сварочных нагрузок.

При расчетной мощности сварочных машин, не превышающей 15 % номинальной мощности цехового трансформатора, питание их целесообразно осуществлять от цехового трансформатора совместно с общей силовой нагрузкой цеха, но по отдельным линиям, подключенным непосредственно к шинам КТП.

При значительной суммарной нагрузке сварочных установок цеха для их питания предусматривают установку отдельных трансформаторов.

Выбор мощности стандартных трансформаторов, питающих различные типы сварочного оборудования, осуществляют по условию

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{эф}}}{0,2 \div 0,6}, \quad (1.9)$$

где  $S_{\text{эф}}$  — расчетная эффективная мощность сварочных машин, кВ · А.

При питании *многоточечных сварочных машин и автоматических сварочных линий (без схемы "ожидания")*

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{эф}}}{0,2 \div 0,3}; \quad (1.10)$$

при питании *одноточечных машин, а также многоточечных сварочных машин и автоматических сварочных линий при наличии схемы "ожидания"*

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{эф}}}{0,35 \div 0,5}; \quad (1.11)$$

при питании *стыковых и шовных машин*

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{эф}}}{0,5 \div 0,6}. \quad (1.12)$$

Если для питания сварочных установок применяют трансформаторы с усиленным креплением обмоток ( $S_{\text{т.ном}} = 2500$  кВ · А,  $u_k = 5,5\%$ ), которые допускают кратности ударных нагрузок  $1,5S_{\text{т.ном}}$  при частоте 300 ударных пиков в сутки и нагрузке, равной  $S_{\text{т.ном}}$ , то мощность трансформатора выбирают по условию

$$S_{\text{т.ном}} \geq \frac{S_{\text{эф}}}{0,7 \div 0,8}. \quad (1.13)$$



## 1.4. КОМПОНОВКА И РАЗМЕЩЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Комплектные трансформаторные подстанции в общем случае состоят из шкафов ввода высшего напряжения (ВН), силовых трансформаторов, шкафов ввода низшего напряжения (НН), шкафов отходящих линий (ШЛ) и секционных шкафов (СШ).

Ввод высшего напряжения на подстанцию выполняют через шкаф ввода ВН, содержащий выключатель нагрузки, либо через выключатель нагрузки с предохранителем типа ВНП, или посредством "глухого ввода" через металлический короб, навешиваемый на трансформатор со стороны вводов ВН. Шкаф ввода ВН рассчитан на подключение от одного до трех питающих кабелей, "глухой ввод" рассчитан на подключение одного кабеля.

Распределительное устройство низшего напряжения (РУ НН) подстанции состоит из отдельных металлических шкафов с вмонтированной аппаратурой, ошиновкой и проводами вторичной коммутации. В состав РУ НН однотрансформаторной подстанции входит шкаф ввода НН и шкафы ШЛ. Распределительное устройство НН двухтрансформаторной подстанции состоит из двух шкафов НН, секционного шкафа (СШ) и линейных шкафов (ШЛ).

Шкафы разделены на отсеки выключателей, шинные и кабельные отсеки и соединяются между собой болтовыми соединителями. В отсеках выключателей устанавливают автоматические выключатели выкатного исполнения, закрываемые дверью, снабженной замками со специальным ключом.

На дверях шкафов с фасада установлены ручные приводы для включения выключателей, сигнальные лампы, кнопки, ключи управления и приборы. В верхней части со стороны фасада в шкафах НН и СШ имеется релейная ячейка, в которой установлена аппаратура автоматики, защиты и сигнализации. В релейных ячейках вводных шкафов устанавливают трехфазный счетчик активной энергии.

В шинном отсеке шкафов расположены сборные шины и оснастка к выключателям. В вводных шкафах НН предусмотрен выход сборных шин на магистраль.

В КТП с заземленной нейтралью измерение нагрузки каждой фазы ввода РУ НН осуществляется амперметром с переключателями. На отходящих линиях измерение нагрузки осуществляется в фазе А. В линейных и секционных шкафах по заказу может быть установлен однофазный счетчик на каждую отходящую линию.

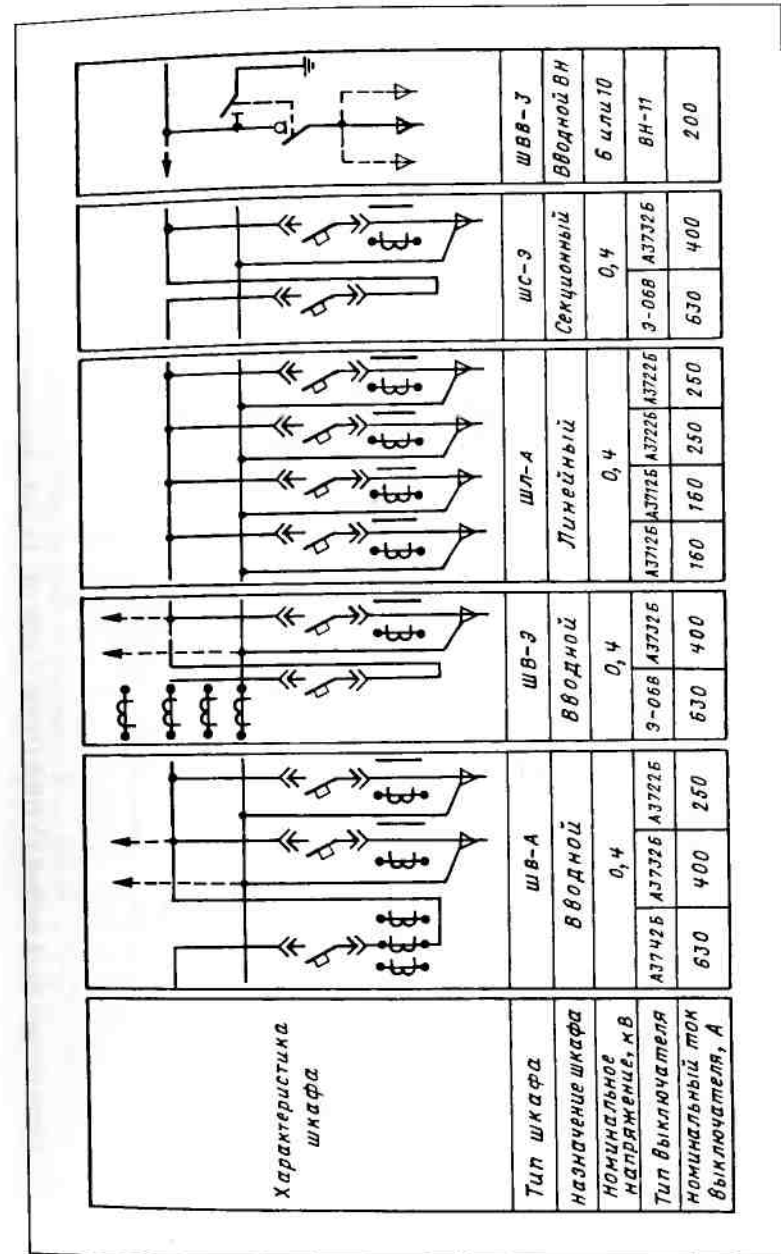


Рис. 1.3. Схема главных цепей шкафов РУ НН КТП 400 кВ с глухозаземленной нейтралью

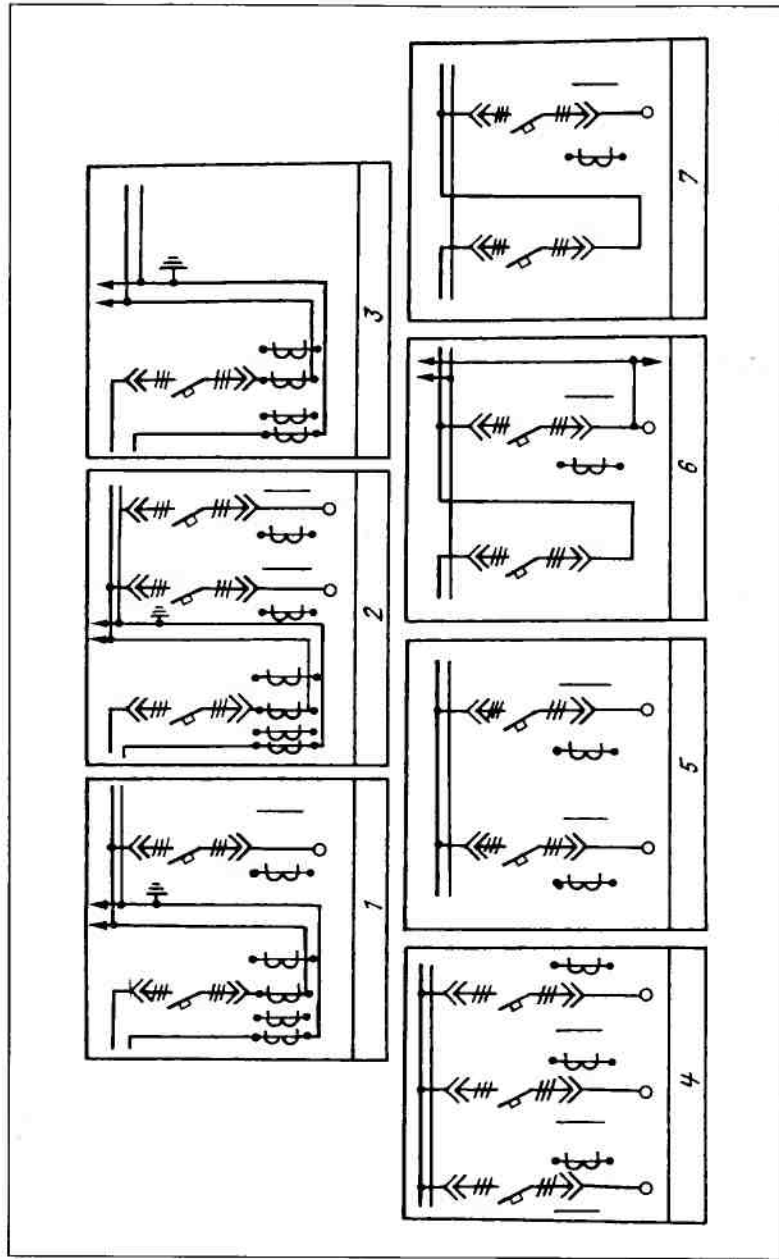


Рис. 1.4. Схема главных цепей шкафов РУ НН КТП 630 — 2500 кВ · А с глухозаземленной нейтралью

АВР 35

На рис. 1.3 и рис. 1.4 приведены схемы главных цепей шкафов РУ НН КТП с заземленной нейтралью мощностью 400 и 630 ÷ 2500 кВ · А.

По способам компоновки трансформаторной подстанции выпускают КТП однорядного — как однотрансформаторные, так и двухтрансформаторные (рис. 1.5, 1.6) и двухрядного (двухтрансформаторные) расположения.

В зависимости от места размещения все подстанции промышленных предприятий подразделяют на пристроенные, встроенные, отдельно стоящие и внутрицеховые.

*Пристроенной* называют подстанцию, непосредственно примыкающую к основному зданию и имеющую с ним одну общую стену. Подстанция является *встроенной*, если ее закрытое помещение имеет две или три общие стены со смежными помещениями или с самим зданием цеха.

Пристроенные и встроенные подстанции сооружают, в основном, в небольших или средних по мощности цехах (до нескольких мегаватт). На таких подстанциях устанавливают масляные трансформаторы с выкаткой наружу.

*Отдельно стоящие подстанции*, как правило, сооружают для электроснабжения нескольких небольших по мощности объектов, расположенных на территории предприятия.

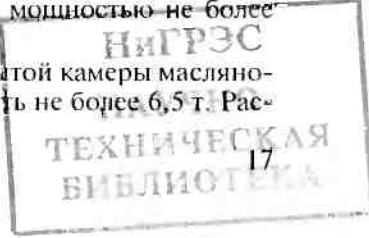
Размещение отдельно стоящей подстанции осуществляют в центре нагрузок питаемых объектов.

*Внутрицеховые КТП* устанавливают непосредственно в цехе открыто или в отдельных помещениях. Их располагают на тех производственных площадях, которые не могут быть использованы для установки технологического оборудования и ближе к центру электрических нагрузок. При установке КТП в отдельных помещениях применяют масляные или сухие трансформаторы. При значительном количестве внутрицеховых КТП рекомендуется установка сухих трансформаторов, что позволяет применять легкие ограждающие конструкции.

Применение масляных трансформаторов на внутрицеховых подстанциях предъявляет особые требования к устройству подстанции [2].

На внутрицеховой закрытой подстанции рекомендуется устанавливать одну КТП (допускается установка не более трех КТП) с масляными трансформаторами суммарной мощностью не более 6,5 МВ · А.

При внутрицеховом расположении закрытой камеры масляного трансформатора масса масла должна быть не более 6,5 т. Рас-



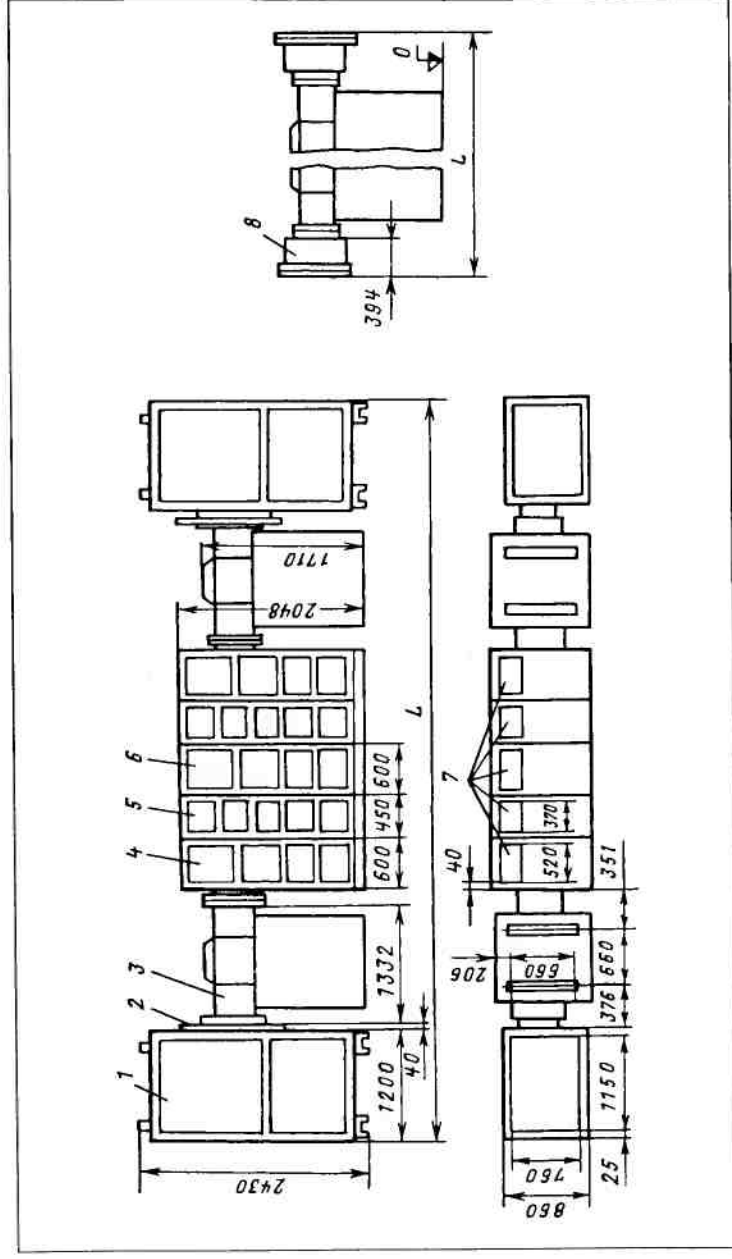


Рис. 1.5. Однорядное расположение двухтрансформаторной подстанции  $2 \times 400$  кВ · А:

1 — шкаф высоковольтный; 2 — соединительное устройство со стороны ВН; 3 — силовой трансформатор; 4 — шкаф ВН; 5 — шкаф ШЛ; 6 — шкаф ШС; 7 — проемы для прохода кабелей в днищах шкафов; 8 — ввод ВН в виде "глухого ввода"

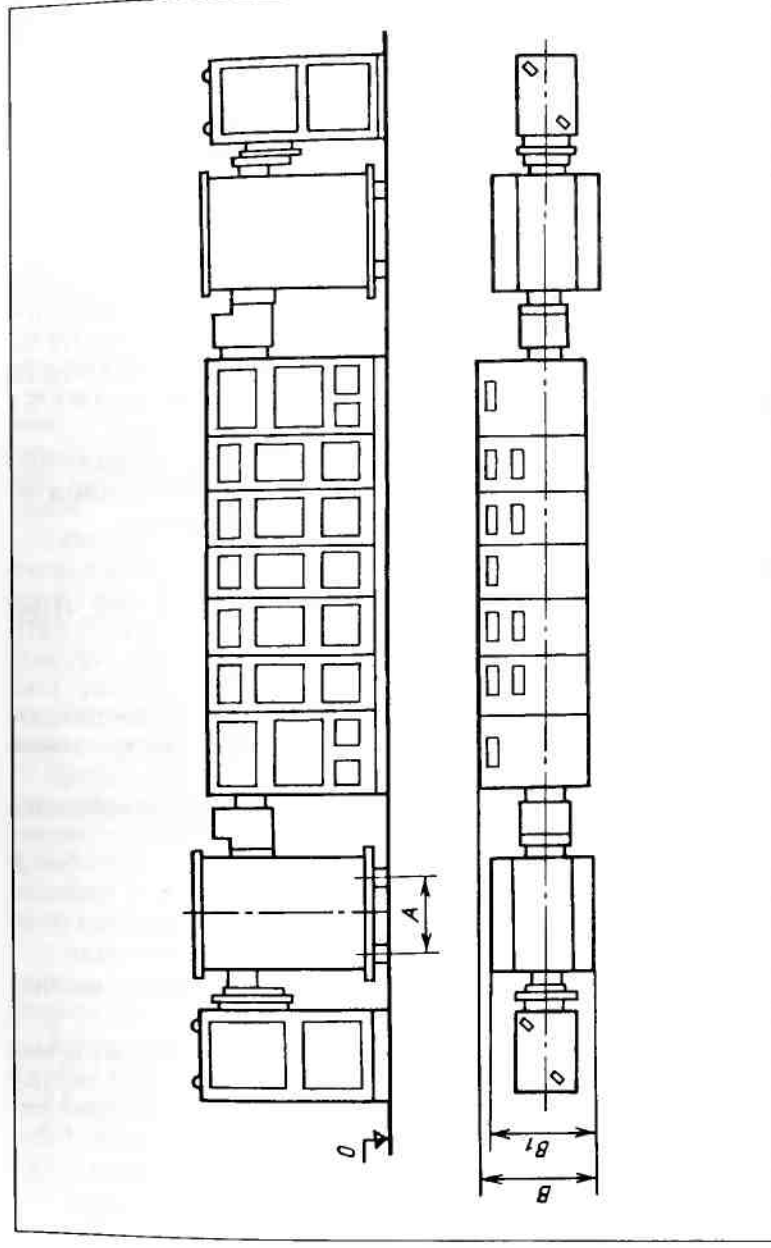


Рис. 1.6. Однорядное расположение двухтрансформаторной КТП (мощность трансформаторов 630 — 2500 кВ · А)

стояние между закрытыми помещениями разных подстанций не нормируется.

На пристроенных, встроенных, отдельно стоящих и внутрицеховых (открытых и закрытых) КТП с масляными трансформаторами независимо от того, имеют они выходы в производственное здание или наружу, устраивают маслоприемник, вмещающий не менее 20 % полного объема масла в трансформаторе, с отводом в маслоборник или заглубленный маслоприемник без отвода масла, рассчитанный на 100 % его объема.

Площадь заглубленного маслоприемника должна быть больше площади основания трансформатора КТП. Его перекрывают решеткой со слоем гравия или гранитного щебня толщиной 25 см с частотами 30 — 70 мм. Уровень масла, в случае аварии, должен быть на 5 см ниже решетки. Дно маслоприемника должно иметь уклон 2 % в сторону приемника.

Удаление масла из маслоприемника после аварии осуществляют специальным переносным насосным агрегатом с электроприводом.

Объем маслоприемника можно рассчитать по формуле

$$V = \frac{M_{\text{т.м}}}{\delta_{\text{т.м}}}, \quad (1.14)$$

где  $M_{\text{т.м}}$  — масса трансформаторного масла в трансформаторе, кг;  
 $\delta_{\text{т.м}}$  — удельная плотность трансформаторного масла, равная 880 — 890 кг/м<sup>3</sup>.

Масса масла в трансформаторе при отсутствии справочных данных может быть найдена по формуле

$$M_{\text{м}} = 0,9S_{\text{т.ном}}$$

где 0,9 — расход масла на единицу трансформаторной мощности, кг/кВ · А.

В помещениях КТП с маслозаполненными трансформаторами предусматривают двухстворчатые ворота, открывающиеся наружу на угол 180°. При ширине створок дверей более 1,5 м предусматривают калитку, используемую как второй выход для персонала. Габариты ворот должны превышать на 200 — 350 мм размеры трансформатора. Вместо ворот допускаются монтажные проемы в стенах для выкатки трансформаторов и другого оборудования.

## 1.5. СУХИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ С НЕГОРЮЧИМ ЖИДКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ [17]

В настоящее время потребность в пожаробезопасных, экологически чистых силовых трансформаторах достаточно высока.

Сухие трансформаторы больших мощностей и классов напряжения находят все более широкое применение. Они необходимы в электроустановках промышленных предприятий, в частности нефтехимической, металлургической, машиностроительной, целлюлозно-бумажной отраслей, а также особенно для электроснабжения общественных зданий, сооружений, транспорта (универмаги и общественные центры, насосные станции, спортивные и культурные сооружения, линии метрополитена, аэровокзалы и др.).

Отечественные сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением предназначены для установки в сухих закрытых помещениях с относительной влажностью воздуха не выше 80 % при отсутствии в атмосфере помещений агрессивных веществ и пыли.

Обмотки отечественных трансформаторов серии ТСЗ выполняют из алюминиевого, а серии ТСЗС — из медного провода с изоляцией класса нагревостойкости В. Все трансформаторы имеют ПБВ ± 2 × 2,5 %, осуществляемое путем перестановки контактных пластин на панелях зажимов, расположенных внутри кожуха. Каждый трансформатор имеет защитный кожух, предохраняющий активную часть трансформатора от попадания посторонних предметов и допускающий доступ охлаждающего воздуха.

После прекращения выпуска и вывода из эксплуатации трансформаторов, заполненных негорючей токсичной и канцерогенной жидкостью типа совтол (зарубежные жидкие аналоги: аскарель, клюфен, пиранол, делор и др.), воздействующей на экологию окружающей среды, вопрос применения сухих трансформаторов высокого класса нагревостойкости стал первоочередным.

Один из путей удовлетворения спроса в пожаробезопасных и экологически чистых трансформаторах — создание сухих трансформаторов с изоляцией из синтетических арамидных материалов.

В настоящее время широкое применение нашел материал “номекс” (фирма “Дюпон”, США), представляющей собой ароматический полиамид, известный под названием “арамид”.

В России в последние годы получили распространение сухие трансформаторы с литой изоляцией “Trihal” (фирма “Шнейдер Электрик”, Франция). Литая изоляция класса F, залитая в вакууме, состоит из эпоксидной смолы на основе бифенола необходимой

вязкости, обеспечивающей хорошее качество пропитки обмоток; ангидридного отвердителя; активного порошкового наполнителя, состоящего из кремнезема (диоксида кремния) и тригидрата алюминия, тщательно смешанных со смолой и отвердителем; кремнезем усиливает механическую прочность литой изоляции и улучшает теплоотдачу. Обмотка низкого напряжения изготавливается из алюминиевой ленты (или медной); обмотку высокого напряжения выполняют из изолированного алюминиевого провода (или медного).

Данные трансформаторы сертифицированы в России.

Кроме сухих пожаробезопасных трансформаторов в ряде зарубежных стран получили развитие трансформаторы с заливкой экологически нейтральными негорючими синтетическими и кремний-органическими жидкостями (КОЖ) собственного производства. К таким жидкостям относится новая жидкость, названная "формел НФ", обладающая полной невозгораемостью и допустимым уровнем токсичности (Великобритания).

Трансформаторы с заполнением КОЖ дороже масляных, но дешевле сухих. ПО "Кремнийполимер" (г. Запорожье) освоил производство КОЖ марки ПСМ-100.

В России ОАО "Уралэлектротяжмаш" выпускает силовые трансформаторы с заполнением негорючим экологически чистым диэлектриком "Midel 7131"; эта электроизоляционная охлаждающая жидкость прошла сертификацию в Минздраве РФ и рекомендована для электротехнической промышленности.

Жидкость "Midel 7131" имеет следующие основные характеристики:

- хорошая экологическая совместимость, т.е. биологическая расщепляемость, низкая токсичность, беспроблемная утилизация;
- хорошие термохимические свойства, т.е. низкий коэффициент термического расширения;
- хорошие диэлектрические свойства, т.е. небольшая зависимость диэлектрических свойств от влияния влаги;
- высокая температура воспламенения;
- отсутствие токсичных газов при горении.

Трансформаторы с заполнением жидкостью "Midel 7131" широко используются для замены трансформаторов с заполнением аскарелями (типа совтол и др.) и применяются в местах, где требуется высокая пожаробезопасность (жилые и служебные помещения, производственные помещения в ряде промышленных отраслей).

## ГЛАВА ВТОРАЯ

# Внутрицеховое распределение электроэнергии

## 2.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦЕХОВОЙ СЕТИ

Для питания цеховых потребителей электроэнергии, в основном, применяют систему трехфазного переменного тока напряжением 380 В с глухозаземленной нейтралью цехового трансформатора.

На выбор схемы распределения электроэнергии и ее конструктивное исполнение оказывают влияние следующие факторы: требования к бесперебойности питания, размещение технологического оборудования по площади цеха, условия среды в цехе, размещение трансформаторных подстанций.

Схема электроснабжения должна быть надежна и безопасна, удобна в эксплуатации и экономична, т.е. соответствовать минимуму расчетных затрат на ее сооружение.

Схема электроснабжения не должна быть многоступенчатой и содержать недогруженное оборудование, должен быть использован наиболее простой способ прокладки сети.

Распределительные устройства, как правило, размещают вблизи центров нагрузок. Питающие сети должны иметь, по возможности, минимальную длину. Каждый участок или отделение цеха питаются от своих распределительных устройств, исключая по возможности подключение потребителей других участков или отделений цеха.

В установках с параллельными технологическими потоками рекомендуется схему распределения электроэнергии строить так, чтобы аварийное отключение или отключение для ревизии или ремонта одного из элементов (одного трансформатора, распределительного пункта и т.д.) приводило к отключению механизмов, относящихся только к одному технологическому потоку.

В схемах электроснабжения применяют электрооборудование со степенью защиты, соответствующей характеру среды в помещении.

В соответствии с ПУЭ производственные помещения в зависимости от характера окружающей среды делят на следующие классы: сухие, влажные, сырые, особо сырые, жаркие, пыльные, с химически активной или органической средой. Кроме того, выделяют помещения со взрыво- и пожароопасными зонами [2].

В ПУЭ приводятся рекомендации по допустимой степени защиты оборудования в зависимости от характера среды.

## 2.2. СХЕМЫ ПИТАНИЯ СИЛОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В цеховых сетях различают питающую и распределительную сети. Линии цеховой сети, отходящие от цеховой трансформаторной подстанции или вводного устройства, образуют питающую сеть, а линии, подводящие энергию от шинопроводов или распределительных пунктов непосредственно к электроприемникам, — распределительную сеть.

Схемы могут быть: радиальными, магистральными и смешанными, с односторонним и двусторонним питанием.

При магистральной схеме питание от подстанций к отдельным узлам нагрузки и мощным приемникам осуществляется по отдельной линии.

Магистральные силовые питающие сети рекомендуется применять: в энергоемких производствах при распределении электроэнергии от трансформаторов мощностью 1600 и 2500 кВ · А;

при создании модульных сетей для производств с равномерно распределенной нагрузкой по площади цеха;

при частых заменах технологического оборудования.

Чаще всего такие схемы применяют в цехах машиностроительных заводов, в цехах цветной металлургии, на предприятиях приборостроения, в экспериментальных производствах и др.

Магистральные сети выполняют шинопроводами или кабелями.

Подключение магистрали к сборным шинам распределительного КТП осуществляют через линейные автоматические выключатели или наглухо, без коммутационного аппарата (рис. 2.1 и 2.2).

Магистрали выполняют неизолированными шинами или комплектными шинопроводами типа ШМА. При глухом присоединении магистрали к трансформатору (“блок трансформатор — магистраль”) схемы отличаются простотой, надежностью и экономичностью и могут быть реализованы при применении комплектных и некомплектных трансформаторных подстанций.

Схемы блоков трансформатор — магистраль применяют, как правило, с числом отходящих от КТП магистралей, не превышающих

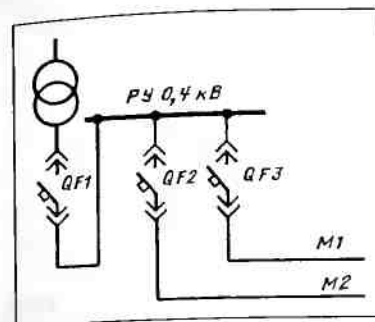


Рис. 2.1. Схема подключения магистралей к КТП через автоматические выключатели отходящих линий

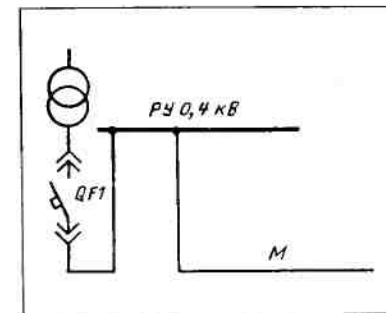


Рис. 2.2. Схема блока трансформатор — магистраль

числа установленных трансформаторов. К трансформаторам мощностью 1000 и 2500 кВ · А допускается подключать по две магистрали. Во всех указанных случаях пропускная способность магистральных шинопроводов не должна превышать пропускную способность питающего трансформатора с учетом его перегрузочной способности в послеаварийном режиме. Рекомендуемое количество комплектных шинопроводов, подключаемых к ТП, приведены в табл. 2.1 [1].

Магистральные схемы, выполненные шинопроводами, относят к высоконадежным элементам системы электроснабжения. Их применяют для питания потребителей любой категории надежности. Если требуется резервирование питания, то применяют двухтрансформаторные подстанции с установкой АВР на секционном выключателе (рис. 2.3).

Таблица 2.1. Количество комплектных шинопроводов, подключаемых к КТП

Номинальная мощность трансформатора, кВ · А	Предельное число магистралей	Число и номинальный ток магистралей, шт. · А
1000	1	1 × 1250
		1 × 1600
1600	2	1 × 1250 + 1 × 1600
		1 × 2500
2500	2	2 × 1600
		1 × 1600 + 1 × 2500
		1 × 2500
		1 × 3200

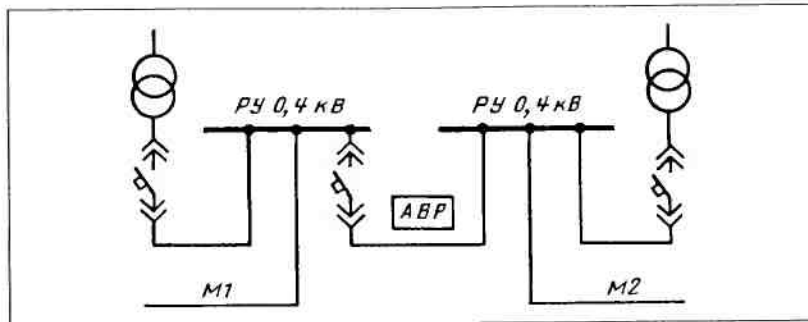


Рис. 2.3. Схема подключения магистралей к двухтрансформаторной подстанции

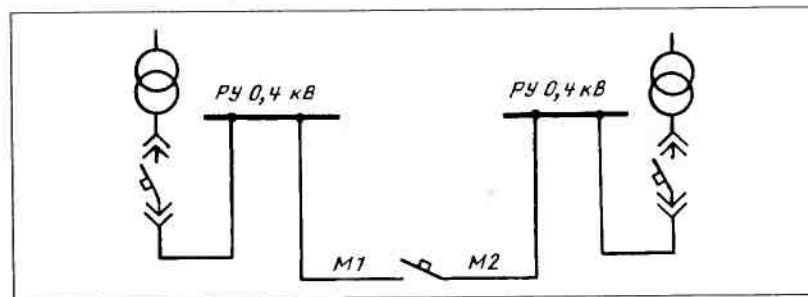


Рис. 2.4. Схема подключения магистралей к одностранформаторным подстанциям

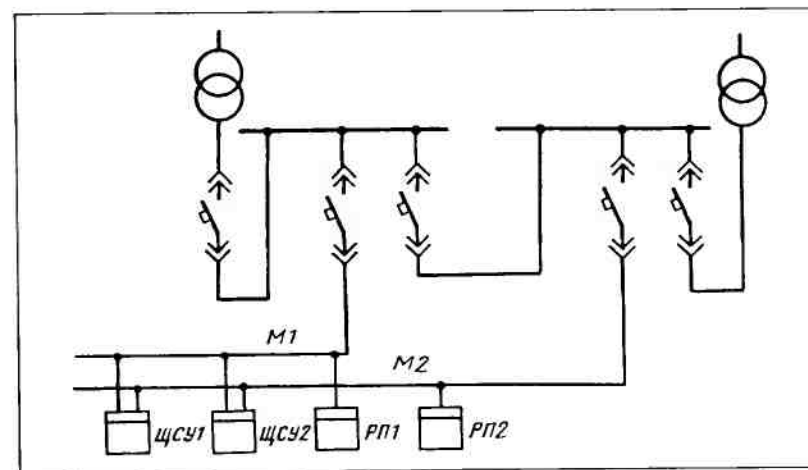


Рис. 2.5. Схема питания потребителей I категории от двух магистралей

При использовании одностранформаторных подстанций, секционный выключатель устанавливают в цехе (рис. 2.4); он должен быть заблокирован с выключателем, установленным на подстанции.

Для энергоемких приемников I категории надежности применяют магистральную схему, приведенную на рис. 2.5. ЩСУ1 и ЩСУ2, питающие ответственные потребители, получают питание от двух магистралей; менее ответственные потребители питаются от одной магистрали (РП1 и РП2).

Магистральные сети, выполненные комплексными шинпроводами, имеют высокую стоимость, поэтому их применяют при трех и более ответвлениях с токами не менее 250 А. При сложных трассах (большом числе поворотов, разных отметках и др.) целесообразно отдельные участки шинпровода заменять многоамперным кабелем и прокладывать на минимально допустимой ПУЭ высоте от уровня пола или площадки обслуживания — 2,5 м.

Для электроприемников I и II категорий надежности при их компактном расположении в цехе применяют схему блока ТП-щит (рис. 2.6).

При расположении ТП и щита в одном помещении или в соседних помещениях не требуется установка коммутационных аппаратов на магистралях и шины щита рассматривают как продолжение сборных шин ТП. Такие схемы рациональны при питании от ТП группы электродвигателей — насосов, компрессоров, вентиляторов.

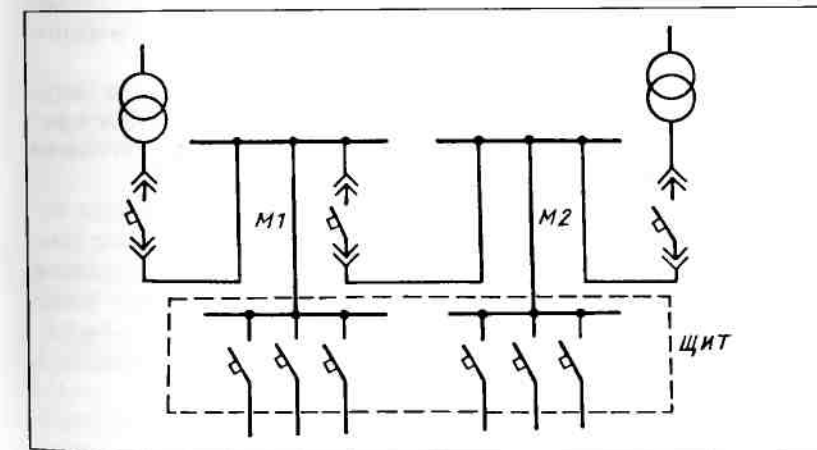


Рис. 2.6. Схема блока ТП-щит

Магистральные схемы, выполненные комплектными шинопроводами типа ШМА-68 Н-1600, допускающими кратковременные перегрузки, используют для питания машин контактной сварки. Питание электроосвещения, устройств бесконтактной автоматики и других потребителей, предъявляющих повышенные требования к качеству электроэнергии, при этом осуществляют от отдельных трансформаторов.

Магистральные схемы, выполненные шинопроводами, прокладывают в зонах, где их повреждение транспортом или перемещаемыми грузами маловероятно.

Ответвления от магистральных шинопроводов длиной до 6 м к вводным устройствам технологического оборудования, к щитам, распределительным пунктам и другим электроустройствам, имеющим на вводе аппараты защиты, как правило, выполняют без автоматических выключателей на шинопроводах. При больших длинах ответвлений подключение к магистральному шинопроводу осуществляют через вводный аппарат.

В тех случаях, когда характер среды в цехе или размещение технологического оборудования по площади цеха делают невозможным применение магистральных шинопроводов, используют кабельные магистрали (рис. 2.7).

Как правило, сечение кабельных магистралей выполняют одинаковым по всей длине, однако с целью экономии проводникового материала допускается снижение сечения кабельной линии на участках, питающих отдельные РП.

При радиальной схеме питания одного достаточно мощного потребителя или группы потребителей осуществляют от ТП или вводного устройства по отдельной питающей линии.

Радиальные схемы выполняют одноступенчатыми, когда питание осуществляется непосредственно от ТП (РПЗ на рис. 2.8) и двухступенчатыми, когда питание осуществляется от промежуточного РП (РП2).

Радиальные схемы применяют для питания сосредоточенных нагрузок большой мощности, при неравномерном размещении приемников в цехе или на отдельных его участках, а также для питания приемников во взрывоопасных, пожароопасных и пыльных помещениях, где невозможно применение магистральных схем. Их выполняют кабелями или проводами, прокладываемыми открыто, в трубах, в специальных каналах.

К достоинствам радиальных схем относятся: высокая надежность и удобство автоматизации, поэтому они рекомендуются для питания потребителей I категории.

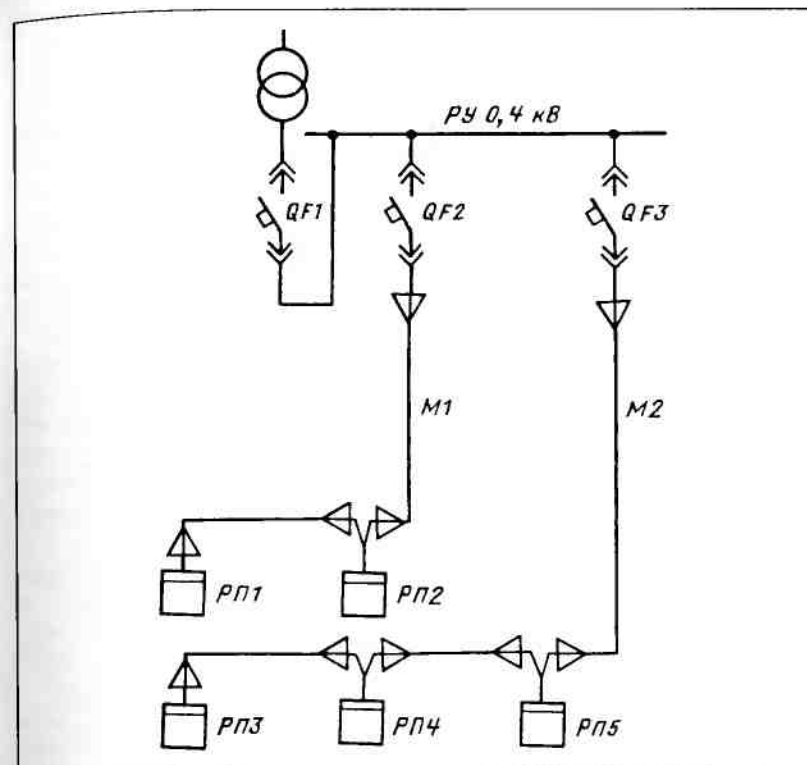


Рис. 2.7. Схема кабельных магистралей

К недостаткам этих схем относятся: значительный расход проводникового материала, ограниченная гибкость сети при перемещении технологического оборудования, необходимость в дополнительных площадях для размещения силовых РП.

Питание отдельных потребителей (исключая потребителей мощностью более 55 кВт) в цехе осуществляют от распределительных шинопроводов, распределительных щитов и пунктов, щитов и шкафов станций управления.

Выбор схемы распределения зависит от условий среды в цехе, от размещения и габаритов технологического оборудования, от особенностей подъемно-транспортных работ в цехе. При нормальном характере среды в цехе и расположении оборудования рядами для распределения электроэнергии используют комплектные шинопроводы типа ШРА, выпускаемые на токи 250, 400, 630 А. Отдельные



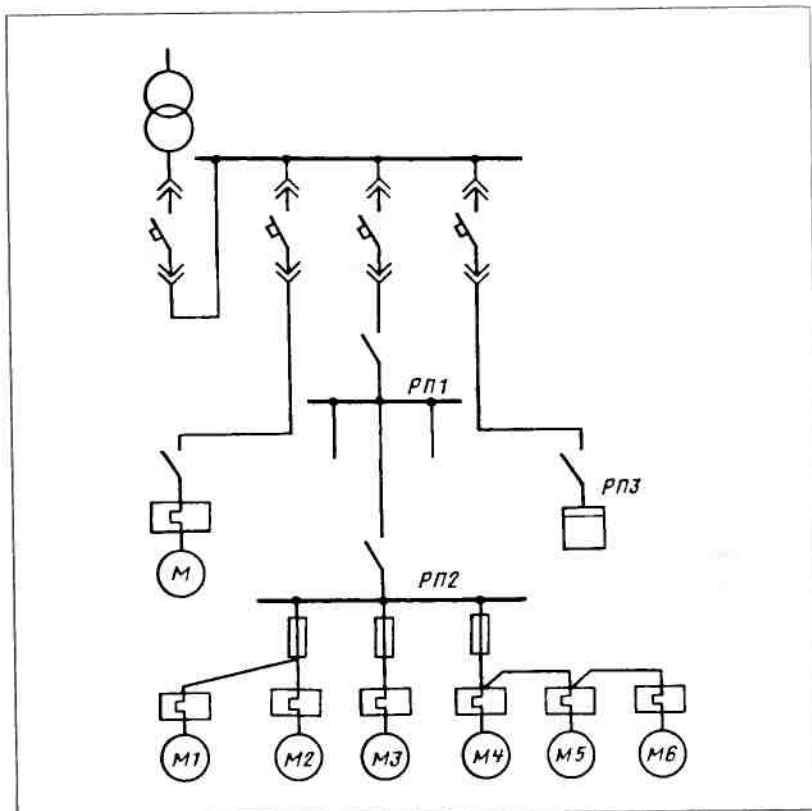


Рис. 2.8. Радиальная схема распределения электроэнергии

приемники подключают к ШРА через ответвительные коробки кабелем или проводом, проложенным в трубах или металлорукавах. Ответвления от ШРА длиной до 6 м к вводным устройствам технологического оборудования, имеющим собственный защитный аппарат, выполняют без установки аппарата защиты. При большей длине, в ответвительных коробках ШРА устанавливают автоматический выключатель или предохранитель. На каждой секции ШРА длиной 3 м предусматривают восемь ответвительных коробок (по четыре с каждой стороны).

С целью рационального использования шинпроводов количество подключенных потребителей должно быть не менее двух на каждые 6 м ШРА [1].

Для штепсельного присоединения ответвительных коробок на секциях шинпровода предусмотрены окна с автоматическими закрывающимися шторками. Это обеспечивает безопасное присоединение коробок к шинпроводу, находящемуся под напряжением в процессе эксплуатации. При открывании крышки коробки питание приемника электроэнергии прекращается. Присоединение ШРА к магистральному шинпроводу осуществляется кабельной перемычкой, соединяющей вводную коробку ШРА с ответвительной секцией ШМА. Вводная коробка ШРА может быть установлена на конце секции или в месте стыка двух секций.

Радиальные схемы распределительных сетей с силовыми пунктами, на которых установлены аппараты защиты ответвлений, применяют в местах, где использованию ШРА препятствуют наличие кранов, условия среды, условия территориального распределения электроприемников и другие условия. При этом распределительные устройства (РП, ЩСУ, СУ) располагают как можно ближе к электроприемникам.

Следует избегать питание малоамперных (до 20 А) электроприемников отдельными линиями от силовых пунктов, в особенности от пунктов с автоматическими выключателями. В этом случае подключение приемников возможно по схеме "шлейфа" (М4, М5, М6 на рис. 2.8) или под один защитный аппарат (М1, М2).

При наличии в цехе подвижного инструмента (например, при работе на сборочном конвейере) его питание осуществляют от комплектных троллейных шинпроводов с медными шинами. Для главных троллеев мостовых кранов и другого подъемно-транспортного оборудования такие шинпроводы применяют в тех случаях, когда применение открытых троллеев недопустимо по условиям стесненности или повышенной опасности поражения электрическим током.

### 2.3. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Питание электрического освещения, как правило, производится от общих для силовых и осветительных нагрузок трансформаторов напряжением 380/220 В самостоятельными линиями.

Если в цехе имеются нагрузки, ухудшающие показатели качества электроэнергии, то питание таких нагрузок и освещения осуществляют от разных трансформаторов.

Осветительные сети внутреннего освещения подразделяют на питающие и групповые. К питающей сети относят линии, прокладываемые от ТП или вводно-распределительного устройства (ВРУ)

до групповых щитков, к групповой сети — линии от групповых щитков до светильников (рис. 2.9). С целью рационального использования автоматических выключателей трансформаторной подстанции, групповые щитки питают от магистральных щитков (пунктов) (рис. 2.10, 2.11). Если в цехе используется схема блока трансформатор — магистраль, то магистральные пункты питают от головных участков магистрали (рис. 2.12).

В схеме электрического освещения предусматривают раздельное питание рабочего и аварийного освещения. В цехах, где установлено несколько трансформаторов, эти виды освещения питают от разных трансформаторов, присоединенных к независимым источникам. Если установлен один трансформатор, то питание рабочего и аварийного освещения осуществляют отдельными линиями, начиная от магистрального щитка (рис. 2.13).

В зависимости от мощности осветительной нагрузки, размеров и конфигурации осветительной сети, питающую линию подводят непосредственно к групповому щитку или к магистральному пункту.

Возможен также вариант, когда от магистрального пункта отходят как групповые линии к светильникам, так и линии к групповым щиткам или осветительным шинпроводам (рис. 2.14).

В качестве осветительных магистральных и групповых щитков применяют распределительные пункты серии ПР8513 с трехполюсными автоматическими выключателями и ПОР 8513 с однополюсными автоматическими выключателями.

В больших производственных зданиях осветительную питающую сеть выполняют с использованием распределительных шинпроводов типа ШРА. В этом случае вместо групповых щитков к шинпроводу подключают группы светильников через отдельные аппараты защиты и управления.

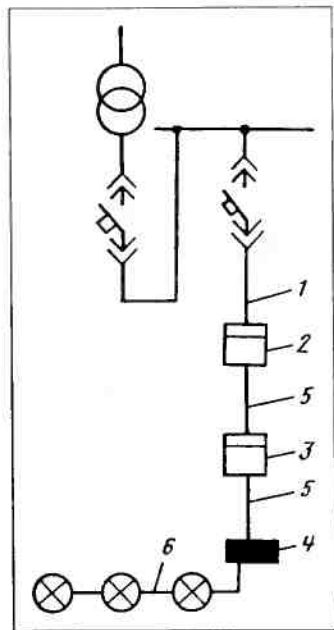


Рис. 2.9. Принципиальная схема осветительной сети:

1 — питающая сеть; 2 — вводно-распределительное устройство; 3 — магистральный пункт (щиток); 4 — групповой щиток; 5 — питающая сеть; 6 — групповая сеть

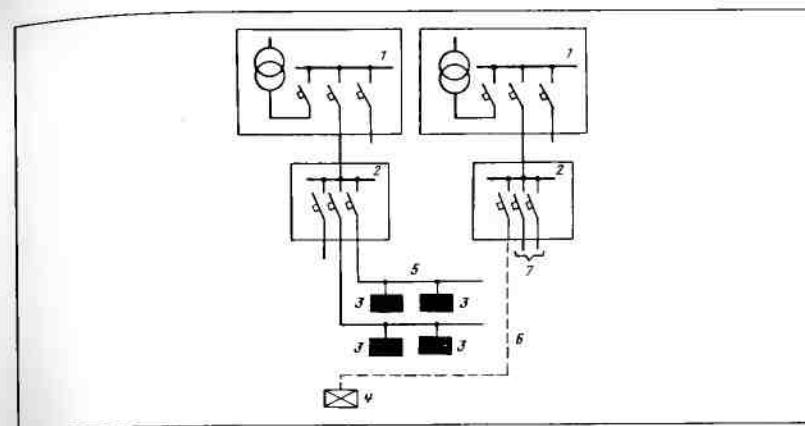


Рис. 2.10. Схема питания рабочего и аварийного (эвакуационного) освещения от однотрансформаторных КТП:

1 — КТП; 2 — магистральный щиток (пункт); 3 — групповой щиток освещения; 4 — групповой щиток аварийного освещения; 5 — линия питающей сети рабочего освещения; 6 — линия питающей сети аварийного (эвакуационного) освещения; 7 — питание рабочего освещения других участков здания или силовых потребителей

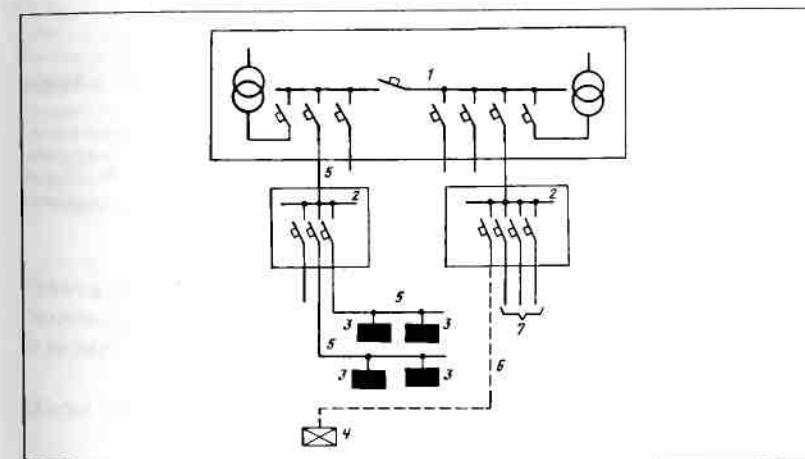


Рис. 2.11. Схема питания рабочего и аварийного (эвакуационного) освещения от двухтрансформаторной КТП:

1 — КТП; 2 — магистральный щиток (пункт); 3 — групповой щиток освещения; 4 — групповой щиток аварийного освещения; 5 — линия питающей сети рабочего освещения; 6 — линия питающей сети аварийного (эвакуационного) освещения; 7 — питание рабочего освещения других участков здания или силовых потребителей

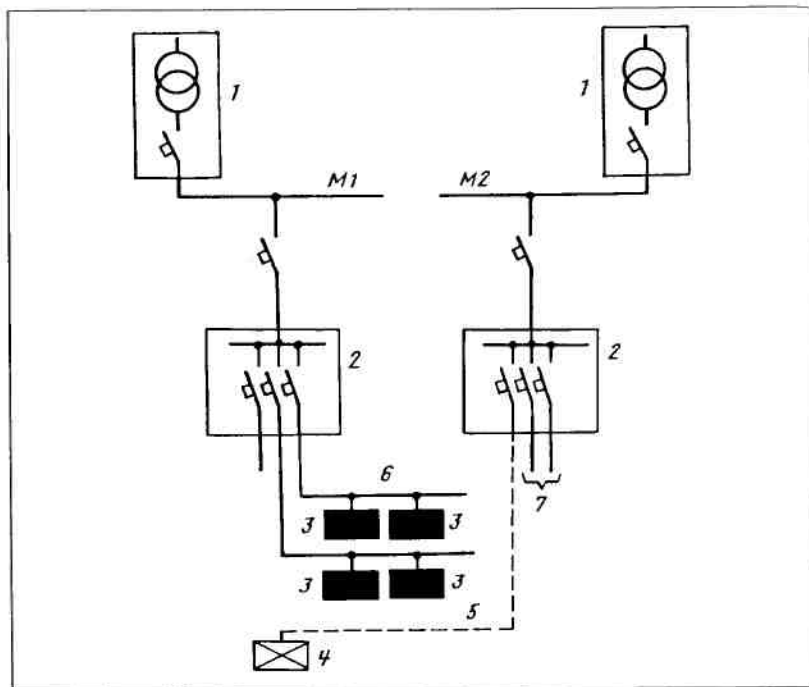


Рис. 2.12. Схема рабочего и аварийного (эвакуационного) освещения от блоков трансформатор — магистраль:

1 — КТП; M1, M2 — магистральные шинопроводы; 2 — магистральные пункты; 3 — групповой щиток рабочего освещения; 4 — групповой щиток аварийного освещения; 5 — линия питающей сети аварийного освещения; 6 — линия питающей сети рабочего освещения; 7 — питание рабочего освещения других участков здания или силовых потребителей

Групповая сеть предназначена для непосредственного подключения светильников внутреннего освещения и штепсельных розеток. На рис. 2.15 представлены схемы групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом.

На рис. 2.16 представлены варианты распределения ламп между фазами в трехфазной группе.

Верхний вариант оптимален с точки зрения потерь напряжения в линии, так как «центры тяжести» нагрузок всех фаз в этом случае совпадают, но этот вариант не является лучшим в отношении ослабления пульсаций освещенности и, кроме того, в случае отключения одной-двух фаз создается случайное распределение освещенности вдоль линий.

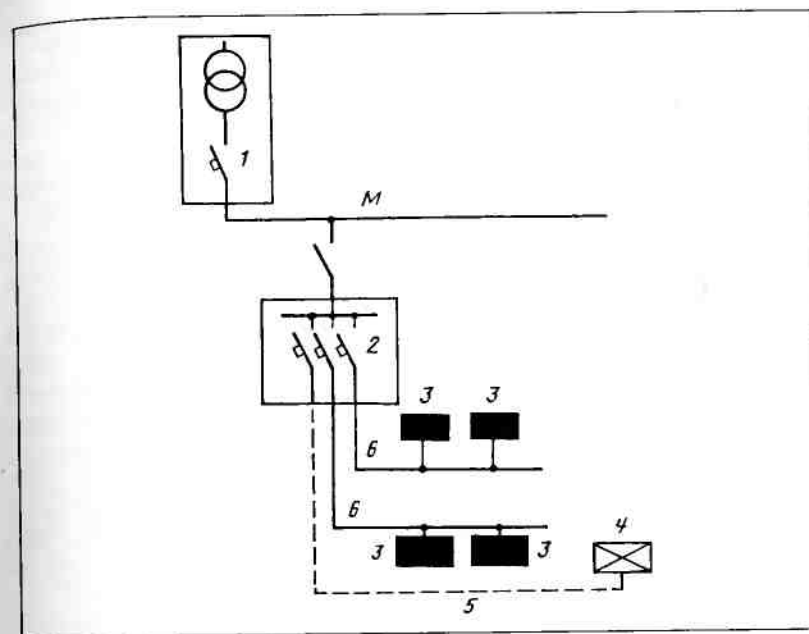


Рис. 2.13. Схема питания освещения от однострансформаторной подстанции:

1 — КТП; M — магистраль; 2 — магистральный щиток; 3 — групповой щиток рабочего освещения; 4 — групповой щиток аварийного освещения; 5, 6 — питающие линии рабочего и аварийного освещения

Нижний вариант применяют наиболее часто, так как он лишен недостатков верхнего варианта.

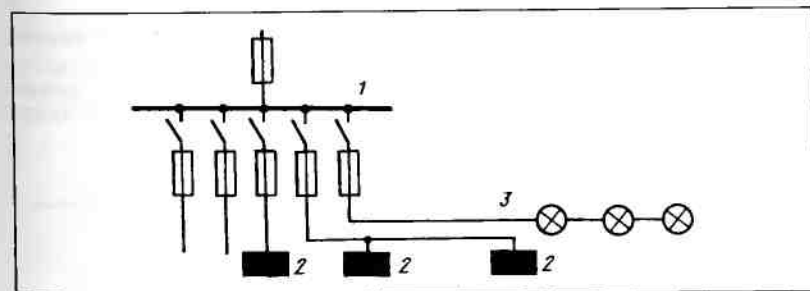


Рис. 2.14. Схема питания групповых щитков и групповых линий от магистрального щитка:

1 — магистральный щиток; 2 — групповой щиток; 3 — групповая линия

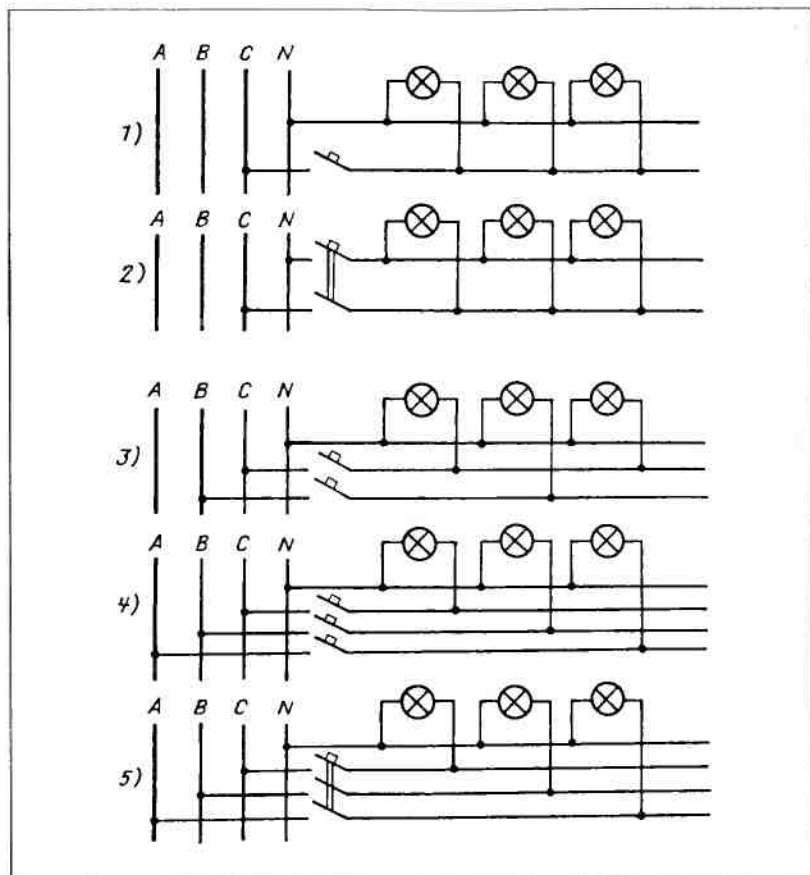


Рис. 2.15. Схемы групповых линий при трехфазной системе с нулевым проводом: 1 — двухпроводная; 2 — двухпроводная для взрывоопасных помещений класса В-1; 3 — трехпроводная; 4 — четырехпроводная, защищаемая однополюсными автоматическими выключателями; 5 — четырехпроводная, защищаемая трехполюсным автоматическим выключателем

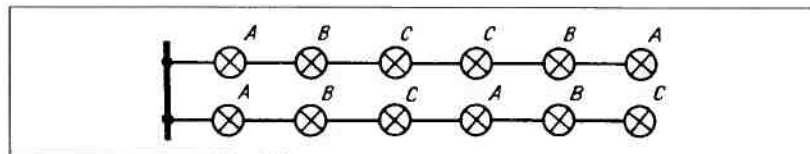


Рис. 2.16. Варианты распределения ламп между фазами в трехфазной группе

Групповые сети выполняют также осветительными шинопроводами: двухпроводными (фаза — нуль) ШОС2-25, ШОС80 и четырехпроводными (три фазы — нуль) ШОС4-25, если нагрузка их не менее 50 % номинального тока шинопровода. Шинопроводы используют в помещениях любого назначения с нормальной средой, кроме особо сырых, при расположении светильников рядами.

Питание групповых сетей осуществляют также от групповых пунктов, в качестве которых используют серию пунктов ПР (ПОР) 8513, заменяющую серию осветительных ящиков (ЯОУ8500, ЯВ, ЯР). Для групповых сетей находят применение щитки типов ОП, ОЩ, ОЩВ, УОЩВ. Щитки рассчитаны на напряжение 380/220 В, укомплектованы однополюсными автоматическими выключателями; ток расцепителей одинаков для всех автоматических выключателей одного щитка. Количество и сечение проводов, присоединяемых к вводному зажиму, до  $2 \times 50 \text{ мм}^2$ .

Для групповых осветительных сетей производственных помещений, использующих разрядные лампы высокого давления (ДРЛ, ДРИ, ДРИЗ, ДНаТ), при групповой компенсации реактивной мощности трехфазными конденсаторами, присоединенными к групповым линиям, применяют распределительные пункты серии ПР41, рассчитанные на напряжение 380/220 В. Пункт ПР41 для напольной установки рассчитан на четыре трехфазные групповые линии, в нем установлено четыре трехфазных конденсатора мощностью по 18 квар. К пунктам допускается присоединение питающих проводов сечением от 10 до  $2 \times 120 \text{ мм}^2$  и отходящих от 1,5 до  $25 \text{ мм}^2$ .

Для помещений со взрывоопасными зонами классов В-1а, В-1б, В-2а, В-1г применяют щитки ЩОВ-1А и ЩОВ-2А на напряжение 380/220 В.

## Выбор и проверка элементов системы электроснабжения

### 3.1. ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ И ЖИЛ КАБЕЛЕЙ

Выбранный тип провода или кабеля должен соответствовать его назначению, характеру среды, способу прокладки.

Сечения проводов и жил кабелей цеховой сети на напряжение до 1 кВ выбирают по следующим условиям:

*по нагреву расчетным током*

$$I_p \leq k_{cp} k_{пр} I_{доп}, \quad (3.1)$$

где  $I_p$  — расчетный ток линии, питающей группу приемников (для линии, питающей единичный приемник, вместо  $I_p$  принимают номинальный ток приемника  $I_{ном}$ );  $k_{cp}$  — поправочный коэффициент, учитывающий отличие температуры в цехе от температуры, при которой заданы  $I_{доп}$  в ПУЭ;  $k_{пр}$  — поправочный коэффициент, учитывающий снижение допустимой токовой нагрузки для проводов и кабелей при их многослойной прокладке в коробах;

*термической стойкости*

$$s_{ст} = \frac{I_k^{(3)}}{C} \sqrt{t_{откл} + T_{a,ср}}, \quad (3.2)$$

где  $t_{откл} = t_{с.о} + t_a$  — время отключения КЗ, с;  $t_{с.о}$  — время срабатывания отсечки автоматического выключателя, с; для отходящих линий обычно принимают минимальные уставки по времени;  $t_a$  — время гашения дуги; для автоматических выключателей типа Электрон его принимают равным 0,06 с, для АЗ700 — 0,01 с;  $T_{a,ср}$  — усредненное значение времени затухания свободных токов КЗ; его при-

нимают равным 0,03 с;  $I_k^{(3)}$  — расчетный ток КЗ;  $C$  — постоянная, ее значение для кабелей с алюминиевыми жилами и полиэтиленовой изоляцией —  $62 \text{ A} \cdot \text{с}/\text{мм}^2$ .

На основании проведенных исследований установлено, что кабели с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ можно не проверять на термическую стойкость при КЗ, если алюминиевые жилы имеют сечение  $25 \text{ мм}^2$  и более, а медные  $16 \text{ мм}^2$  и более [1].

Выбранные сечения проводов и кабелей проверяют на потери напряжения по формуле

$$\Delta U = I_p \sqrt{3} (r_0 l \cos \varphi + x_0 l \sin \varphi), \quad (3.3)$$

где  $r_0$ ,  $x_0$  — соответственно удельные активное и индуктивное сопротивления;  $l$  — длина линии;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между током и напряжением сети.

Потери напряжения в сети находят как сумму потерь отдельных участков сети от источника до потребителя. В сетях напряжением до 1 кВ с числом часов использования максимума нагрузки, не превышающим 5000 ч, сечения проводов и кабелей по экономической плотности не выбирают, так как в этом случае они превышают в 2 — 3 раза сечения, выбранные по нагреву расчетным током.

По экономической плотности тока не выбирают также осветительные сети, сборные шины, сети временных сооружений [2].

### 3.2. ВЫБОР КОМПЛЕКТНЫХ ШИНОПРОВОДОВ

Комплектные шинопроводы предназначены для помещений с нормальными условиями среды. Они поставляются в виде отдельных сборных секций, которые представляют собой три или четыре шины, заключенные в оболочку и скрепленные самой оболочкой или изоляторами — клещами. Применение комплектных шинопроводов значительно облегчает монтаж цеховой сети.

**Главные магистрали.** Особенность выбора главных магистралей, обычно выполняемых шинопроводами типа ШМА для общепромышленных нагрузок, заключается в том, что номинальный ток шинопровода не должен превышать максимальный ток, протекающий через трансформатор, т.е.

$$I_{трmax} \geq I_{номШМА} \quad (3.4)$$

При выборе ШМА для питания сварочных нагрузок учитывают допустимые кратковременные перегрузки ШМА. Такие данные для шинопроводов типа ШМА-68-Н-1600 приведены ниже:

Допустимая кратность нагрузки ШМА-68-1600 . . . . .	3	2,5	2
Частота пиков в час . . . . .	10	60	430

С учетом допустимых перегрузок ШМА-68-Н-1600, а также во избежание больших потерь напряжения в сетях, при питании нагрузок от трансформаторов с  $u_k = 5,5\%$  выбор номинального тока шинопровода следует осуществлять по условию

$$I_{\text{номШМА}} \leq \frac{I_{\text{пик}}}{1,5 \div 2}, \quad (3.5)$$

где  $I_{\text{пик}}$  — значение пикового тока.

Пиковый ток определяют следующим образом:  
для однофазных сварочных машин

$$I_{\text{пик}} = \frac{S_{\text{п}} k_3}{U_{\text{ном}}}; \quad (3.6)$$

для двухфазных машин, включенных по схеме открытого треугольника для общей фазы

$$I_{\text{пик}} = \frac{S_{\text{п}} k_3}{2U_{\text{ном}}} \sqrt{3};$$

для остальных фаз

$$I_{\text{пик}} = \frac{S_{\text{п}} k_3}{2U_{\text{ном}}}; \quad (3.7)$$

для трехфазных машин

$$I_{\text{пик}} = \frac{S_{\text{п}} k_3}{U_{\text{ном}}}, \quad (3.8)$$

где  $S_{\text{п}}$  — паспортная (установленная) мощность машин;  $k_3$  — коэффициент загрузки;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение сети.

Потери напряжения в магистральном шинопроводе определяют по формуле, %

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \Sigma I_p l \cdot 100}{U_{\text{ном}}} (r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi), \quad (3.9)$$

где  $\Sigma I_p l$  — сумма моментов токовых нагрузок шинопровода, А · км;  $r_0, x_0$  — соответственно удельные активное и индуктивное сопротивления шинопровода, Ом/км.

Шинопроводы проверяются на электродинамическую стойкость

$$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}, \quad (3.10)$$

где  $i_{\text{уд}}$  — расчетный ударный ток КЗ в начале шинопровода;  $i_{\text{дин}}$  — допустимый ударный ток КЗ (ток динамической стойкости) для данного типа шинопровода.

Распределительные шинопроводы выбирают по расчетному току из условия

$$I_p \leq I_{\text{ном}}, \quad (3.11)$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток шинопровода.

Потери напряжения в распределительном шинопроводе с равномерной нагрузкой и расположением вводной секции в начале шинопровода определяют по (3.3); если вводная секция расположена в середине шинопровода, то используют формулу

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,5 I_p l \cdot 100}{U_{\text{ном}}} (r_0 l \cos \varphi + x_0 l \sin \varphi). \quad (3.12)$$

Проверку на динамическую стойкость выполняют по условию (3.10).

### 3.3. ВЫБОР РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШКАФОВ И ПУНКТОВ

Для приема и распределения электроэнергии по группам потребителей трехфазного тока промышленной частоты напряжением 380 В применяют силовые распределительные пункты и шкафы. В зависимости от типа пункта или шкафа на вводе может располагать-

ся рубильник или автоматический выключатель, на отходящих линиях — предохранители или автоматические выключатели.

Выбор силовых шкафов и пунктов выполняют по степени защиты в зависимости от характера среды в цехе, от его комплектации — предохранителями или автоматическими выключателями.

Номинальный ток силового пункта  $I_{\text{ном.с.п}}$  должен быть больше расчетного тока  $I_p$  группы приемников

$$I_{\text{ном.с.п}} \geq I_p \quad (3.13)$$

Число присоединений к силовому пункту и их токи не должны превышать числа отходящих от силового пункта линий и их допустимые токи

$$N_{\text{прис}} \leq N_{\text{лин}} \quad (3.14)$$

$$I_{p.\text{прис}} \leq I_{\text{доп}} \quad (3.15)$$

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### Расчет токов короткого замыкания

#### 4.1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ

В электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ расчет токов КЗ выполняют с целью проверки коммутационной аппаратуры и шинопроводов на динамическую стойкость, проверки чувствительности и селективности действия защит.

При напряжении до 1 кВ даже небольшое сопротивление оказывает существенное влияние на ток КЗ. Поэтому в расчетах учитывают все активные и индуктивные сопротивления короткозамкнутой цепи, включая активные сопротивления различных контактов и контактных соединений, а также сопротивление электрической дуги в месте КЗ.

Если расчет токов КЗ выполняют в сети напряжением до 1 кВ, питающейся через понижающий трансформатор от энергосистемы, и вблизи места КЗ имеются синхронные и асинхронные двигатели, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ определяют с учетом подпитки от электродвигателей путем суммирования токов от энергосистемы и электродвигателей.

Допускается не учитывать влияние двигателей, если их суммарный номинальный ток не превышает 1 % начального значения периодической составляющей тока в месте КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей [3].

Расчет токов КЗ можно выполнять в именованных единицах. Параметры элементов исходной расчетной схемы приводят к ступени напряжения сети, на которой рассматривается точка КЗ. Активные и индуктивные сопротивления элементов схемы замещения целесообразно выражать в мегаомах (МОм).

При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих питание непосредственно от сети энергосистемы, допускается считать, что

понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения.

При расчете токов КЗ в электроустановках с автономными источниками электроэнергии учитывают параметры всех элементов системы, включая автономные источники (синхронные генераторы), распределительную сеть и потребители.

#### 4.2. РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Проверку параметров электрооборудования обычно выполняют для режима трехфазного КЗ. Начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ при питании электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор и без учета подпитки от электродвигателей определяют по формуле:

$$I_{п0}^{(3)} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{ср.ном}$  — среднее номинальное напряжение сети, в которой рассматривается КЗ, В;  $r_{1\Sigma}$ ,  $x_{1\Sigma}$  — соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм.

Сопротивления  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  в общем случае равны:

$$r_{1\Sigma} = r_T + r_p + r_{TA} + r_{к.в} + r_{ш} + r_k + r_{1кб} + r_{ВЛ} + r_d;$$

$$x_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_p + x_{TA} + x_{к.в} + x_{ш} + x_{1кб} + x_{ВЛ},$$

где  $r_T$ ,  $x_T$  — активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности силового трансформатора;  $r_{TA}$ ,  $x_{TA}$  — активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока;  $x_c$  — эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения;  $r_p$ ,  $x_p$  — активное и индуктивное сопротивления реактора;  $r_{к.в}$ ,  $x_{к.в}$  — активное и индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей;  $r_{ш}$ ,  $x_{ш}$  — активное и индуктивное сопротивления шинопроводов;  $r_k$  — суммарное активное сопротивление различных контактов;  $r_{1кб}$ ,  $r_{ВЛ}$ ,  $x_{1кб}$ ,  $x_{ВЛ}$  — активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности кабельных и воздушных линий;  $r_d$  — активное сопротивление дуги в месте КЗ.

Индуктивное сопротивление системы определяют по формуле:

$$x_c = \frac{U_{срНН}^2}{\sqrt{3} I_{кВН} U_{срВН}} = \frac{U_{срНН}^2}{S_k} \cdot 10^{-3}, \quad (4.2)$$

где  $U_{срНН}$  — среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке НН трансформатора, В;  $U_{срВН}$  — среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка ВН трансформатора, В;  $I_{кВН}$  — действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, кА;  $S_k$  — условная мощность КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, МВ · А.

При отсутствии данных  $I_{кВН}$  или  $S_k$  индуктивное сопротивление системы определяют по формуле:

$$x_c = \frac{U_{срНН}^2}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{срВН}}, \quad (4.3)$$

где  $I_{откл.ном}$  — номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне ВН понижающего трансформатора.

Активное  $r_T$  и индуктивное  $x_T$  сопротивления прямой последовательности понижающих трансформаторов, приведенные к ступени НН сети, мОм, рассчитывают по формулам:

$$r_T = \frac{\Delta P_k U_{ННном}^2}{S_{T,ном}^2} \cdot 10^6; \quad (4.4)$$

$$x_T = \sqrt{\left(\frac{u_k}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_{T,ном}}\right)^2} \cdot \frac{U_{ННном}^2}{S_{T,ном}} \cdot 10^6, \quad (4.5)$$

где  $S_{T,ном}$  — номинальная мощность трансформатора, кВ · А;  $\Delta P_k$  — потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;  $U_{ННном}$  — номинальное напряжение обмотки НН трансформатора, кВ;  $u_k$  — напряжение КЗ трансформатора, %.



Если в сети установлены токоограничивающие реакторы, то активное сопротивление реактора рассчитывают по формуле

$$r_p = \frac{\Delta P_{p,ном}}{I_{p,ном}^2} \cdot 10^6, \quad (4.6)$$

где  $\Delta P_{p,ном}$  — потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт;  $I_{p,ном}$  — номинальный ток реактора, А.

Индуктивное сопротивление реактора, мОм, рассчитывают по формуле

$$x_p = \omega(L - M) \cdot 10^3, \quad (4.7)$$

где  $\omega$  — угловая частота напряжения сети, рад/с;  $L$  — индуктивность катушки трехфазного реактора, Гн,  $M$  — взаимная индуктивность между фазами реактора, Гн.

Активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности шинпроводов, кабелей и воздушных линий определяют через значения удельных сопротивлений. Например, для шинпроводов:

$$r_{ш} = r_{ш0}l, \quad (4.8)$$

$$x_{ш} = x_{ш0}l, \quad (4.9)$$

где  $r_{ш0}$ ,  $x_{ш0}$  — соответственно удельные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности, мОм/м;  $l$  — длина шинпровода, м.

Для воздушных линий 0,4 кВ с проводами из цветных металлов значение удельного индуктивного сопротивления приблизительно принимают равным 0,3 мОм/м. Активные сопротивления катушек и контактов автоматических выключателей не зависят от типа выключателя, а определяются по значению номинального тока.

Значения активных сопротивлений разъемных контактов, активных переходных сопротивлений неподвижных контактных соединений кабелей и шинпроводов приведены в гл. 6, причем они относятся к наиболее характерным местам соединения: шинпровод — шинпровод, разъемное соединение; шинпровод — автоматический выключатель, кабель — автоматический выключатель. Значение переходного сопротивления кабеля с шинпроводом можно

определить как среднее арифметическое переходных сопротивлений кабелей — кабель и шинпровод — шинпровод.

При расчете тока КЗ учитывают ограничивающее действие активного сопротивления электрической дуги  $r_d$ . Сопротивление дуги определяется отношением падения напряжения на дуге  $U_d$  и током КЗ  $I_{п0}$  в месте повреждения, рассчитанным без учета дуги:

$$r_d = U_d / I_{п0}; \quad U_d = E_d l_d,$$

где  $E_d$  — напряженность в створе дуги, В/мм;  $l_d$  — длина дуги, мм.

При  $I_{п0} > 1000$  А  $E_d = 1,6$  В/мм.

Длину дуги определяют в зависимости от расстояния  $a$  между фазами проводников в месте КЗ:

$$l = \begin{cases} 4a & \text{при } a < 5 \text{ мм;} \\ 20 \ln \frac{a}{2} e^{-0,15 \frac{r_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}} & \text{при } 5 \text{ мм} \leq a \leq 50 \text{ мм,} \end{cases}$$

где  $r_{\Sigma}$ ,  $x_{\Sigma}$  — полные активное и индуктивное сопротивления до точки КЗ.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учетом подпитки от электродвигателей определяют как сумму токов:

$$I_{п0\Sigma} = I_{п0} + I_{п0д}, \quad (4.10)$$

где  $I_{п0}$  — начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного КЗ без учета подпитки;  $I_{п0д}$  — начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от двигателей.

Периодическую составляющую от синхронных двигателей  $I_{п0СД}$ , кА, определяют по формуле:

$$I_{п0СД} = \frac{E_{\text{фСД}}''}{\sqrt{x_d'' + x_{l\Sigma})^2 + (r_{\text{СД}} + r_{l\Sigma})^2}}, \quad (4.11)$$

где  $E_{\text{фСД}}''$  — фазное значение сверхпереходной ЭДС синхронного двигателя, В;  $x_d''$  и  $r_{\text{СД}}$  — соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, принимаемые в

приближенных расчетах как  $x_{d*}'' = 0,15 \text{ мОм}$ ;  $r_{сд*} = 0,15x_{d*}''$ ;  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  — суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивление прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и точкой КЗ, мОм.

Для определения  $x_{d*}''$  и  $r_{сд*}$  необходимо знать полное сопротивление синхронного двигателя, которое определяют по номинальным параметрам двигателя

$$Z_{сдном} = \frac{U_{сдном}^2 \cos \varphi_{ном}}{P_{ном}},$$

где  $U_{сдном}$  — номинальное напряжение синхронного двигателя;  $\cos \varphi_{ном}$  — номинальный коэффициент мощности;  $P_{ном}$  — номинальная активная мощность двигателя.

Значение сверхпереходной ЭДС  $E_{фсд}''$ , В, определяют по формуле

$$E_{фсд}'' = \sqrt{(U_{ф|q} \pm I_{|q} x_{d*}'' \sin \varphi_{|q})^2 + (I_{|q} x_{d*}'' \cos \varphi_{|q})^2}, \quad (4.12)$$

где  $U_{ф|q}$  — фазное напряжение на выводах электродвигателя в момент, предшествующий КЗ, В;  $I_{|q}$  — ток статора в момент, предшествующий КЗ, А (в режиме перевозбуждения принимают со знаком +, в режиме недо возбуждения со знаком -);  $\varphi_{|q}$  — угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, град;  $x_{d*}''$  — сверхпереходное сопротивление по продольной оси синхронного электродвигателя, Ом.

Периодическую составляющую от асинхронных двигателей  $I_{п0ад}$ , кА, определяют по формуле:

$$I_{п0ад} = \frac{E_{фад}''}{\sqrt{(x_{ад}'' + x_{1\Sigma})^2 + (r_{ад} + r_{1\Sigma})^2}}, \quad (4.13)$$

где  $x_{ад}''$  и  $r_{ад}$  — соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя;  $r_{1\Sigma}$  и  $x_{1\Sigma}$  — имеют то же значение, что и в формуле (4.11).

Полное сопротивление асинхронного двигателя в момент КЗ, мОм, при отсутствии каталожных данных определяют по формуле:

$$Z_{ад} = \frac{U_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} k_{п} I_{адном}},$$

где  $U_{ном}$  — номинальное напряжение двигателя, В;  $I_{адном}$  — номинальный ток двигателя, А;  $k_{п}$  — кратность пускового тока;  $E_{фад}''$  — сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя, которую можно определить по формуле:

$$E_{фад}'' = \sqrt{(U_{ф|q} \cos \varphi_{|q} - I_{|q} r_{ад})^2 + (U_{ф|q} \sin \varphi_{|q} - I_{|q} x_{ад}'')^2},$$

где  $U_{ф|q}$ ,  $I_{|q}$ ,  $U_{ф|q}$ ,  $x_{ад}''$  — имеют те же значения, что и в формуле (4.12), но применительно к асинхронному двигателю.

### 4.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КЗ

Для схемы, приведенной на рис. 4.1, определить значение тока КЗ в точке К1.

**Исходные данные:**

*Система С:*  $U_{срВН} = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $I_{откл.ном} = 11 \text{ кА}$ .

*Силовой трансформатор Т1:* ТМЗ-1600/10/0,4;  $S_{т.ном} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{ВН} = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $U_{НН} = 0,4 \text{ кВ}$ ;  $\Delta P_{к} = 16,5 \text{ кВт}$ ;  $u_{к} = 5,5 \%$ .

*Шинопровод:* ШМА-684-2500;  $I_{ном} = 2500 \text{ А}$ ;  $r_0 = 0,02 \text{ мОм/м}$ ;  $x_0 = 0,02 \text{ мОм/м}$ ;  $l_1 = 10 \text{ м}$ ;  $l_{1-2} = 10 \text{ м}$ ;  $l_{2-3} = 10 \text{ м}$ ;  $l_{3-4} = 5 \text{ м}$ .

*Синхронный двигатель:* СД-12-24-12 А;  $P_{ном} = 125 \text{ кВт}$ ;  $U_{ном} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{сдном} = 234 \text{ А}$ ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,811$ .

*Асинхронные двигатели:* АОЗ-315М-6УЗ;  $P_{ном} = 132 \text{ кВт}$ ;  $U_{ном} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{адном} = 238,61 \text{ А}$ ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,9$ ;  $\eta_{ном} = 93,5 \%$ ;  $k_{п} = 7$ .

*Кабельные линии W1, W2, W3:* ААШв  $4 \times 185$ ;  $r_0 = 0,208 \text{ мОм/м}$ ;  $x_0 = 0,055 \text{ мОм/м}$ ;  $l_1 = 50 \text{ м}$ ;  $l_2 = 30 \text{ м}$ ;  $l_3 = 40 \text{ м}$ .

**Решение.** Рассчитаем параметры схемы замещения.

1. Сопротивление питающей системы

$$x_c = \frac{U_{срНН}^2}{\sqrt{3} I_{откл.ном} U_{срВН}} = \frac{400^2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 10,5 \cdot 10^3} = 0,8 \text{ мОм}.$$

2. Сопротивления понижающего трансформатора Т1

$$r_1 = \frac{\Delta P_{к} U_{ННном}^2}{S_{т.ном}^2} \cdot 10^6 = \frac{16,5 \cdot 0,4^2}{1600^2} \cdot 10^6 = 1,03 \text{ мОм};$$

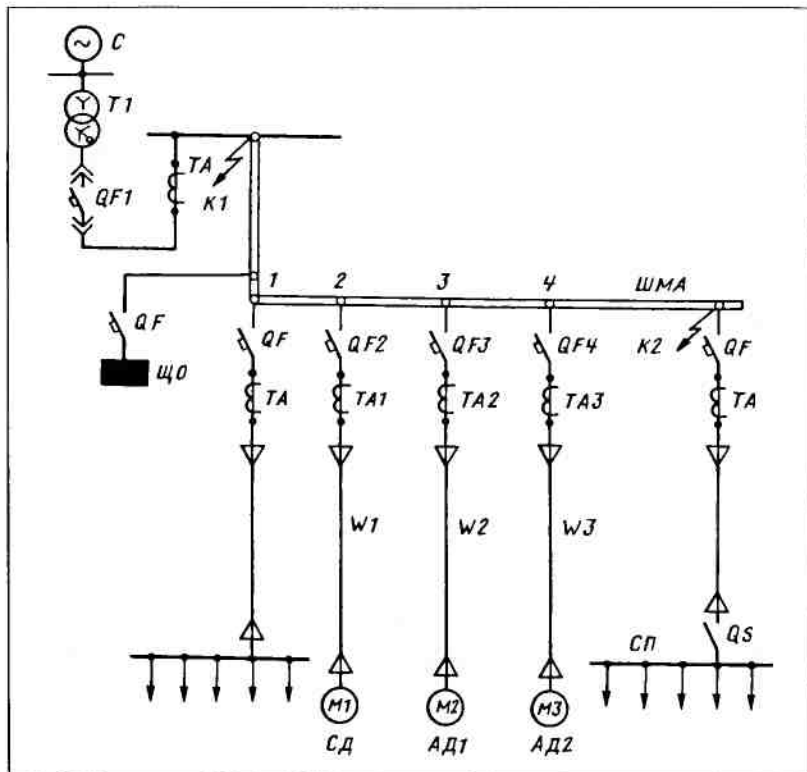


Рис. 4.1. Исходная схема для расчета токов КЗ

$$x_T = \sqrt{\left(\frac{u_k}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_{T, \text{НОМ}}}\right)^2} \cdot \frac{U_{\text{ШНОМ}}^2}{S_{T, \text{НОМ}}} \cdot 10^6 =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{5,5}{100}\right)^2 - \left(\frac{16,5}{1600}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1600} \cdot 10^6 = 5,4 \text{ мОм.}$$

3. Сопротивления магистрального шинпровода на отрезках:

- 0 – 1:  $r_{\text{Ш}} = r_0 l = 0,02 \cdot 10 = 0,2 \text{ мОм};$   
 1 – 2:  $x_{\text{Ш}} = x_0 l_{1-2} = 0,02 \cdot 10 = 0,2 \text{ мОм};$   
 2 – 3:  $r_{\text{Ш}} = 0,2 \text{ мОм}; x_{\text{Ш}} = 0,2 \text{ мОм};$   
 3 – 4:  $r_{\text{Ш}} = 0,1 \text{ мОм}; x_{\text{Ш}} = 0,1 \text{ мОм}.$

4. Сопротивления кабельных линий:

- $r_{\text{Ш1}} = r_0 l = 0,208 \cdot 50 = 10,4 \text{ мОм};$   
 $x_{\text{Ш1}} = x_0 l = 0,055 \cdot 50 = 2,75 \text{ мОм};$   
 $r_{\text{Ш2}} = 6,24 \text{ мОм}; x_{\text{Ш2}} = 1,65 \text{ мОм};$   
 $r_{\text{Ш3}} = 8,32 \text{ мОм}; x_{\text{Ш3}} = 2,2 \text{ мОм}.$

5. Сопротивления измерительных трансформаторов тока принимаем из гл. 6:

- $r_{\text{ТА1}} = r_{\text{ТА2}} = r_{\text{ТА3}} = 0,42 \text{ мОм};$   
 $x_{\text{ТА1}} = x_{\text{ТА2}} = x_{\text{ТА3}} = 0,67 \text{ мОм}.$

6. Сопротивления болтовых контактов принимаем из гл. 6: шинпровод ШМА – автоматический выключатель QF2; QF3; QF4:

- $r_{\text{к2}} = r_{\text{к3}} = r_{\text{к4}} = 0,0024 \text{ мОм};$   
 автоматический выключатель – кабель QF2 – W<sub>1</sub>, QF3 – W<sub>2</sub>, QF4 – W<sub>3</sub>;

- $r_{\text{к5}} = r_{\text{к6}} = r_{\text{к7}} = 0,0165 \text{ мОм}.$

Переходные сопротивления при соединении кабеля с шинпроводом найдем как среднее арифметическое переходных сопротивлений кабель – кабель и шинпровод – шинпровод

- $r'_{\text{к2}} = (r_{\text{к2}} + r_{\text{к5}})/2 = (0,0024 + 0,0165)/2 = 0,00945 \text{ мОм};$

- $r_{\text{к3}} = r_{\text{к4}} = r_{\text{к2}}.$

7. Сопротивления автоматических выключателей принимаем из гл. 6:

- QF1:  $I_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ А}; r_{\text{к.В1}} = 0,13 \text{ мОм}; x_{\text{к.В1}} = 0,07 \text{ мОм};$

- QF2, QF3, QF4:  $I_{\text{НОМ}} = 400 \text{ А}; r_{\text{к.В2}} = r_{\text{к.В3}} = r_{\text{к.В4}} = 0,65 \text{ мОм};$

- $x_{\text{к.В2}} = x_{\text{к.В3}} = x_{\text{к.В4}} = 0,17 \text{ мОм}.$

8. Рассчитаем параметры синхронного двигателя:

$$Z_{\text{СДНОМ}} = \frac{U_{\text{СДНОМ}}^2 \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{0,38^2 \cdot 0,811}{125} \cdot 10^6 = 936,9 \text{ мОм};$$

$$x_d'' = 0,15 Z_{\text{СДНОМ}} = 0,15 \cdot 936,9 = 140,5 \text{ мОм};$$

$$r_{\text{СД}} = 0,15 x_{d \text{НОМ}}'' = 0,15 \cdot 140,5 = 21,08 \text{ мОм};$$

$$E_{\text{фСД}}'' = \sqrt{(U_{\text{ф}} - I_{\text{НОМ}} x_{d \text{НОМ}}'' \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (I_{\text{НОМ}} x_{d \text{НОМ}}'' \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 - 234 \cdot 140,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,585)^2 + (234 \cdot 140,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,81)^2} =$$

$$= 202,567 \text{ В}.$$

9. Рассчитаем параметры асинхронного двигателя

$$Z_{\text{АД}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} k_{\text{п}} I_{\text{АДном}}} = \frac{380 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 7 \cdot 238,61} = 131,5 \text{ мОм};$$

$$r_{\text{АД}} = \frac{0,63 P_{\text{ном}} \cdot 10^6}{(k_{\text{п}} I_{\text{АДном}})^2} = \frac{0,63 \cdot 132 \cdot 10^6}{(7 \cdot 238,61)^2} = 29,8 \text{ мОм};$$

$$x''_{\text{АД}} = \sqrt{Z_{\text{АД}}^2 - r_{\text{АД}}^2} = \sqrt{131,5^2 - 29,8^2} = 128,08 \text{ мОм}.$$

$$E''_{\text{фАД}} = \sqrt{(U_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ном}} - I_{\text{АДном}} r_{\text{АД}})^2 + (U_{\text{ф}} \sin \varphi_{\text{ном}} - I_{\text{АДном}} x''_{\text{АД}})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,9 - 238 \cdot 29,8 \cdot 10^{-3})^2 + (220 \cdot 0,44 - 238 \cdot 128,08 \cdot 10^{-3})^2} =$$

$$= 193,4 \text{ В}.$$

Составим схему замещения для расчета токов трехфазного КЗ (рис. 4.2).

При расчете тока КЗ в точке *K1* расстояние между фазами проводников в КТП мощностью 1600 кВ · А составляет 120 мм, следовательно, длина дуги  $l = 120 \text{ мм}$ . Напряженность в стволе дуги  $U_{\text{д}} = E_{\text{д}} l = 1,6 \cdot 120 = 192 \text{ В}$ .

Сопротивление дуги найдем после определения тока КЗ  $I_{\text{п0}}$  в месте повреждения без учета дуги.

Выполним расчет тока трехфазного КЗ в точке *K1* без учета подпитки двигателей.

Суммарные сопротивления до точки *K3* составят:

$$r_{\Sigma 1} = r_{\text{Т1}} + r_{\text{к.в1}} + r_{\text{к1}} = 1,03 + 0,13 + 0,0024 = 1,163 \text{ мОм};$$

$$x_{\Sigma 1} = x_{\text{с}} + x_{\text{Т1}} + x_{\text{к.в1}} = 0,8 + 5,4 + 0,07 = 6,27 \text{ мОм}.$$

Определим ток КЗ без учета сопротивления дуги

$$I_{\text{п0К1max}} = \frac{U_{\text{срНН}}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{\Sigma 1}^2 + r_{\Sigma 1}^2}} = \frac{400}{1,73 \sqrt{6,27^2 + 1,163^2}} =$$

$$= \frac{400}{1,73 \cdot 6,38} = 36,24 \text{ кА}.$$

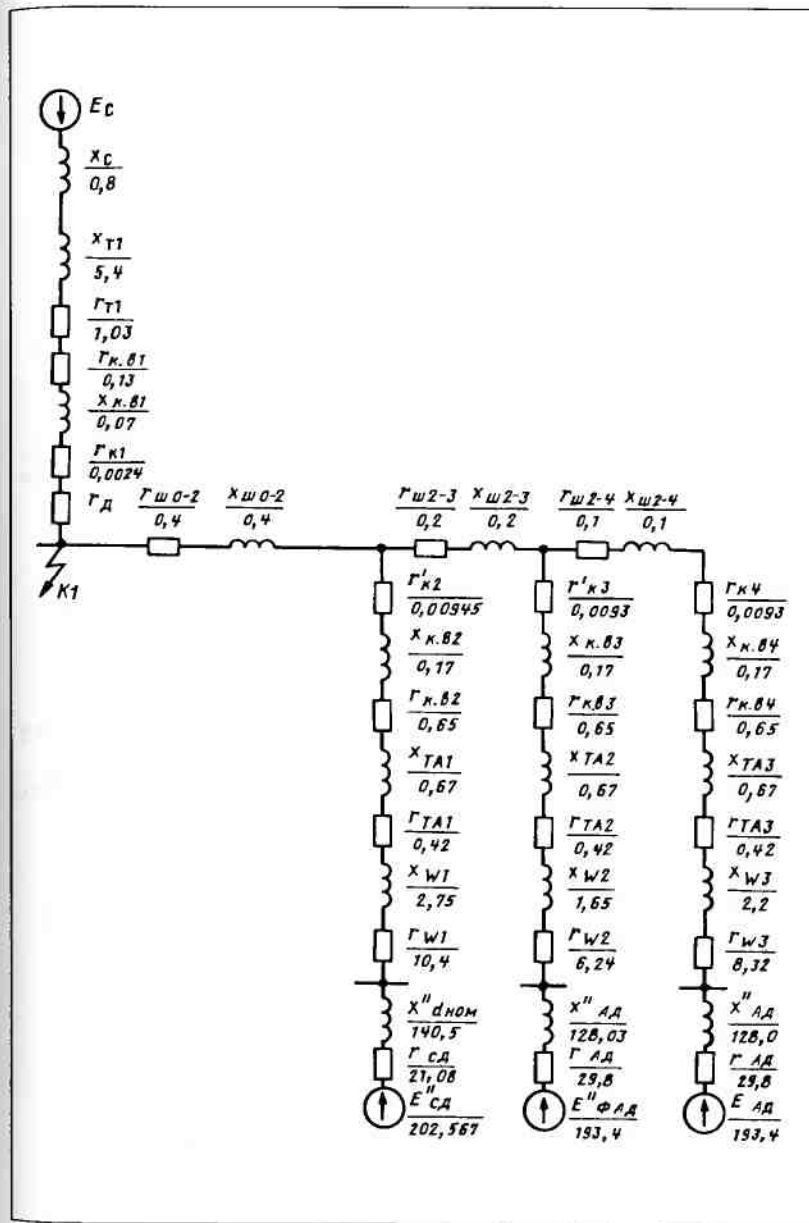


Рис. 4.2. Схема замещения для расчета токов КЗ

Сопротивление дуги

$$r_d = U_d / I_{п0KImax} = 192 / 36,24 = 5,29 \text{ мОм.}$$

Ток КЗ с учетом сопротивления дуги:

$$I_{п0KImin} = \frac{U_{срНН}}{\sqrt{3} \sqrt{x_{\Sigma 1}^2 + (r_{\Sigma 1} + r_d)^2}} =$$

$$= \frac{400}{1,73 \sqrt{6,27^2 + 6,45^2}} = 25,69 \text{ кА.}$$

Для оценки необходимости учета подпитки от двигателей найдем суммарный номинальный ток двигателей

$$I_{\Sigma д} = 2I_{АДном} + I_{СДном} = 2 \cdot 238,61 + 234 = 711,2 \text{ А;}$$

$$0,01I_{п0KImax} = 0,01 \cdot 36,24 \cdot 10^3 = 362,4 \text{ А;}$$

Ток  $I_{\Sigma д}$  больше, чем  $0,01I_{п0KImax}$ , поэтому подпитку от двигателей необходимо учитывать.

Рассчитаем составляющие тока КЗ в точке К1 от асинхронных двигателей:

$$r_{1\Sigma АД1} = r_{АД} + r_{W2} + r_{ТА2} + r_{к.в3} + r'_{к3} + r_{W2-3} + r_{ш0-2} =$$

$$= 29,8 + 6,24 + 0,42 + 0,65 + 0,0093 + 0,2 = 37,32 \text{ мОм;}$$

$$x_{1\Sigma АД1} = x'_{АД} + x_{W2} + x_{ТА2} + x_{к.в3} + x_{W2-3} + x_{ш0-2} =$$

$$= 128,8 + 1,65 + 0,67 + 0,17 + 0,2 + 0,4 = 131,2 \text{ мОм;}$$

$$r_{1\Sigma АД2} = r_{1\Sigma АД1} + r_{ш3-4} = 37,32 + 0,1 = 37,42 \text{ мОм;}$$

$$x_{1\Sigma АД2} = x_{1\Sigma АД1} + x_{ш3-4} = 131,2 + 0,1 = 131,3 \text{ мОм.}$$

Токи подпитки от АД1 и АД2 составят

$$I_{п0АД1} = \frac{E''_{\phi АД}}{\sqrt{(x'_{АД} + x_{1\Sigma})^2 + (r_{АД} + r_{1\Sigma})^2}} =$$

$$= \frac{193,4}{\sqrt{131,2^2 + 37,32^2}} = 1,42 \text{ кА;}$$

$$I_{п0АД2} = \frac{193,4}{\sqrt{37,42^2 + 131,3^2}} \approx 1,42 \text{ кА.}$$

Рассчитаем составляющую тока КЗ в точке К1 от синхронного двигателя:

$$x_{1\Sigma СД} = x_{ш0-2} + x_{к.в2} + x_{ТА1} + x_{W1} + x''_d =$$

$$= 0,4 + 0,17 + 0,67 + 2,75 + 140,5 = 144,49 \text{ мОм;}$$

$$r_{1\Sigma СД} = r_{ш0-2} + r'_{к2} + r_{к.в2} + r_{ТА1} + r_{W1} + r_{СД} =$$

$$= 0,4 + 0,00945 + 0,65 + 0,42 + 10,4 + 21,08 = 32,96 \text{ мОм.}$$

Ток подпитки от синхронного двигателя:

$$I_{п0СД} = \frac{E''_{\phi СД}}{\sqrt{x_{1\Sigma СД}^2 + r_{1\Sigma СД}^2}} =$$

$$= \frac{202,57}{\sqrt{144,5^2 + 33^2}} = 1,37 \text{ кА.}$$

Определим значение ударного тока в точке К1:

$$i_{уд\Sigma} = i_{уд} + i_{уд1АД1} + i_{уд2АД2} + i_{удСД}.$$

В общем виде  $i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} k_{уд}$ , где ударный коэффициент определяют по формуле

$$k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a}, \quad T_a = x_{1\Sigma} / r_{1\Sigma}.$$

Значения  $k_{уд}$  следующие:  
на шинах подстанции без учета подпитки от двигателей

$$\frac{x_{1\Sigma}}{r_{1\Sigma}} = \frac{6,27}{6,25} = 0,97; \quad k_{уд} = 1,2;$$

при учете подпитки

$$\text{от СД} \quad \frac{x_{1\Sigma}}{r_{1\Sigma}} = \frac{144,49}{32,96} = 4,4, \quad k_{уд} = 1,35;$$

$$\text{от АД} \quad \frac{x_{1\Sigma}}{r_{1\Sigma}} = \frac{131,2}{37,2} = 3,52, \quad k_{уд} = 1,25.$$

Ударный ток в точке К1

$$i_{уд\Sigma} = \sqrt{2}(1,2 \cdot 25,69 + 1,35 \cdot 1,37 + 2 \cdot 1,25 \cdot 1,42) = 36,23 \text{ кА.}$$

#### 4.4. РАСЧЕТ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ  $I_{п0}^{(1)}$ , кА, определяют по формуле:

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{U_{срНН} / \sqrt{3}}{Z_{\Sigma}^{(1)} / 3 + Z_n}, \quad (4.14)$$

где  $Z_{\Sigma}^{(1)}$  — полное сопротивление питающей системы, трансформатора, а также переходных контактов току однофазного КЗ;  $Z_n$  — полное сопротивление петли фаза — нуль от трансформатора до точки КЗ.

Сопротивление  $Z_{\Sigma}^{(1)}$  определяем по формуле

$$Z_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{(x_{1Г} + x_{2Г} + x_{0Г} + 2x_c)^2 + (r_{1Г} + r_{2Г} + r_{0Г} + 3r_{пер})^2}, \quad (4.15)$$

где  $x_{1Г}$ ,  $x_{2Г}$  и  $r_{1Г}$ ,  $r_{2Г}$  — индуктивные и активные сопротивления прямой и обратной последовательностей силового трансформатора ( $x_{1Г} = x_{2Г}$ ,  $r_{1Г} = r_{2Г}$ );  $x_{0Г}$ ,  $r_{0Г}$  — индуктивное и активное сопротивления нулевой последовательности силового трансформатора;  $x_c$  —

индуктивное сопротивление системы, приведенное к сети низшего напряжения;  $r_{пер}$  — сопротивление переходных контактов.

#### Пример расчета тока однофазного КЗ.

Для схемы, приведенной на рис.4.1, рассчитать ток однофазного КЗ с целью проверки чувствительности автоматического выключателя QFI. Используем справочные данные гл. 6.

Решение. Наименьшее значение ток однофазного КЗ имеет в случае, если КЗ произойдет в конце шинпровода ШМА.

Ток однофазного КЗ в точке К2 определяем по формуле (4.14) с учетом места КЗ, т.е.

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{U_{срНН} / \sqrt{3}}{Z_{\Sigma}^{(1)} / 3 + Z_{нШМА}}.$$

Сопротивление  $Z_{\Sigma}^{(1)}$  определяем по формуле (4.15):

$$Z_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{(2 \cdot 5,4 + 50 + 2 \cdot 0,8)^2 + (2 \cdot 1,03 + 16,3 + 3 \cdot 1,163)^2} = 66,09 \text{ мОм};$$

$$Z_{нШМА} = Z_{н,уд} / ШМА = 0,082 \cdot 35 = 2,87 \text{ мОм.}$$

Определим сопротивление дуги  $r_d$ .

Значение  $a$  для шинпровода ШМА составляет 10 мм<sup>2</sup>. Длину дуги определяем по формуле

$$l_d = 20,4 \ln \frac{a}{2} e^{-0,15 \frac{r_{\Sigma}}{x_{\Sigma}}},$$

где  $r_{\Sigma}$ ,  $x_{\Sigma}$  — суммарные активные и реактивные сопротивления до точки КЗ:  $r_{\Sigma} = 2,97 \text{ мОм}$ ;  $x_{\Sigma} = 9,53 \text{ мОм}$ ;

$$l_d = 20,4 \ln 5e^{-0,15 \frac{2,97}{9,53}} = 30,54 \text{ мм};$$

$$U_d = E_d l_d = 1,6 \cdot 30,54 = 48,86 \text{ В};$$

$$r_d = 48,86 / 17,98 = 2,72 \text{ мОм.}$$

Определим значение тока однофазного КЗ с учетом токоограничивающего действия сопротивления дуги:

$$Z_{\Sigma 1}^{(1)} = \sqrt{(2x_{1T} + x_{0T} + 2x_c)^2 + (2r_{1T} + r_{0T} + 3r_{пер} + 3r_d)^2} =$$

$$= \sqrt{(2 \cdot 5,4 + 16,2 + 2 \cdot 0,8)^2 + (2 \cdot 1,03 + 3,375 + 3 \cdot 1,163 + 3 \cdot 2,72)^2} =$$

$$= 33,31 \text{ мОм.}$$

$$I_{п01}^{(1)} = \frac{400 / 1,73}{33,31 / 3 + 2,87} = 16,54 \text{ кА.}$$

## ГЛАВА ПЯТАЯ

# Выбор и проверка защитной аппаратуры

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Аппаратом защиты называют аппарат, автоматически отключающий защищаемую электрическую цепь от КЗ или перегрузок, которая, как правило, состоит из электроприемника и электрической сети. Электроприемником может быть один или группа синхронных или асинхронных электродвигателей, трансформаторы, электрические печи, преобразователи, электрическое освещение и т.д. Электрическая сеть может состоять из шин, шинопроводов, кабелей, про-

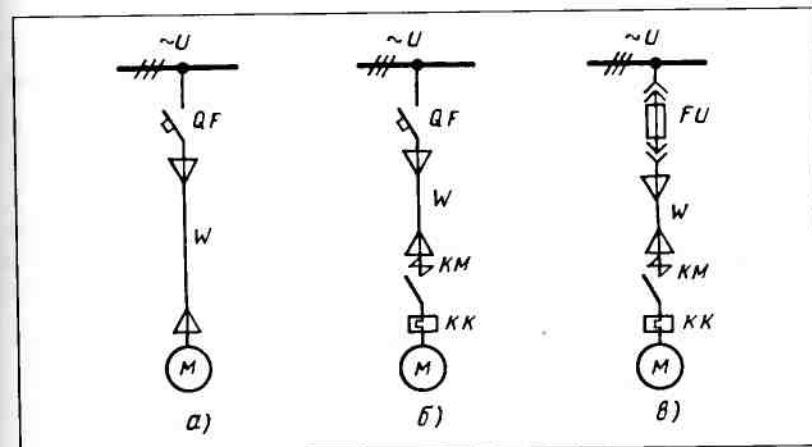


Рис. 5.1. Схемы защит асинхронного двигателя:

*а* — автоматическим выключателем *QF* с комбинированным расцепителем; *б* — автоматическим выключателем *QF* с комбинированным расцепителем и тепловой защитой *КК*; *в* — плавким предохранителем *FU* и тепловой защитой *КК*

водов. Далее, в качестве примера, рассмотрим варианты защиты электрической цепи с электродвигателями, как наиболее широко используемым электроприемником и создающим наибольшие проблемы для выбора защитного аппарата. Согласно [2] АД должен обеспечиваться защитами: от перегрузки, от внутренних КЗ, от понижения напряжения. Для синхронных электродвигателей кроме этого применяют защиту от выпадения из синхронизма.

В зависимости от режима работы электропривода может быть применена одна из схем (рис. 5.1). При малой частоте включений (от трех до шести включений в час, длительный режим работы) можно защитить АД автоматическим выключателем с комбинированным расцепителем (рис. 5.1, а). При большой частоте включений (до 600 включений в час) по технико-экономическим соображениям применяют варианты, представленные на рис. 5.1, б или в.

## 5.2. ЗАЩИТА ПЛАВКИМИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

Плавкие предохранители считают одним из наиболее простых, дешевых и надежных аппаратов защиты максимального тока в сетях НН и ВН (до 110 кВ). В то же время предохранитель является наиболее ослабленным звеном электрической цепи. Чтобы представить разнообразие предохранителей, на рис. 5.2 приведена их классификация по принципу действия, материалу плавкой вставки и конструкциям. Защитные свойства плавких предохранителей не регулируются и определяются типом предохранителя, габаритом патрона,

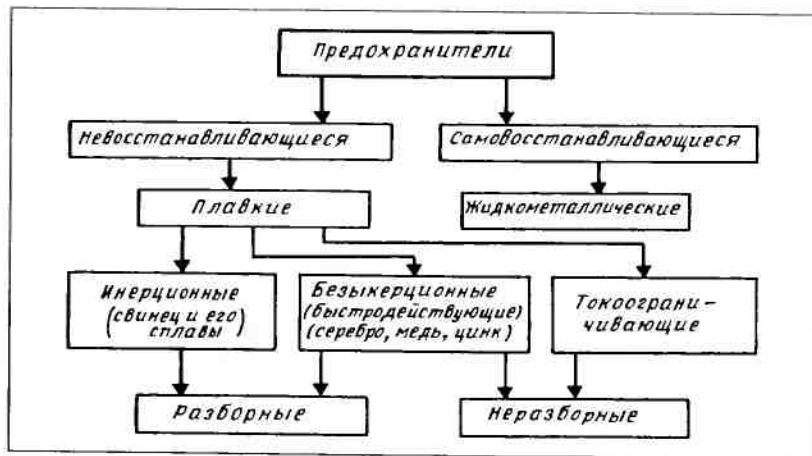


Рис. 5.2. Классификация предохранителей

номинальным током плавкого элемента, а также дополнительными факторами: температурой окружающей среды, способом монтажа, степенью старения плавкого элемента и т.п.

Временем срабатывания плавкого предохранителя считают время плавления плавкого элемента до момента появления электрической дуги. Полное время отключения цепи составляет:

$$t_{\text{откл}} = t_c + t_d, \quad (5.1)$$

где  $t_c$  — время срабатывания предохранителя;  $t_d$  — время гашения дуги, находящееся обычно в пределах от 1 до 10 мс.

Пропускаемый токоограничивающим предохранителем ударный ток КЗ определяется временем срабатывания предохранителя.

Ток срабатывания плавкого предохранителя определяют как ток, приводящий к срабатыванию предохранителя за время, достаточное для достижения установившегося теплового состояния (за время от 1 до 4 ч в зависимости от номинального тока плавкого элемента). Ток, который в этих условиях не приводит к срабатыванию предохранителя, называют током несрабатывания. Среднее геометрическое этих двух токов называют пограничным током предохранителя

$$1,1I_{\text{ном}} \leq I_{\text{погр}} \leq 2,0I_{\text{ном}} \quad (5.2)$$

Условия выбора и проверки плавкого предохранителя:

1) номинальное напряжение предохранителя должно быть равно или больше номинального напряжения электрической сети:

$$U_{\text{ном.п}} \geq U_{\text{ном.с}}; \quad (5.3)$$

2) номинальный ток плавкой вставки выбирают по расчетному току защищаемой цепи и отстраивают от токов кратковременной допустимой перегрузки, пусковых и пиковых токов электроприемников:

$$I_{\text{п.в}} \geq I_p; \quad (5.4)$$

$$I_{\text{п.в}} \geq \frac{I_p}{k_{\text{д.п}}}, \quad (5.5)$$

где  $I_p$  — расчетный ток защищаемой цепи;  $I_p$  — расчетный ток перегрузки, пиковый ток;  $k_{\text{д.п}}$  — коэффициент, учитывающий длитель-



ность перегрузки, переходного процесса;  $k_{д.п} = 2,5$ , если время разгона меньше 10 с;  $k_{д.п} = 1,6 \div 2$ , если время разгона больше 10 с, или при частых пусках двигателя.

При выборе электродвигателя под  $I_{п}$  понимают пусковой ток, т.е.  $I_{п} = k_{п} I_{ном}$ , где  $k_{п}$  принимаем по справочнику.

При выборе защиты трансформатора необходимо учитывать бросок тока намагничивания при его включении, который принимают равным двойному номинальному току трансформатора, т.е.

$$I_{п.в} \geq 2I_{т.ном} \quad (5.6)$$

Номинальный ток патрона предохранителя должен соответствовать выбранной плавкой вставке;

3) выбранные плавкие предохранители проверяют на требуемую чувствительность защиты:

в электрических сетях общего назначения

$$k_{ч} = \frac{I_{кmin}}{I_{п.в}} \geq 3; \quad (5.7)$$

для взрывоопасных помещений

$$k_{ч} = \frac{I_{кmin}}{I_{п.в}} \geq 4, \quad (5.8)$$

где  $k_{ч}$  — коэффициент чувствительности;  $I_{кmin}$  — минимальный ток КЗ в конце защищаемой зоны;

4) проверка на отключающую способность:

$$I_{к}^{(3)} \leq I_{п.откл}, \quad (5.9)$$

где  $I_{к}^{(3)}$  — максимальный ожидаемый ток КЗ в месте установки предохранителя;  $I_{п.откл}$  — предельно отключаемый ток.

На рис. 5.3 и 5.4 показаны защитные характеристики предохранителей. Плавкие предохранители, выбранные по пусковым условиям и обладающие крутопадающей защитной характеристикой, не обеспечивают защиту от перегрузок. Кроме того, перегорание предохранителя в одной фазе приводит к ненормальному режиму работы электродвигателя, пуск которого в этом случае приводит к стогранию обмоток, если он не будет автоматически отключен. В этом случае обязательно требуется установка в качестве дополнительного

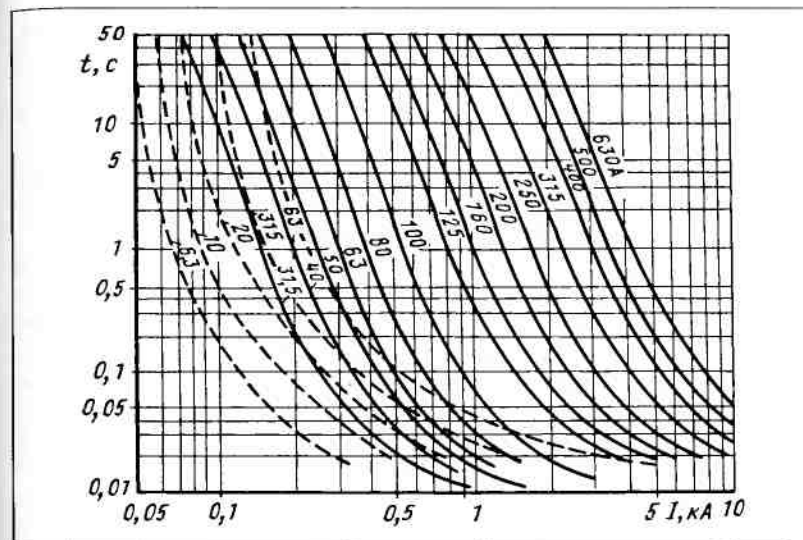


Рис. 5.3. Защитные характеристики предохранителей ПН2 (сплошные линии) и ППН (штриховые линии)

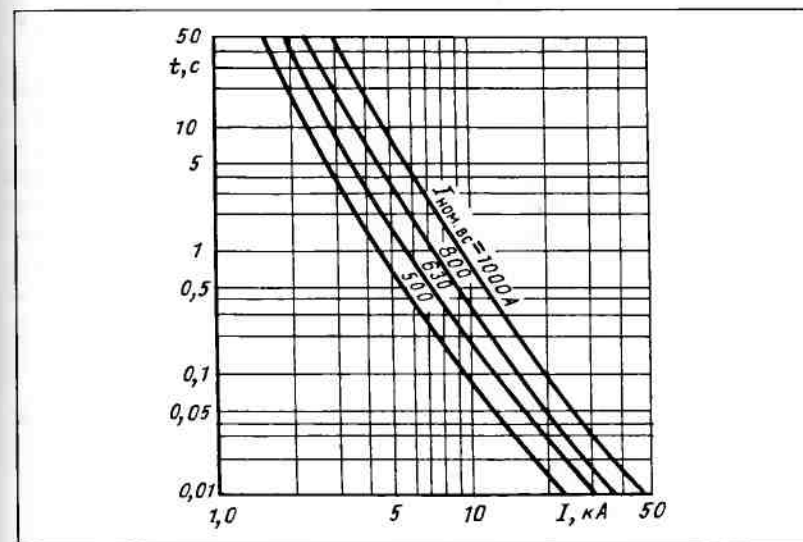


Рис. 5.4. Защитные характеристики предохранителей ПП17 в цепи переменного тока

аппарата магнитного пускателя или контактора (на большие токи) со встроенными электротермическими расцепителями, контакты которых включают в цепь управления катушки пускателя. Магнитный пускатель является одновременно аппаратом защиты минимального напряжения: при напряжении меньше некоторого критического значения (обычно от 0,6 до 0,7  $U_{\text{ном}}$ ) он отключается и в случае использования обычного кнопочного управления при восстановлении напряжения самостоятельно не включается. Если требуется самозапуск электродвигателя, то применяют шунтирование пусковой кнопки контактами реле времени, выдержка времени которого при возврате перекрывает кратковременный перерыв в электропитании.

Номинальный ток защищающего от перегрузки теплового реле магнитного пускателя выбирают только по расчетному току линии

$$I_{\text{т.р.ном}} \geq I_{\text{дл}} \quad (5.10)$$

Плавкие предохранители имеют следующие недостатки: независимая работа предохранителей каждой фазы, одноразовость срабатывания, возможность ошибочных операций с предохранителями, сложность обеспечения защиты электрической цепи во всем диапазоне возможных сверхтоков, невозможность проверки защитных свойств без перегорания предохранителя, старение плавкой вставки и др.

### 5.3. ЗАЩИТА АВТОМАТИЧЕСКИМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

Современный автоматический выключатель (АВ) — сложное многофункциональное электротехническое устройство. Автоматические выключатели НН могут снабжаться следующими встроенными в них расцепителями:

- 1) электромагнитным или электронным расцепителем максимального тока мгновенного или замедленного действия с практически не зависимой от тока скоростью срабатывания;
- 2) электротермическим или электронным инерционным расцепителем максимального тока с зависимой от тока выдержкой времени;
- 3) расцепителем тока утечки;
- 4) расцепителем минимального напряжения;
- 5) расцепителем обратного тока или обратной мощности;
- 6) независимым расцепителем (для дистанционного отключения выключателя).

Первые два типа устанавливают во всех полюсах, остальные расцепители — по одному на выключатель. Токи уставки, а также выдержки времени токовых расцепителей могут быть регулируемы. В одном выключателе можно применять один или несколько типов токовых расцепителей и дополнительно к ним расцепитель минимального напряжения, независимый расцепитель и электромагнит включения.

В качестве примера на рис. 5.5 приведена принципиальная электрическая схема выключателя типа ВА-55-43 на ток 1600 А выдвигного исполнения с дополнительными сборочными единицами и дополнительными свободными контактами.

Как видно из рис. 5.5, автоматические выключатели могут иметь указатели срабатывания расцепителей, вспомогательные контакты для дистанционной сигнализации о состоянии выключателей и автоматический (электромагнитный, электродвигательно-пружинный и т.п.) привод для включения, что делает его универсальным аппаратом для защиты и автоматизации электроустановок НН.

По сравнению с предохранителями АВ имеют существенно меньший разброс отношения пограничного тока к номинальному:

$$\text{электротермический расцепитель } 1,05 I_{\text{ном}} \leq I_{\text{погр}} \leq 1,2 I_{\text{ном}};$$

$$\text{электронный расцепитель } 1,01 I_{\text{ном}} \leq I_{\text{погр}} \leq 1,02 I_{\text{ном}}.$$

По времени срабатывания электромагнитные и аналогичные им электронные расцепители имеют четыре разновидности:

- 1) расцепители, обеспечивающие срабатывание АВ за время, на много меньше 0,01 с, и отключение тока КЗ раньше, чем он достигнет своего ударного значения. Такие автоматические выключатели называют токоограничивающими (см. рис. 5.7);
- 2) расцепители, обеспечивающие отключение тока КЗ при первом прохождении тока через нулевое значение ( $t_c = 0,01$  с);
- 3) нерегулируемые расцепители, время срабатывания которых превышает 0,01 с;
- 4) расцепители с регулируемой выдержкой времени ( $0,1 \div 0,7$  с), позволяющие добиться замедленной работы относительно других АВ той же сети; их называют селективными.

Расцепители тока утечки устройства защитного отключения применяют для быстрого отключения участков сети, в которых из-за нарушения изоляции или прикосновения людей к проводникам возникает ток утечки на землю. При этом ток уставки расцепителя выбирают в пределах от 10 до 30 мА, а время, в зависимости от напряжения сети, в пределах от 10 до 100 мс. Защиту от токов утечки считают в настоящее время наиболее эффективной защитной мерой от поражения людей электрическим током (рис. 5.6).

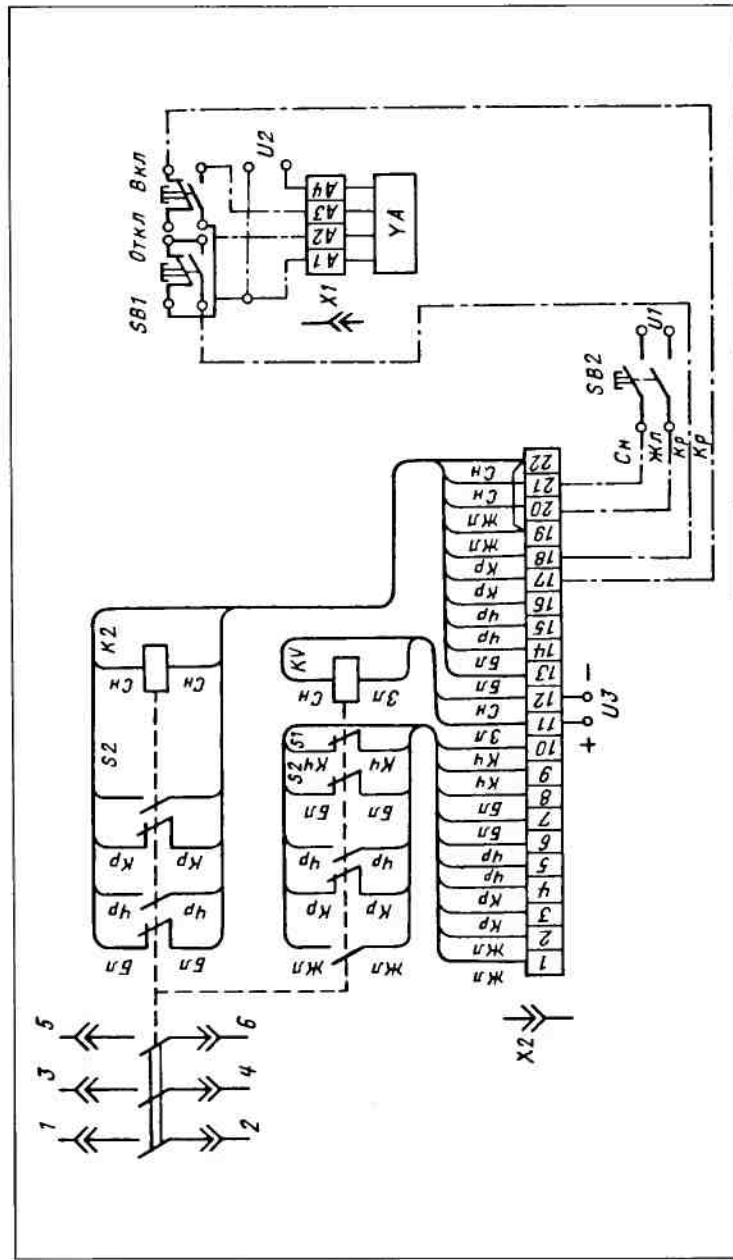


Рис. 5.5. Принципиальная электрическая схема выключателей выдвинутого исполнения с дополнительными сборочными единицами и дополнительными свободными контактами. (Добавочные выключатели SB1 и SB2 устанавливаются потребители. На схеме показан нулевой распределитель напряжения КУ переменного тока)

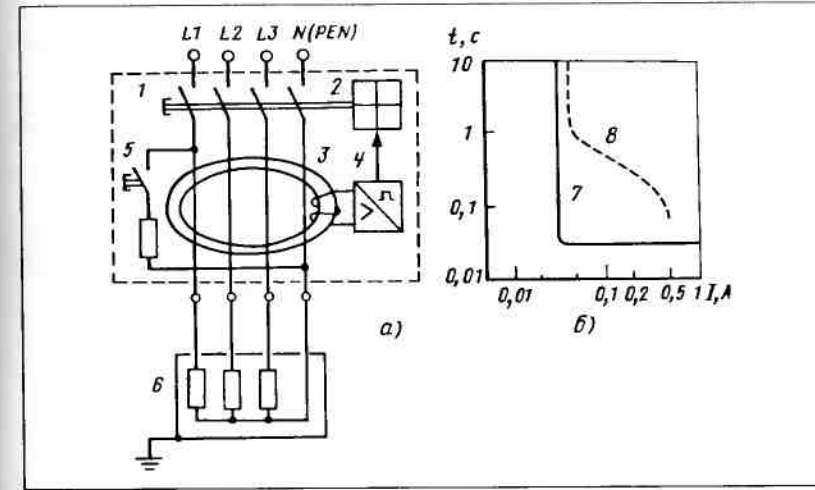


Рис. 5.6. Схема (а) и характеристика срабатывания (б) автоматического выключателя тока утечки:

1 — контакты; 2 — механизмы свободного расцепления; 3 — трансформатор тока утечки; 4 — усилитель — преобразователь; 5 — кнопка проверки исправности выключателя; 6 — электроприемник; 7 — характеристика срабатывания выключателя; 8 — граница опасности возникновения фибрилляции сердца, установленная Международной электротехнической комиссией (учтено, что токи более 0,5 А через тело человека в сетях напряжением 380 В практически не могут возникнуть)

Расцепители минимального напряжения применяют в целях отключения источников питания при прекращении ими питания сети, а также в целях отключения электроприемников, самозапуск которых при автоматическом восстановлении питания нежелателен или недопустим. Напряжение срабатывания расцепителя выбирают в пределах от 0,8 до  $0,9 U_{ном}$ , время срабатывания — в соответствии с требованиями систем автоматического восстановления питания сети.

Независимые расцепители применяют для местного дистанционного и автоматического отключения АВ при срабатывании внешних защитных устройств.

Расцепители обратного тока или обратной мощности применяют для защиты генераторов, работающих на электрическую систему от выпадения из синхронизма (для синхронных генераторов).

Автоматические выключатели свободны от многих недостатков, присущих плавким предохранителям, а номенклатура позволяет широко применять их в промышленных сетях НН. В случае, когда

по техническим показателям возможно применение как АВ, так и плавких предохранителей, выбор защитного аппарата производят по минимальным приведенным затратам, при этом учитывают стоимости остальных элементов РУ и другие затраты, а также надежность.

**Условия выбора и проверки автоматического выключателя**

1. Соответствие номинального напряжения АВ  $U_{\text{ном.в}}$  номинальному напряжению сети  $U_{\text{ном.с}}$ :

$$U_{\text{ном.в}} \geq U_{\text{ном.с}} \quad (5.11)$$

2. Соответствие номинального тока выключателя расчетному току защищаемой цепи:

$$I_{\text{ном.в}} \geq I_{\text{р}} \quad (5.12)$$

3. Токовую отсечку АВ (уставку электромагнитного или аналогичного ему расцепителя) отстраивают от пиковых токов электроприемника по выражению

$$I_{\text{с.о}} \geq 1,05 k_3 k_a k_p I_{\text{пик}} = k_n I_{\text{пик}} \quad (5.13)$$

где  $k_n = 1,05 k_3 k_a k_p$  — коэффициент надежности отстройки; 1,05 — коэффициент, учитывающий, что в нормальном режиме напряжение может быть на 5 % выше номинального напряжения электроприемника;  $k_3$  — коэффициент запаса;  $k_a$  — коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в пиковом токе электроприемника;  $k_p$  — коэффициент, учитывающий возможный разброс тока срабатывания отсечки относительно уставки.

Пиковый ток зависит от вида электроприемника. Так, для защиты электродвигателя этот ток является пусковым:

$$I_{\text{пик}} = k_n I_{\text{д.ном}} \quad (5.14)$$

где  $k_n$  — кратность пускового тока электродвигателя (принимают по справочнику);  $I_{\text{д.ном}}$  — номинальный ток электродвигателя.

Для защиты группы электродвигателей (например, присоединенных к распределительному шкафу)

$$I_{\text{пик}} = (k_n - 1) I_{\text{м.ном}} + I_{\text{р}} \quad (5.15)$$

где  $I_{\text{м.ном}}$  — номинальный ток самого мощного электродвигателя этой группы;  $I_{\text{р}}$  — расчетный ток группы электродвигателей.

Пиковый ток на шинах КТП или шинопроводе определяют по формуле (5.15) или (при отсутствии данных) приближенно через коэффициент, учитывающий пуск или самозапуск по выражению

$$I_{\text{пик}} = k_{\text{сз}} I_{\text{р}} \quad (5.16)$$

где  $k_{\text{сз}}$  принимают в пределах  $1,2 \div 2,4$  в зависимости от соотношения видов электроприемников на шинах КТП или шинопровода.

Для АВ ввода КТП коэффициент самозапуска учитывает бросок пикового тока при действии устройства АВР секционного выключателя

$$I_{\text{пик}} = k_{\text{сз2}} I_{\text{па2}} + k_{\text{пр}} I_{\text{па1}},$$

где  $k_{\text{сз2}}$  — коэффициент самозапуска нагрузки, подключаемой устройством АВР к второй секции КТП;  $I_{\text{па2}}$  — послеаварийный ток второй секции;  $k_{\text{пр}}$  — коэффициент, учитывающий увеличение тока двигателей первой секции при провале напряжения вследствие наброса нагрузки второй секции, принимается равным  $1 \div 1,5$ ;  $I_{\text{па1}}$  — послеаварийный ток первой секции.

Для выбора защиты трансформаторов сварочных агрегатов, преобразователей электрической энергии, печей и т.п. под пиковым током понимают бросок тока намагничивания

$$I_{\text{пик}} = k_{\text{нам}} I_{\text{т.ном}} \quad (5.17)$$

где  $k_{\text{нам}}$  — коэффициент, учитывающий бросок тока намагничивания трансформатора (в зависимости от типа и мощности силовых трансформаторов  $k_{\text{нам}} = 3 \div 5$ . В случае применения селективных АВ  $k_{\text{нам}} = 1$ );  $I_{\text{т.ном}}$  — номинальный ток трансформатора.

Если трансформатор является сварочным, необходимо кроме условия (5.17) учитывать режим работы этой сварочной машины. Как известно из ранее изложенного материала, под расчетным током сварочного преобразователя понимают эффективный (среднеквадратичный) ток

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\text{ПВ}} I_{\text{пас}} \quad (5.18)$$

где ПВ — продолжительность включения;  $I_{\text{пас}}$  — паспортный ток преобразователя.

Ток трансформатора изменяется от тока холостого хода до паспортного, поэтому необходимо осуществлять отстройку токовой от-

сечки АВ от паспортного тока преобразователя, принимаемого за пиковый ток, если его длительность достаточна для срабатывания отсечки

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{пас}} \quad (5.19)$$

Броском тока сопровождается и включение ламп накаливания

$$I_{\text{пик}} = k_T I_{\text{л.н.ном}} \quad (5.20)$$

где  $k_T$  — коэффициент изменения сопротивления нити накала вследствие изменения температуры, находится в пределах  $10 \div 14$ ;  $I_{\text{л.н.ном}}$  — номинальный ток лампы накаливания или группы ламп.

Длительность процесса нагрева нити накала зависит от мощности лампы и лежит в пределах от 60 до 100 мс, а кривая изменения тока представляет собой экспоненту.

4. Защиту от перегрузки согласно [2] должны иметь следующие сети внутри помещений:

а) электрические сети, выполненные открыто проложенными проводниками с горючей наружной оболочкой или с горючей наружной изоляцией;

б) осветительные сети, сети для стационарных электроплит, сети для бытовых и переносных электроприемников (утюгов, чайников, плиток, комнатных холодильников, пылесосов, стиральных и швейных машин и т.п.) в жилых зданиях, в общественных зданиях и сооружениях, в служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, а также в пожароопасных зонах;

в) силовые сети в жилых зданиях, в общественных зданиях и сооружениях, на промышленных предприятиях — в случае, когда по условиям технологического процесса или по режиму работы может возникнуть длительная перегрузка проводников (например, кабели питания двигателей транспортеров);

г) сети специальных установок.

Автоматический контроль за перегрузкой электроприемников осуществляется тепловым или аналогичным ему электронным расцепителем АВ, поэтому уставку последнего выбирают из соображений допустимой перегрузки электроприемника и электрической сети.

Так, для электродвигателей защиту от перегрузки считают эффективной, если

$$I_{\text{с.п}} \leq (1,2 \div 1,4) I_{\text{д.ном}} \quad (5.21)$$

Приведенный в формуле (5.21) коэффициент учитывает некоторый запас по току, неточность настройки и разброс срабатывания защиты практически всех типов АВ.

Для защиты от перегрузки трансформаторов уставки выбирают, исходя из перегрузочной способности трансформатора:

$$I_{\text{с.п}} \leq 1,4 I_{\text{т.ном}} \quad (5.22)$$

Для защиты от перегрузки конденсаторной установки (вследствие наличия высших гармоник и повышения напряжения сети) уставку тока перегрузки выбирают

$$I_{\text{с.п}} \leq 1,3 I_{\text{кб.ном}} \quad (5.23)$$

В сетях, защищаемых от перегрузки, сечения проводников выбирают так, чтобы токи аппаратов защиты к длительно допустимым токовым нагрузкам проводников имели кратность

$$I_{\text{с.п}} \leq 1,25 I_{\text{д}} \quad (5.24)$$

Для электроустановок во взрывоопасных зонах

$$I_{\text{с.п}} \leq I_{\text{д}} \quad (5.25)$$

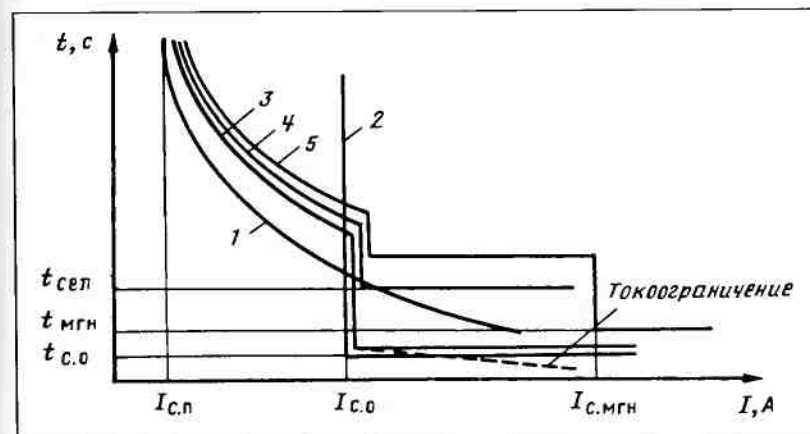


Рис. 5.7. Защитные характеристики автоматических выключателей

Причиной токовой перегрузки, как правило, является превышение номинальной мощности электроприемника (ЭП) вследствие изменения или нарушения технологического процесса, возникновение аномальных режимов, ошибочно заниженный выбор мощности электропривода (например, двигателя вентилятора) и т.д. Это превышение тока легче отследить в цепи данного ЭП, чем в групповой сети, поэтому защиту от перегрузки надо устанавливать у ЭП, а групповые сети защищать от перегрузки не имеет смысла.

5. Выбор времени срабатывания отсечки. Автоматические выключатели могут иметь следующие защитные характеристики (рис. 5.7): зависимую от тока характеристику времени срабатывания (тепловой расцепитель) (кривая 1);

не зависимую от тока характеристику времени срабатывания (электромагнитный расцепитель) (кривая 2);

ограниченно зависимую от тока двухступенчатую характеристику времени срабатывания (комбинированный расцепитель) без выдержки времени (кривая 3) или с выдержкой времени (кривая 4). Эти АВ называют селективными.

Селективные АВ могут иметь и трехступенчатую защитную характеристику (кривая 5); зона мгновенного срабатывания предназначена для уменьшения длительности воздействия токов при близких КЗ.

Выбор АВ начинают с защиты ЭП. Время срабатывания отсечки этих выключателей должно быть наименьшим. Как правило, это АВ с комбинированным расцепителем — неселективные. Время срабатывания отсечки определяется собственным временем отключения выключателя, выбираемым по каталогам: у неселективных АВ типов АП50, АЗ700, АЕ20, ВА51  $t_{с.о} \leq 0,02$  с, у токоограничивающих типов АЗ700Б, ВА52, ВА53, ВА54  $t_{с.о} \leq 0,01$  с.

Линейные выключатели КТП могут быть неселективными, если они защищают одиночные крупные ЭП. Время срабатывания отсечки АВ, защищающих группу ЭП (шинопроводы, кабельную сеть с распределительными шкафами), секционных и вводных выключателей определяют по условию

$$t_{с.о} \geq t_{с.о.п} + \Delta t, \quad (5.26)$$

где  $t_{с.о.п}$  — наибольшее время срабатывания отсечки предыдущей от источника питания защиты;  $\Delta t$  — степень селективности, принимается для выключателей АЗ3700 С, ВА55, ВА75 равной  $0,1 \div 0,15$  с, для серии “Электрон” —  $0,2 \div 0,25$  с, для АВ2М —  $0,15 \div 0,2$  с.

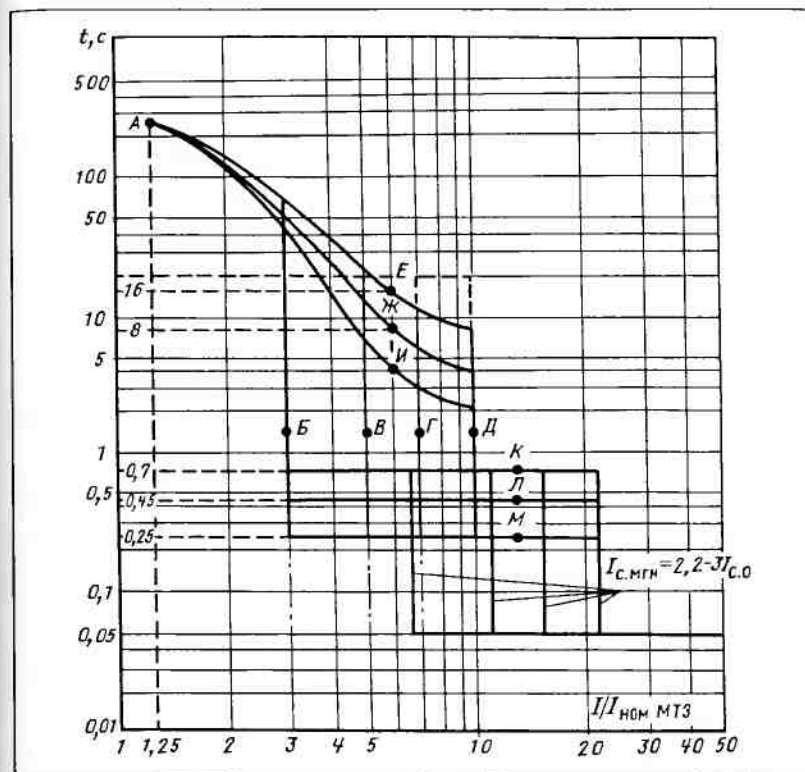


Рис. 5.8. Защитные характеристики выключателя “Электрон” с полупроводниковым реле серии РТМ. Наличие регулирования в точках Г и Д зависит от номинального тока выключателя

Для соблюдения условия селективности (избирательности действия защит) время срабатывания отсечки должно возрастать последовательно по цепи: АВ ЭП, линейный, секционный, вводной. Соблюдение перечисленных ступеней защиты позволяет построить селективную защиту электрической сети во всем диапазоне сверхтоков.

6. Проверка по условиям стойкости при КЗ. Предельной коммутационной способностью выключателя (ПКС) называется максимальное значение тока КЗ, которое выключатель способен включать и отключать несколько раз, оставаясь в исправном состоянии. Одноразовой ПКС (ОПКС) называют наибольшее значение тока, которое выключатель может отключить 1 раз. После этого дальнейшая работа выключателя не гарантируется. Каталожное значение ПКС

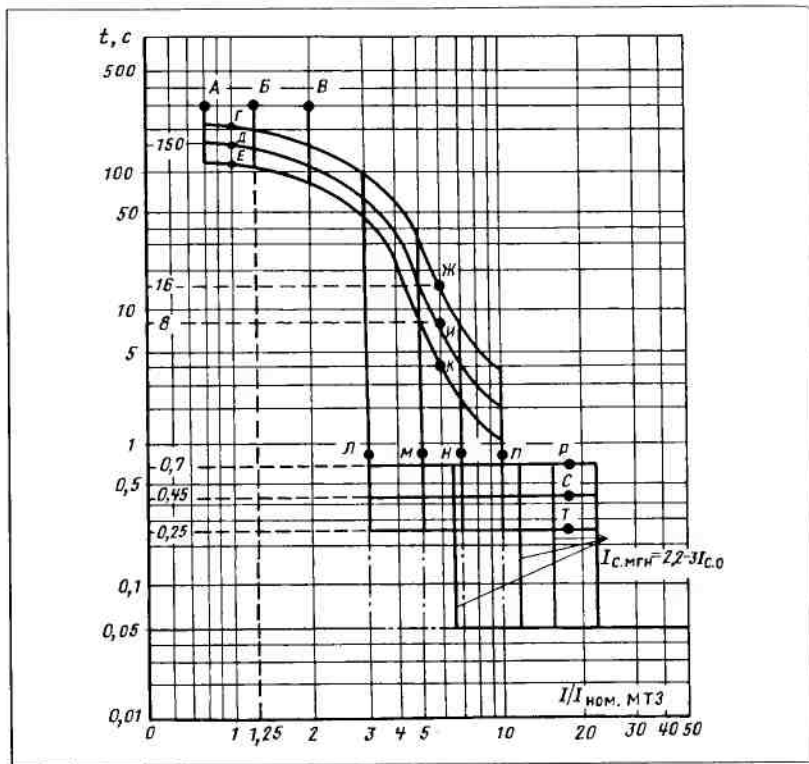


Рис. 5.9. Защитные характеристики выключателя "Электрон" с полупроводниковым реле серии МТЗ. Наличие регулирования в точках И и П зависит от номинального тока выключателя

должно быть не менее значения тока КЗ, протекающего в цепи в момент расхождения контактов выключателя.

$$\text{ПКС} \geq I_{\text{к}}^{(3)}, \quad (5.27)$$

где  $I_{\text{к}}^{(3)} = I_{\text{мах}}^{(3)}$  — ток металлического КЗ для вводных и секционного выключателей,

$$I_{\text{к}}^{(3)} = I_{\text{к.ср}}^{(3)} = \frac{I_{\text{кмах}}^{(3)} + I_{\text{кмин}}^{(3)}}{2} \text{ — средний ток КЗ (можно использовать}$$

при выборе линейных выключателей).

Допускается проверять АВ по значению тока ОПКС, а также устанавливать нестойкие при КЗ выключатели или группы выключателей,

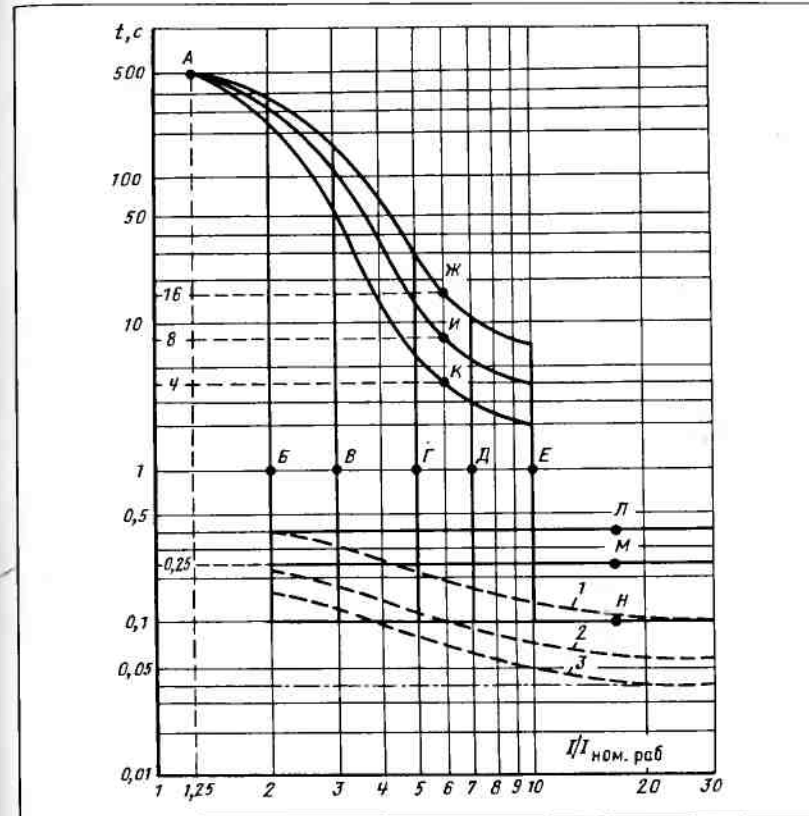


Рис. 5.10. Защитные характеристики автоматических выключателей переменного тока серии А3700 с полупроводниковым распределителем. Селективные выключатели А3794С при токе более 20 кА (действующее значение) отключаются без выдержки времени

чателей, если они защищены расположенным ближе к источнику питания стойким при КЗ выключателем, обеспечивающим мгновенное отключение всех КЗ с током, равным или большим тока ОПКС указанных нестойких выключателей.

Проверяется условие электродинамической стойкости

$$\text{ПКС(ОПКС)} \geq i_{\text{y}} \quad (5.28)$$

Проверку не выполняют, если значение электродинамической стойкости в каталоге отсутствует.

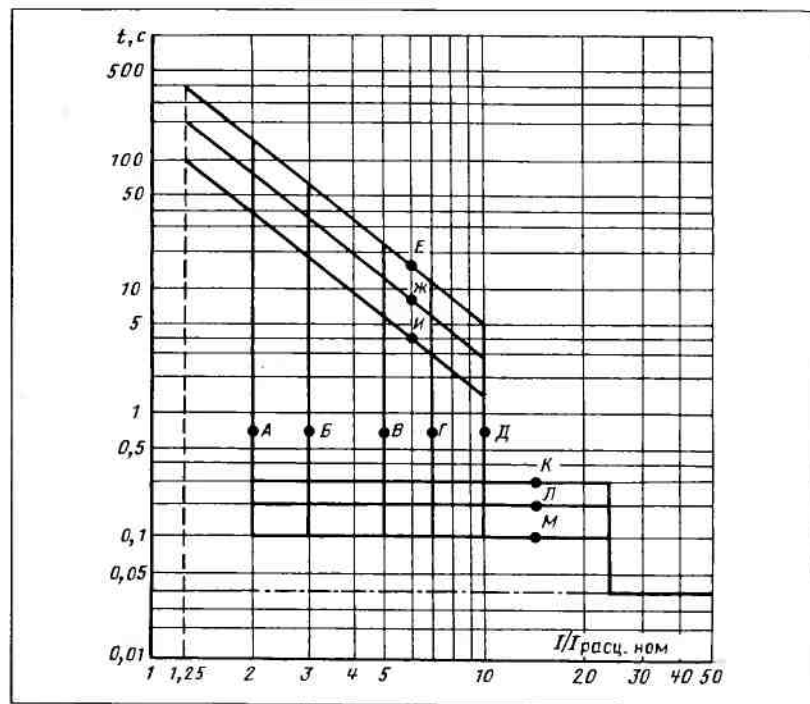


Рис. 5.11. Защитные характеристики автоматических выключателей переменного тока серий ВА53, ВА55, ВА75 с полупроводниковым расцепителем. Наличие регулировки в точках Г, Д, К, Л, М зависит от типа и номинального тока выключателя

Термическая стойкость,  $\text{kA}^2 \cdot \text{с}$ , проверяется по условию:

$$\int_0^i i^2 dt \geq B_k$$

где  $B_k$  — тепловой импульс.

Проверку не выполняют, если значение  $B_k$  в каталоге отсутствует (АВ является термически стойким при всех временах отключения, определяемых его защитной характеристикой).

7. Проверка на чувствительность отсечки при КЗ

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}}{I_{\text{с.о}}} \geq 1,1k_{\text{р}}, \quad (5.30)$$

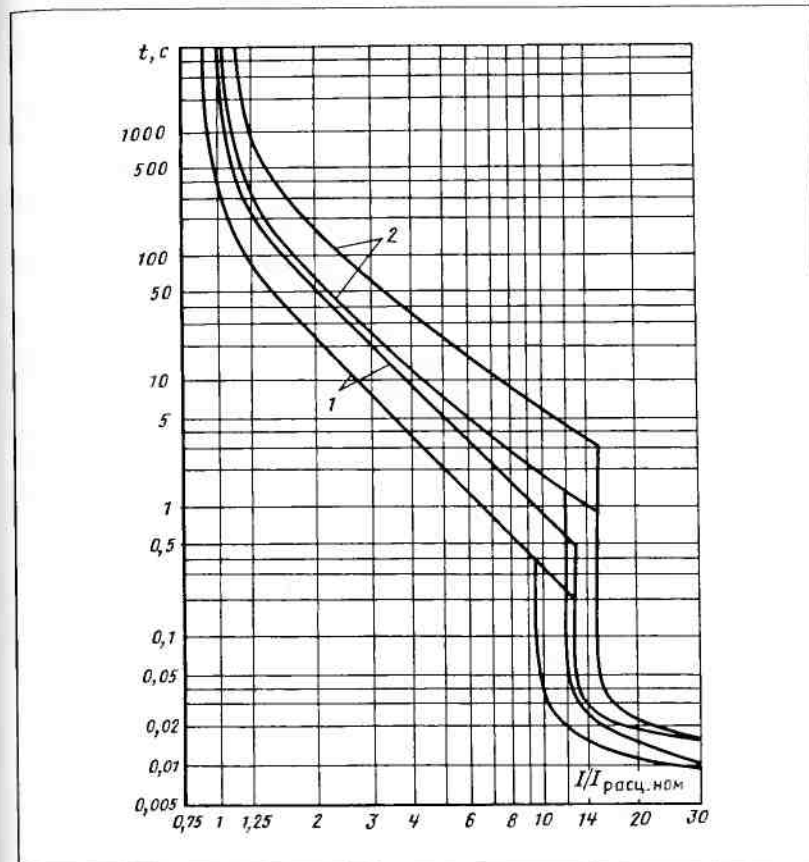


Рис. 5.12. Защитные характеристики автоматических выключателей АЕ2046М (температурная компенсация + 69°) — кривая 2 и ВА52Г25 (плюс 45°) — кривая 1

где  $k_{\text{ч}}$  — коэффициент чувствительности отсечки;  $I_{\text{кmin}}$  — минимальный ток КЗ в конце защищаемой зоны;  $I_{\text{с.о}}$  — ток срабатывания отсечки;  $k_{\text{р}}$  — коэффициент разброса срабатывания отсечки по току.

При отсутствии данных о разбросе произведения  $1,1k_{\text{р}}$  рекомендуется принимать это произведение равным не менее 1,4 — 1,5.

Подробные технические данные АВ приведены в каталогах [8, 9].

На рис. 5.8 — 5.12 приведены защитные характеристики, необходимые для правильного выбора защиты элементов системы электроснабжения напряжением до 1 кВ.



## 5.4. ПРИМЕР ВЫБОРА ЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УЧАСТКА СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЦЕХА

Ниже приведен пример выбора защитной аппаратуры для участка схемы электроснабжения цеха (рис. 5.13). Исходные данные, методика и результаты расчета токов КЗ приняты из примеров (гл. 4). Недостающие параметры схемы приводятся в ходе решения задачи. Цех питается от двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами мощностью  $S_{T,НОМ} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  по схеме блок трансформатор — магистраль.

Электроприемники небольшой мощности присоединены к ШМА с помощью распределительных шкафов ШР1 и ШР2. Осветительная нагрузка подключена через осветительные щитки ЩО1 — ЩО5 к групповому ГЩО и далее к ШМА.

**Выбор аппаратов защиты** выполняем “снизу”. К шкафу ШР2 типа СПА-77-1 подключена группа ЭП, из которых Т2 — однофазный трансформатор дуговой сварки ТДП-1,  $U_{НОМ} = 220 \text{ В}$ ,  $S_{пасп} = 11,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ; ПВ = 20 %.

Эффективная мощность:

$$S_{эф} = \sqrt{ПВ} \cdot S_{пасп} = 0,2 \cdot 11,4 \approx 5,1 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчетный (эффективный) ток

$$I_p = I_{эф} = \frac{S_{эф}}{U_{НОМ}} = \frac{5100}{220} \approx 23,17 \text{ А}.$$

Пиковый ток

$$I_{пик} = \frac{S_{пасп}}{U_{НОМ}} = \frac{11400}{220} = 51,8 \text{ А}.$$

Трансформатор подключен к шкафу ШР2 гибким кабелем W8 марки РПШ-3 × 2,5 длиной 10 м.

**Выбор АВ QF10.** Шкафы СПА77-1 коммутируются автоматическими выключателями типа АЕ-2040.

Выбираем АЕ-2046м с комбинированным расцепителем  $I_{расц,НОМ} = 25$ :

$$I_{расц,НОМ} = 25 \text{ А} > I_p = 23,17 \text{ А}.$$

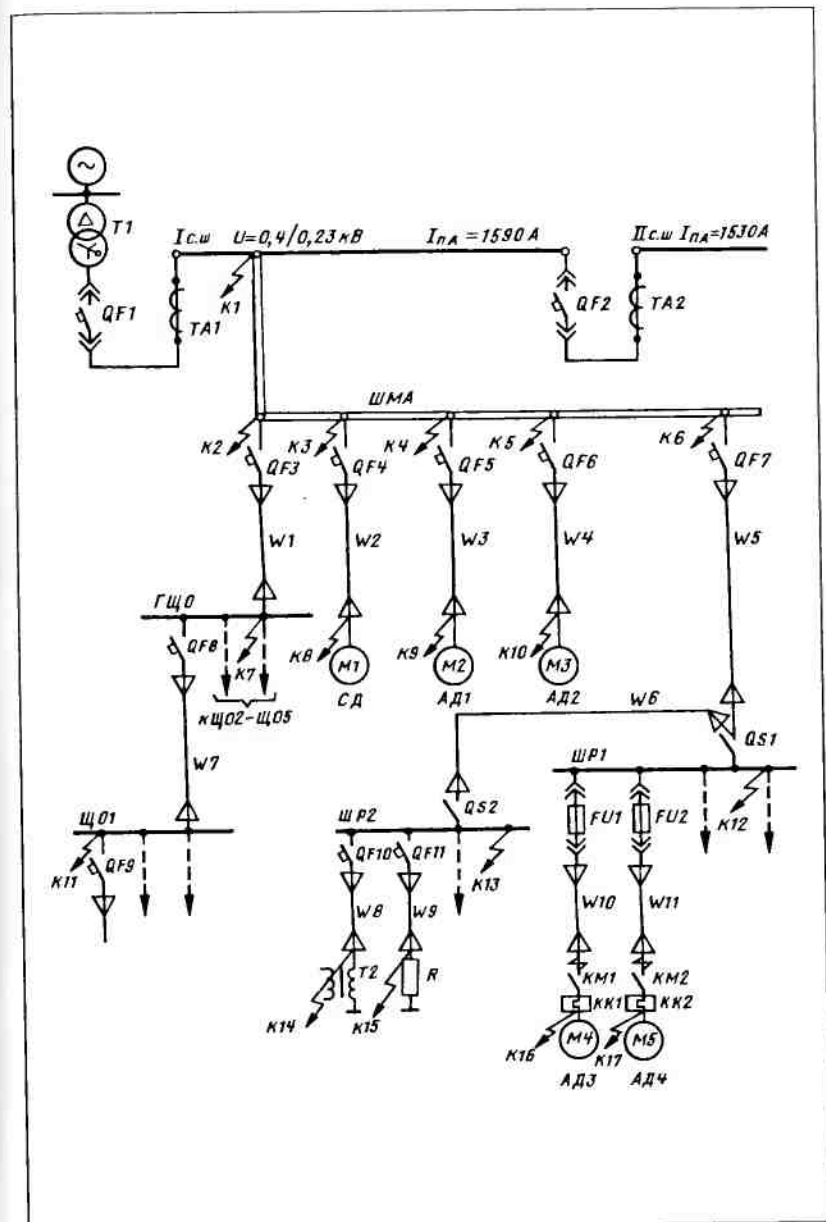


Рис. 5.13. Схема электроснабжения цеха

Ток срабатывания отсечки

$$I_{c.o} \geq k_n I_{\text{пик}}; I_{\text{нам}} \approx 5 I_{\text{т.ном}} = 5 \cdot 23,17 = 115,8 \text{ А.}$$

Так как  $I_{\text{нам}} = 115,8 \text{ А} > I_{\text{пик}} = 51,8$ , то расчетный ток срабатывания отсечки  $I_{c.o} \geq 2,1 \cdot 115,8 = 243,3 \text{ А}$ ; условие срабатывания отсечки:

$$I_{c.o} = 12 I_{\text{расц.ном}} = 12 \cdot 25 = 300 \text{ А} > 243,3 \text{ А.}$$

Результаты расчета токов КЗ для схемы рис. 5.13 приведены в табл. 5.1.

Тепловой расцепитель выбираем по условию

$$I_{c.п} = 1,15 I_{\text{расц.ном}} = 1,15 \cdot 25 = 28,75 < 1,4 I_{\text{т.ном}} = 1,4 \cdot 23,17 \approx 32,4 \text{ А,}$$

где  $I_{c.п}$  — ток срабатывания от перегрузки.

Таблица 5.1. Результаты расчетов токов КЗ

Место КЗ	Элемент сети	$I_{\text{номmax}}^{(3)}$ , кА	$I_{\text{номmin}}^{(3)}$ , кА	$I_{\text{номmin}}^{(1)}$ , кА
К1	Шины КТП	36,24	25,69	—
К2	ШМА	—	25,1	—
К3	ШМА	—	24,5	—
К4	ШМА	—	24	—
К5	ШМА	—	23,5	—
К6	ШМА	—	22,5	16,54
К7	ГЩО	—	10,77	4,13
К8	СД М1	—	—	4,62
К9	АД М2	—	—	6,44
К10	АД М3	—	—	5,35
К11	ЩО1	—	2,5	1,223
К12	ШР1	—	9,8	4,4
К13	ШР2	—	5,28	2,2
К14	Т2	—	—	0,945
К15	Электропечь R	—	—	1,2
К16	АД М4	—	—	0,813
К17	АД М	—	—	0,909

Собственное время отключения не превышает 0,04 с;

$$\text{ОПКС} = 6,5 \text{ кА} > I_{\text{номmin}}^{(3)}(К13) = 5,28 \text{ кА};$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}^{(1)}}{I_{c.o}} = \frac{945}{300} = 3,15 > 1,1 k_p = 1,43.$$

Все необходимые условия выполняются.

С помощью АВ QF11 подключена трехфазная электропечь сопротивления:

$$P_{\text{ном}} = 24 \text{ кВт}; U_{\text{ном}} = 380 \text{ В.}$$

Номинальный ток:

$$I_{\text{эл.ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{24000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95} \approx 38,3 \text{ А.}$$

Выберем АЕ-2046М с комбинированным расцепителем  $I_{\text{расц.ном}} = 40 \text{ А}$ :

$$I_{\text{расц.ном}} = 40 \text{ А} > I_{\text{эл.ном}} = 38,3 \text{ А};$$

ток срабатывания отсечки

$$I_{c.o} = 12 I_{\text{расц.ном}} = 12 \cdot 40 = 480 \text{ А} > k_n I_{\text{пик}} = 2,1 \cdot 1,1 \cdot 38,3 = 88,5 \text{ А};$$

$$I_{c.п} = 1,15 I_{\text{расц.ном}} = 1,15 \cdot 40 = 46 \text{ А};$$

$$t_{c.o} \approx 0,04 \text{ с};$$

$$\text{ОПКС} = 6,5 \text{ кА} > I_{\text{номmin}}^{(3)}(К13) = 5,28 \text{ кА};$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}^{(1)}}{I_{c.o}} = \frac{1200}{480} = 2,4 > 1,43.$$

Остальные АВ шкафа ШР2 выбираются аналогично.

Шкаф ШПИ представляет собой распределительный силовой шкаф типа СПМ-75-1 с рубильником QSI на ток 250 А на вводе и пятью группами предохранителей типа НПН2-60. К нему присоединена группа металлорежущих станков небольшой мощности.

Выбираем защиту одной такой группы со сверлильным станком:

M4 — асинхронный электродвигатель;  $P_{\text{ном}} = 3$  кВт;  $I_{\text{ном}} = 6,7$  А;  $\eta_{\text{ном}} = 82\%$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,83$ ;  $k_{\text{пуск}} = 7$ .

Определим ток плавкой вставки НПН2-60

$$I_{\text{п.в}} \geq \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{ном}}}{k_{\text{д.п}}} = \frac{7 \cdot 6,7}{2,5} = 18,7 \text{ А} \approx 20 \text{ А}.$$

С другой стороны, зная время пуска, которое составляет примерно 1 с, по защитной характеристике (см. рис. 5.3) при  $I_{\text{пуск}} = 47$  А подходит и  $I_{\text{п.в}} = 10$  А.

Выбираем предохранитель НПН-60 с током плавкой вставки  $I_{\text{п.в}} = 20$  А.

Предельный отключаемый ток предохранителя

$$I_{\text{п.откл}} = 10 \text{ кА} > I_{\text{п0min}(K13)} = 9,8 \text{ кА}.$$

Коэффициент чувствительности

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}^{(1)}}{I_{\text{п.в}}} = \frac{813}{20} = 40,7 > 3.$$

Для защиты от перегрузки и аномальных режимов выбираем магнитный пускатель КМ1 типа ПМЛ-1635 с тепловым расцепителем КК2 с токами срабатывания 5,5 — 8 А.

К ШПИ (рис. 5.13) присоединен транспортер с асинхронным электродвигателем M5;  $P_{\text{ном}} = 7$  кВт;  $I_{\text{ном}} = 14,5$  А;  $\eta_{\text{ном}} = 86\%$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;  $k_{\text{пуск}} = 7$ :

$$I_{\text{п.в}} \geq \frac{k_{\text{пуск}} I_{\text{ном}}}{k_{\text{д.п}}} = \frac{7 \cdot 14,5}{2,5} = 40 \text{ А};$$

$$I_{\text{п.в}} = 40 \text{ А}; \quad I_{\text{п.откл}} = 10 \text{ кА} > I_{\text{п0min}(K13)} = 9,8 \text{ кА};$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кmin}}^{(1)}}{I_{\text{п.в}}} = \frac{909}{40} = 22,7 > 3.$$

Для защиты от перегрузки и аномальных режимов выбираем магнитный пускатель КМ2 типа ПМЛ-2635 с тепловым расцепителем КК2 с токами срабатывания 13 — 19 А.

Находим уставку теплового расцепителя КК2:

$$I_{\text{т.р}} = 1,2 I_{\text{д.ном}} = 1,2 \cdot 14,5 = 17,4 \text{ А}.$$

Проверим защиту от перегрузки питающего кабеля W11 (АВВФ-4 × 2,5, длина 7 м):

$$I_{\text{т.р}} = 17,4 \text{ А} < 1,25 I_{\text{расц.ном}} = 1,25 \cdot 19 = 23,75 \text{ А}.$$

Аналогично выбираем защиту остальных групп электроприемников. Далее можно выбрать линейные АВ магистрального шинпровода. ШМА комплектуется АВ типа А3700. Выбираем в качестве QF6 селективный автоматический выключатель А3734С,  $I_{\text{АВном}} = 200$  А:

$$I_{\text{АВном}} = 200 \text{ А} \geq I_{\text{р}} = 181,8 \text{ А};$$

$$I_{\text{с.о}} = 7 I_{\text{АВном}} = 7 \cdot 200 = 1400 \text{ А} > k_{\text{н}} I_{\text{пик}} = 1,5 \cdot 436,3 = 654,5 \text{ А},$$

где  $I_{\text{пик}} = k_{\text{сз}} I_{\text{р}} = 2,4 \cdot 181,8 = 436,3$  А.

Время срабатывания отсечки  $t_{\text{с.о}} = 0,1$  с;

$$I_{\text{с.п}} = 1,25 I_{\text{АВном}} = 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ А};$$

$$\text{ПКС} = 50 \text{ кА} > i_{\text{y}} \approx 36,2 \text{ кА};$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{п0min}(K13)}^{(1)}}{I_{\text{с.о}}} = \frac{2200}{1400} = 1,57 > 1,43.$$

Аналогично выбирают АВ QF4, QF5, QF6 для подключения крупных электродвигателей:

QF4 — А3736 Ф,  $I_{\text{АВном}} = 630$  А, неселективный с комбинированным расцепителем;

$$I_{\text{расц.ном}} = 250 \text{ А} > I_{\text{д.ном}} = 234 \text{ А};$$

$$I_{\text{с.о}} = 2500 \text{ А} > k_{\text{н}} k_{\text{п}} I_{\text{д.ном}} = 1,5 \cdot 7 \cdot 234 = 2457 \text{ А};$$

$$I_{с.п} = 1,15 I_{расц.ном} = 1,15 \cdot 250 = 287,5 \text{ А};$$

$$k_{п} = \frac{I_{с.п}}{I_{д.ном}} = \frac{287,5}{234} \approx 1,23,$$

где  $k_{п}$  — коэффициент перегрузки;

$$\text{ПКС} = 50 \text{ кА} > i_y \approx 36,2 \text{ кА};$$

$$k_{ч} = \frac{I_{п.о min(K8)}^{(1)}}{I_{с.о}} = \frac{4620}{2500} = 1,848 > 1,43.$$

Автоматические выключатели *QF5* и *QF6* имеют те же параметры, что и *QF4*.

Далее рассмотрим защиту осветительной сети.

Применяем однополюсные щитки освещения ОП-6 без вводного АВ с шестью выключателями отходящих линий типа АЕ 1031-31:

$$I_{п} = 16 \text{ А}; I_{с.п} = 21,6 \text{ А}; \text{ ПКС} = 1,5 \text{ кА} < I_{п.о min}^{(3)} = 2,5 \text{ кА};$$

$$I_{с.п} = 21,6 \text{ А} < 1,25 I_{д} = 21,85 \text{ А} \quad (\text{АВВГ-1-2} \times 2,5, I_{д} = 17,5 \text{ А}).$$

Автоматические выключатели группового щитка освещения *ГЩО* должны быть стойкими к КЗ на *ЩО1* — *ЩО5*. Выбираем СПА77-9 с автоматическими выключателями А3716Б, с комбинированными расцепителями:

$$I_{ном} = 160 \text{ А};$$

$$I_{расц.ном} = 63 \text{ А} > I_{р} = 60 \text{ А};$$

$$I_{с.о} = 630 \text{ А} > k_{п} I_{р} = 1,5 \cdot 60 = 90 \text{ А};$$

$$I_{с.п} = 1,15 \cdot 63 = 72,45 \text{ А} < 1,25 I_{д} = 86,85 \quad (\text{АВВГ-1-4} \times 2,5; I_{д} = 69 \text{ А});$$

$$\text{ПКС} = 30 \text{ кА} > 18,6 \text{ кА};$$

$$k_{ч} = I_{п.о min(K11)}^{(1)} / I_{с.о} = 1223 / 630 = 1,94 > 1,43.$$

В качестве автоматического выключателя *QF3*, присоединяющего *ГЩО* к *ШМА*, выберем селективный с полупроводниковым расцепителем выключатель типа А3734С:

$$I_{ном} = 250 \text{ А};$$

$$I_{расц.ном} = 200 \text{ А} > I_{р} = 182 \text{ А};$$

$$I_{с.о} = 2 I_{расц.ном} = 2 \cdot 200 = 400 > k_{п} I_{р} = 1,5 \cdot 182 = 273 \text{ А};$$

$$I_{с.п} = 1,25 I_{расц.ном} = 1,25 \cdot 200 = 250 \text{ А} < 1,25 I_{д} = 1,25 \cdot 216,2 = 270 \text{ А}$$

$$(\text{АВВГ-1-3} \times 150 + 1 \cdot 70);$$

$$\text{ПКС} = 50 \text{ кА} > i_y \approx 36,2 \text{ кА};$$

$$k_{ч} = \frac{I_{п.о min(K7)}^{(1)}}{I_{с.о}} = \frac{4130}{400} = 10,3 > 1,43.$$

Время срабатывания отсечки  $t_{с.о} = 0,1 \text{ с}$ .

В качестве секционного выключателя *QF2* выберем выключатель типа Э16 выдвигного исполнения

$$I_{АВ ном} = 1600 \text{ А}.$$

Номинальный базовый ток  $I_{б.ном} = 1600 \text{ А}$ .

Номинальный ток МТЗ

$$I_{ном МТЗ} = 1 \cdot I_{б.ном} = 1600 \text{ А} > I_{п АВ} = 1590 \text{ А}.$$

Ток срабатывания отсечки

$$I_{с.о} = 5 \cdot I_{ном МТЗ} = 5 \cdot 1600 = 8000 \text{ А} > k_{сз} k_{п} I_{п АВ1} = 1,6 \cdot 2,4 \cdot 1590 = 6105,6 \text{ А},$$

где  $I_{п АВ1}$  — послеаварийный ток первой секции.

Время срабатывания отсечки

$$t_{с.о} = 0,1 + 0,15 = 0,25 \text{ с}.$$

Ток срабатывания защиты от перегрузки

$$I_{с.п} = 1,25 I_{номМТЗ} = 1,25 \cdot 1600 = 2000 \text{ А.}$$

Предельная коммутационная стойкость

$$ПКС = 45 \text{ кА} > I_{п0max}^{(3)} = 36,24 \text{ кА.}$$

Коэффициент чувствительности

$$k_{\chi} = \frac{I_{п0min}^{(I)}(К6)}{I_{с.р}} = \frac{16540}{8000} = 2,06 > 1,1 k_p = 1,1 \cdot 1,35 = 1,485.$$

Ток срабатывания мгновенного расцепителя

$$I_{с.мгн} = 3 I_{с.о} = 3 \cdot 8000 = 24000 \text{ А.}$$

Трехфазные КЗ на шинах КТП и шинопроводе будут отключаться без выдержки времени.

В качестве вводного АВ КТП *QF1* выберем выключатель типа Э25 выдвигного исполнения,  $I_{АВном} = 2500 \text{ А}$ .

Расчетный ток АВ определяется суммой расчетных токов секций КТП

$$I_p = I_{пАВ1} + I_{пАВ2} = 1590 + 1530 = 3120 \text{ А.}$$

Номинальный базовый ток  $I_{б.ном} = 2500 \text{ А}$ .

Ток срабатывания защиты от перегрузки:

$$I_{с.п} = 1,25 I_{номМТЗ} = 1,25 \cdot I_{б.ном} = 1,25 \cdot 2500 = 3125 \text{ А} > I_p = 3120 \text{ А.}$$

Ток срабатывания отсечки

$$I_{с.о} = 5 \cdot I_{б.ном} = 5 \cdot 2500 = 12500 > k_{\chi} (k_{сз2} I_{пАВ2} + k_{пр} I_{пАВ1}) = 1,6 \cdot (2,4 \cdot 1530 + 1,25 \cdot 1590) = 9055,2 \text{ А.}$$

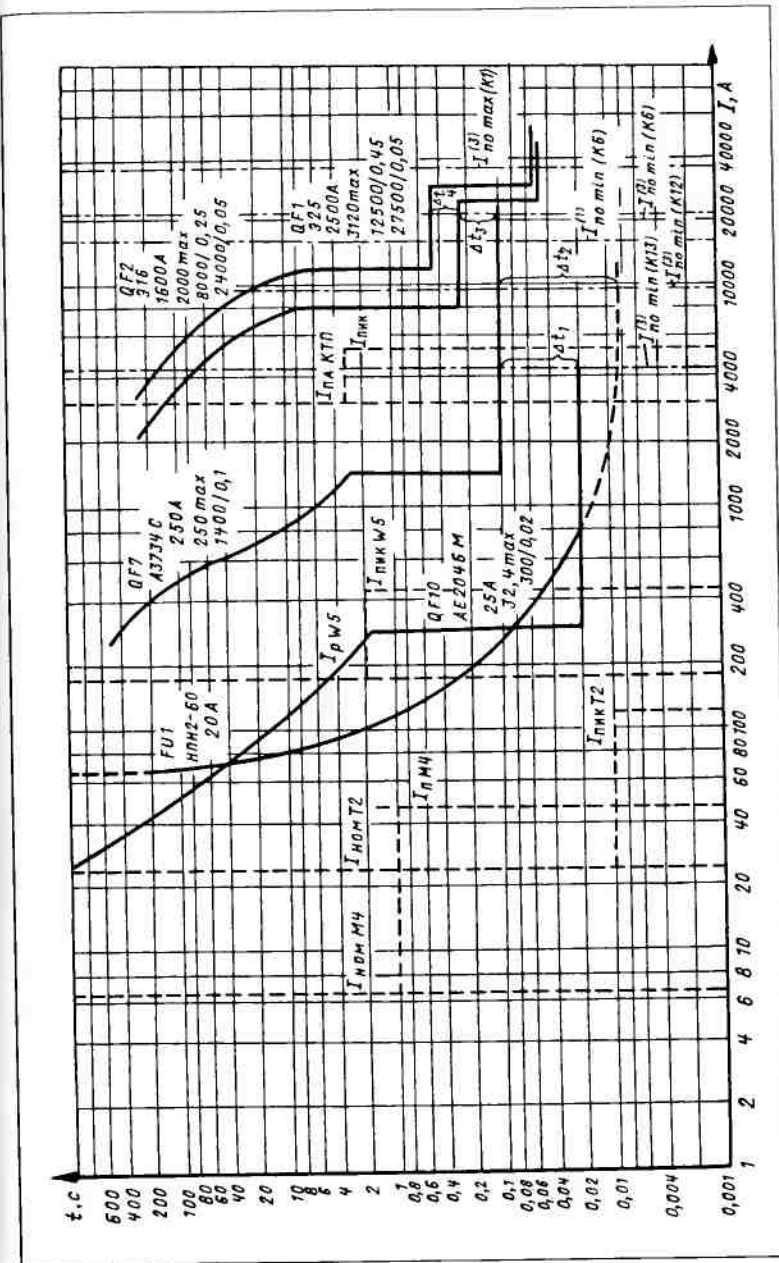


Рис. 5.14. Карта селективности (избирательности) защит участка сети

Время срабатывания отсечки

$$t_{c.o} = 0,25 + 0,2 = 0,45 \text{ с;}$$

$$\text{ПКС} = 50 \text{ кА} > I_{n0max}^{(3)} = 36,24 \text{ кА;}$$

$$I_{c.mfn} = 2,2I_{c.o} = 2,2 \cdot 12500 = 27500 \text{ А;}$$

$$k_{ч} = \frac{I_{n0min}^{(1)}(K6)}{I_{c.o}} = \frac{16540}{12500} = 1,323 < 1,485.$$

Условие не выполняется. В этом случае можно использовать защиту от перегрузки для защиты от однофазных КЗ с проверкой ее чувствительности

$$k_{ч} = \frac{I_{n0min}^{(1)}}{I_{c.п}} = \frac{16540}{3125} \approx 5,3 > 3 \text{ для невзрывоопасной среды.}$$

Можно также выполнить защиту от однофазных КЗ с воздействием ее на независимый расцепитель автоматического выключателя.

Для графического отображения правильности выбранных защит строится карта селективности. Приведем пример построения карты селективности защиты для участка схемы (рис. 5.13): двигатель *M4*, пускатель *KM1*, предохранитель *FU1*, автоматический выключатель *QF6*, секционный *QF2* и вводной *QF1* выключатели.

Карта селективности строится в логарифмическом масштабе по осям тока и времени. На поле графика наносят кривые расчетных и пиковых токов нагрузки в защищаемых точках сети, а также токов КЗ в точках согласования защит (*K6*, *K12*, *K13*, *K1*). Защитные характеристики аппаратов (предохранителей и автоматических выключателей) должны вписаться между нагрузочными и аварийными токами, причем иметь необходимые ступени селективности действия защит.

Все необходимые сведения приведены на карте селективности и в тексте примера выбора защитной аппаратуры для участка схемы электроснабжения цеха (рис. 5.14).

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### Справочные материалы по цеховому электрооборудованию

В этой главе приведены сведения по основному цеховому электрооборудованию (осветительному и силовому).

Таблица 6.1. Технические характеристики осветительных пунктов серии ПОР8513 ( $i_{уд} = 6,3 \text{ кА}$ )

Типоисполнение		$I_{ном}$ , А	Встраиваемые выключатели		
навесное	углубленное		вводный	распределения	
			выключатель пакетный ПВП14-27	ВА61F29 (1-пол) 6,3 – 63 А	ВА21-29 (1-пол) 0,6 – 63 А или ВА23-29С (1-пол) 6,3 – 63 А
ПОР8513-26-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-26-30-3XX-21	31,5	+	12	–
ПОР8513-28-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-28-30-3XX-21	50	+	12	–
ПОР8513-29-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-29-30-3XX-21	63	+	12	–
ПОР8513-26-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-26-30-3XX-21	31,5	+	12	–
ПОР8513-28-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-28-30-3XX-21	50	+	12	–
ПОР8513-29-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-29-30-3XX-21	63	+	12	–
ПОР8513-26-32-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-26-32-3XX-21	31,5	+	12	–
ПОР8513-28-32-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-28-32-3XX-21	50	+	12	–
ПОР8513-29-32-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-29-32-3XX-21	63	+	12	–
ПОР8513-26-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-26-30-3XX-21	31,5	+	–	6
ПОР8513-28-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-28-30-3XX-21	50	+	–	6
ПОР8513-29-30-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-29-30-3XX-21	63	+	–	6
ПОР8513-26-00-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-26-30-3XX-21	31,5	–	–	6
ПОР8513-28-00-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-28-30-3XX-21	50	–	–	6
ПОР8513-29-00-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-29-30-3XX-21	63	–	–	6
ПОР8513-31-10-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-31-10-3XX-21	100	–	12	–
ПОР8513-31-10-1XX-21-1XX-54	ПОР8513-31-10-3XX-21	100	–	12	–

Таблица 6.2. Технические характеристики групповых щитков серий ОП, ОЩ, УОЩВ (степень защиты IP20)

Тип щитка	Аппарат на вводе	Автоматические выключатели на группах		Способ установки	
		тип	число		
ОП-3УХЛ4	—	АЕ1000	3	Открыто	
ОП-6УХЛ4			6		
ОП-9УХЛ4			9		
ОП-12УХЛ4			12		
ОЩ-6УХЛ4			А63		6
ОЩ-12УХЛ4					12
ОЩВ-6АУХЛ4	АЕ2046-10	А3161		В нише	
ОЩВ-12АУХЛ4	АЕ2046-10	А3161			
УОЩВ-6АУХЛ4	АЕ2046-10	А3161			
УОЩВ-12АУХЛ4	АЕ2046-10	А3161			

Таблица 6.3. Технические характеристики распределительных пунктов серии ПР41

Тип пункта	Число трехполюсных выключателей		Число трехфазных конденсаторов КС1-038-18У3
	вводных А3728Ф	групповых А2046	
ПР41-4301-43У4	1	4	4
ПР41-4302-У3У4	—		

Таблица 6.4. Технические характеристики осветительных взрывонепроницаемых щитков

Тип щитка	Аппарат на вводе	Автоматические выключатели на группах			
		тип	ток распределителя, А	число	
				однополюсных	трехполюсных
ЩОВ-1А	Трехполюсный разьединитель	АЕ2044	16	6	—
ЩОВ-2А		АЕ2046	50	—	—
		АЕ2044	16	12	—

Таблица 6.5. Классификация и технические данные шкафов РУНН КТП и шкафов ввода высокого напряжения (ШВВ)

Тип шкафа		Назначение шкафа	Тип выключателя, встроенного в шкаф		$I_{ном}$ выключателя, А	
УЗ	ТЗ		УЗ	ТЗ	УЗ	ТЗ
ШНВ-1М	ШНВ-1МТ	Вводной (Л, П)	Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			Э06В	Э06ВТ	630	630
ШНВ-2М	ШНВ-2МТ		Э25В	Э25ВТ	2500	2000
			2 × Э06В	2 × Э06ВТ	2 × 630	2 × 630
ШНВ-3М	ШНВ-3МТ		Э40В	Э40ВТ	4000	4000
ШНВ-4М	—		Э25В	—	2500	—
			Э40В	—	5000	—
ШНВ-2К	—		Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			А3736Ф	—	400	—
			(А3794Б)	А3794Б	(630)	630
ШНВ-5М	ШНВ-5МТ					

Продолжение табл. 6.5

Тип шкафа		Назначение шкафа	Тип выключателя, встроенного в шкаф		$I_{ном}$ выключателя, А	
УЗ	ТЗ		УЗ	ТЗ	УЗ	ТЗ
ШН-6М	ШНВ-6МТ	Вводной (Л, П)	Э25В	Э25ВТ	2500	2000
			2 × А3736Ф (2 × А3794Б)	—	2 × 400	—
ШНС-1М	ШНС-1МТ		Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			Э06В	Э06ВТ	630	630
ШНС-2М	ШНС-2МТ		Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			Э16В	Э16ВТ	1600	1250
ШНС-3М	ШНС-3МТ		Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			Э06В	Э06ВТ	630	630
ШНС-4М	ШНС-4МТ		Э16В	Э16ВТ	1600	1250
			А3736Ф (А3794Б)	—	400	—
ШНС-3К	—	А3794Б	А3794Б	(630)	630	
		Э25В	—	2500	—	
ШНЛ-1М	ШНЛ-1МТ	Линейный	3 × Э06В	3 × Э06ВТ	1 × 400, 2 × 630	1 × 400, 2 × 630
			Э16В	Э16ВТ	1600	1250
ШНЛ-2М	ШНЛ-2МТ		Э06В	Э06ВТ	800 (1000)	800
			Э16В	Э16ВТ	1600	1250
ШНЛ-3М	ШНЛ-3МТ		Э06В	Э06ВТ	800 (1000)	800
			Э16В	Э16ВТ	1600	1250
ШНЛ-4М	ШНЛ-4МТ		Э06В	Э06ВТ	800 (1000)	800
			3 × А3736Ф (3 × А3794Б)	3 × 3794Б	3 × 400 (1 × 400, 2 × 630)	— (1 × 400, 2 × 630)
ШНЛ-5М	ШНЛ-5МТ					
ШНЛ-2К	—		Э16В	—	1600	—
ШНЛ-3К	—	Э25В	—	2500	—	
ШВВ-3	ШВВ-3Т	(Л, П)	ВНП-630/10	ВНП-630/10	—	—
ШВВ-5	ШВВ-5Т					
ШВВ-5В	ШВВ-5ВТ					
ШВВ-6	—					
ШВВ	ШВВ	(Л, П)				

Примечания: 1. Л — левое исполнение, П — правое исполнение, В — выкатное.  
2. Шкаф ШНВ-1М с трансформатором тока 2000/5.

Таблица 6.6. Условия выбора и проверки проводов и кабелей в системах электроснабжения

$U > 1$ кВ		$U < 1$ кВ	
Неизолированные провода, токопроводы, шины	Кабели, изолированные провода	Кабели, изолированные провода	Шины, шинопроводы
$s_{ст} \geq s_p, s_p = \frac{I_p}{J_{н}}$		$I_d(s_{ст}) \geq I_p$	
$I_d^{k_{пр}} k_{ср} k_{нф} \geq I_{pmax} (I_{pmax} - \text{послеаварийный ток})$			
$\Delta U_{доп} \geq \Delta U_p, \Delta U_p = \sqrt{3} I_p R(r_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)$			
$i_{лин} \geq i_{уд}$	$s_{ст} \geq s_{тс}, s_{тс} = I_k^{(3)} \sqrt{I_n} / C$	$i_{лин} \geq i_{уд}$	

Таблица 6.7. Технические характеристики комплектных магистральных шиннопроводов для сетей с глухозаземленной нейтралью напряжением до 660 В, частотой 50 – 60 Гц

Характеристика	Тип шиннопровода				
	ШМА73УЗ	ШМА73ПУЗ	ШМА68-НУЗ		ШМА4-1250-44-IT3
Номинальный ток, А	1600	1600	2500	4000	1250
Электродинамическая стойкость (амплитудное значение), кА	70	90	70	100	70/50*
Термическая стойкость, кА	20	35	35	50	—
Сопrotивление на фазу, Ом/км:					
активное при температуре выше 20° С	0,031	0,031	0,02		0,034
индуктивное	0,022	0,022	0,02		0,016
Сопrotивление фаза-нуль (полное), Ом/км	0,016	0,016	—	—	0,00953
Линейная потеря напряжения на 100 м при номинальном токе (нагрузка сосредоточена в конце линии, $\cos \varphi = 0,8$ ), В	11,5	11,5	13,5	16,5	—
Поперечное сечение прямой секции (ширина × высота), мм	300 × 160	300 × 160	444 × 215	444 × 295	—
Степень защиты	IP20	IP20	IP20	IP20	IP44
Максимальное расстояние между точками крепления, м:					
на трассах, составленных из прямых секций длиной выше 1,5 м	6	6	—	—	—
в других случаях	5	5	3	3	3
Типы автоматических выключателей, установленных в ответвительных секциях	A3734С, 400А, 660В, A3744С, 630А, 660В, A3736Ф, 400А, 380В, A3736Ф, 630А, 380В	—	—	—	—

\* 70/50 — числитель для присоединительных секций, знаменатель — для остальных.

Таблица 6.8. Технические характеристики комплектных распределительных шиннопроводов для сетей с глухозаземленной нейтралью напряжением 380/220 В, частотой 50 – 60 Гц

Характеристика	Тип шиннопровода			
	ШРА73УЗ			ШРМ73УЗ
Номинальный ток, А	250	400	630	100
Электродинамическая стойкость (амплитудное значение), кА, не менее	15	25	35	10
Термическая стойкость, кА	7	10	14	7
Сопrotивление на фазу, Ом/км:				
активное	0,21	0,15	0,10	—
индуктивное	0,21	0,17	0,13	—
Линейная потеря напряжения, В, на длине 100 м при номинальном токе, $\cos \varphi = 0,8$ и равномерно распределенной нагрузке	6,5	8	8,5	—
Поперечное сечение, мм	260 × 80	284 × 95	284 × 125	70 × 80
Степень защиты	IP32	IP32	IP32	IP32
Максимальное расстояние между точками крепления, м, не более:				
при креплении на стойках	6	6	6	3
на других конструкциях	3	3	3	3
Типы коммутационно-защитной аппаратуры, установленной в осветительных коробках:				
предохранители	ПН2-100	ПН2-100	ПН2-100	На ток 25 А
автоматические выключатели (ток, А)	A3710 (160), A3120 (100), АЕ2050 (100)	A3710 (160), A3720 (250), A3120 (100), АЕ2050 (100)	A3710 (160), A3720 (250), A3120 (100), АЕ2050 (100)	АЕ 2033(25)
Наличие ответвительных коробок с разъединителями на токи, А:				
160	Есть	Есть	Есть	—
250	Нет	Есть	Есть	—



Таблица 6.9. Технические характеристики распределительных силовых шкафов серии ШРСУЗ

Тип	$I_{ном}$ , А	Число отходящих линий и номинальные токи предохранителей, А
ШРС1-50УЗ	175	5 × 60
ШРС1-21УЗ	250	5 × 100
ШРС1-51УЗ	175	5 × 100
ШРС1-22УЗ	250	2 × 60 + 3 × 100
ШРС1-52УЗ	175	2 × 60 + 3 × 100
ШРС1-23УЗ	250	8 × 60
ШРС1-53УЗ	175	8 × 60
ШРС1-24УЗ	250	8 × 100
ШРС1-54УЗ	175	8 × 100
ШРС1-25УЗ	250	4 × 60 + 4 × 100
ШРС1-55УЗ	175	4 × 60 + 4 × 100
ШРС1-26УЗ	250	5 × 250
ШРС1-56УЗ	175	5 × 250
ШРС1-27УЗ	250	5 × 100 + 2 × 250
ШРС1-57УЗ	175	5 × 100 + 2 × 250
ШРС1-28УЗ	250	2 × 60 + 4 × 100 + 2 × 250
ШРС1-58УЗ	175	2 × 60 + 4 × 100 + 2 × 250

Таблица 6.10. Технические характеристики распределительных силовых шкафов типа СПМ75

Тип	Номинальный ток рубильника, А	Число групп предохранителей		
		НПН2-60	ПН2-100	ПН2-250
СПМ 75-1	250	5	—	—
СПМ 75-2	250	—	5	—
СПМ 75-3	250	2	3	—
СПМ 75-4	400	8	—	—
СПМ 75-5	400	—	8	—
СПМ 75-6	400	4	4	—
СПМ 75-7	400	—	—	5
СПМ 75-8	400	—	5	2
СПМ 75-9	400	2	4	2

Таблица 6.11. Технические характеристики распределительных силовых шкафов типа СПА77

Тип	Номинальный ток рубильника, А	Число автоматических выключателей типа				
		АЕ2040 (63 А)	АЕ2050 (100 А)	А3710 (160 А)	А3720 (250 А)	
СПА 77-1	250	5	—	—	—	
СПА 77-2		2	—			
СПА 77-3		—	6			
СПА 77-4	400	—	—	—	4	
СПА 77-5		8	—			
СПА 77-6		4	4			
СПА 77-7		—	8			
СПА 77-8		—	—			8
СПА 77-9		—	—			5

Таблица 6.12. Технические характеристики распределительных пунктов серии ПР8513

Тип исполнения		$I_{ном}$ , А	Встраиваемые выключатели			$I_{ул}$ , кА
навесное	утопленное		вводный	распределения		
		выключатель пакетный ПВП114-27		АЕ20 46М на ток 0,6 – 63 А*	ВА51-25 на ток 6,3 – 25 А	
ПР8513-29-00-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-29-00-3ХХ-21	63	—	—	10	6,3
			—	8	—	
ПР8513-29-10-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-29-10-3ХХ-21	63	—	—	8	6,3
			—	2	4	
ПР8513-31-00-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-31-00-3ХХ-21	100	—	—	10	6,3
			—	8	—	
ПР8513-31-10-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-31-10-3ХХ-21	100	—	—	8	6,3
			—	4	—	
ПР8513-31-20-1ХХ-21-1ХХ-54	—	100	—	—	8	6,3
			—	6	—	
ПР8513-31-21-1ХХ-21-1ХХ-54	—	100	—	—	8	6,3
			—	6	—	
ПР8513-33-00-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-33-00-3ХХ-21	160	—	—	16	10
			—	12	—	
ПР8513-33-10-1ХХ-21-1ХХ-54	ПР8513-33-10-3ХХ-21	160	—	—	12	10
			—	8	—	

Таблица 6.13. Технические характеристики распределительных пунктов серии ПР8513

Типоисполнение		$I_{\text{ном}}$ , А	Встраиваемые выключатели распределения		$I_{\text{уд}}$ , кА
навесное	утопленное		ВА04-36-34 или ВА51-35-34* на ток 80 – 160 А при $I_{\text{ном}}$ до 400 А, 80 – 250 А при $I_{\text{ном}} = 630$ А	АЕ2046М на ток 0,6 – 63 А	
ПР8513-35-00-1XX-21-1XX-54	ПР8513-35-00-3XX-21	250	2 0	8 12	20
ПР8513-35-00-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	10 14	20
ПР8513-35-10(11)-1XX-21-1XX-54	ПР8513-35-10-3XX-21	250	2 0	4 6	20
ПР8513-35-10(11)-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	8 10	20
ПР8513-35-10(11)-1XX-21-1XX-54	ПР8513-35-10(11)-2XX-21-2XX-54	250	2 0	10 12	20
ПР8513-35-10(11)-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	4 6	20
ПР8513-35-20-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	10 12	20
ПР8513-35-21-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	4 6	20
ПР8513-35-21-1XX-21-1XX-54	—	250	2 0	10 12	20
ПР8513-37-00-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4 6 0	8 4 0 12	20
ПР8513-37-00-1XX-21-1XX-54	ПР8513-37-00-2XX-21-2XX-54	400	2 4 0	14 10 16	25
ПР8513-37-10(11)-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4 0	4 0 6	25
ПР8513-37-10(11)-1XX-21-1XX-54	ПР8513-37-10(11)-2XX-21-2XX-54	400	2 6 0	8 4 10	25
ПР8513-37-20-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4	4 0	25
ПР8513-37-20-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4 6 0	8 4 0 10	25

Продолжение табл. 6.13

ПР8513-37-20-1XX-21-1XX-54	ПР8513-37-20-2XX-21-2XX-54	400	2 4 6 0	10 8 0 12	25
ПР8513-37-21-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4	4 0	25
ПР8513-37-21-1XX-21-1XX-54	—	400	2 4 6 0	8 4 0 10	25
ПР8513-37-21-1XX-21-1XX-54	ПР8513-37-21-2XX-21-2XX-54	400	2 4 6 0	10 8 0 12	25
ПР8513-39-00-1XX-21-1XX-54	—	630	2 4 0	6 4 10	25
ПР8513-39-10(11)-1XX-21-1XX-54	ПР8513-39-10(11)-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0	6 2 8	25
—	ПР8513-39-10(11)-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0 6 4	10 6 12 0 2	25
ПР8513-39-20-1XX-21-1XX-54	—	630	2 4 0	6 0 8	25
ПР8513-39-20-1XX-21-1XX-54	ПР8513-39-20-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0	8 6 12	25
—	ПР8513-39-20-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0 6	12 10 16 0	25
ПР8513-39-21-1XX-21-1XX-54	—	630	2 4 0	6 0 8	25
ПР8513-39-21-1XX-21-1XX-54	ПР8513-39-21-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0	8 6 10	25
—	ПР8513-39-21-2XX-21-2XX-54	630	2 4 0 6	12 10 16 0	25

\* ВА51-35-34 на ток 80 – 160 А при  $I_{\text{ном}}$  до 400 А или на ток 80 – 250 А при  $I_{\text{ном}} = 630$  А.

Таблица 6.14. Сопротивление комплектных шинпроводов

Параметр	Тип комплектного шинпровода при номинальном токе, А													
	ШМА68П		ШМА73	ШМА4			ШМ316	ШРА73			ШРА4			
	2500	4000	1600	1250	1600	2500	3200	1600	250	400	630	250	400	630
Сопротивление на фазу $r_{ш}$ , мОм/м	0,02	0,013	0,031	0,034	0,03	0,017	0,015	0,014	0,21	0,15	0,1	0,21	0,15	0,1
Сопротивление на фазу $x_{ш}$ , мОм/м	0,02	0,015	0,022	0,016	0,014	0,008	0,007	0,006	0,21	0,17	0,13	0,21	0,17	0,13
Сопротивление петли фаза – нуль $r_{ф-н}$ , мОм/м	0,09	0,083	0,126	—	—	—	—	—	0,42	0,3	0,2	—	—	—
Сопротивление петли фаза – нуль $x_{ф-н}$ , мОм/м	0,066	0,061	0,098	—	—	—	—	—	0,42	0,24	0,26	—	—	—
Полное сопротивление петли фаза – нуль $Z_{ф-н}$ , мОм/м	—	—	—	0,086	0,087	0,082	0,053	0,07	—	—	—	—	—	—

Таблица 6.15. Сопротивление кабелей

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление жилы при 20° С, мОм/м		Индуктивное сопротивление, мОм/м	
	алюминиевой	медной	кабели с поясной бумажной изоляцией	три провода в трубе, кабели с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией
1	—	18,5	—	0,133
1,5	—	12,5	—	0,126
2,5	12,5	7,4	0,104	0,116
4	7,81	4,63	0,095	0,107
6	5,21	3,09	0,09	0,1
10	3,12	1,84	0,073	0,099
16	1,95	1,16	0,0675	0,095
25	1,25	0,74	0,0662	0,091
35	0,894	0,53	0,0637	0,088
50	0,625	0,37	0,0625	0,085
70	0,447	0,265	0,612	0,082
95	0,329	0,195	0,0602	0,081
120	0,261	0,154	0,0602	0,08
150	0,208	0,124	0,0596	0,079
185	0,169	0,1	0,0596	0,078
240	0,13	0,077	0,0587	0,077

Таблица 6.16. Удельные активные сопротивления неизолированных медных, алюминиевых и сталеалюминиевых проводов при 20° С

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Медные провода (М)		Алюминиевые провода (А)		Сталеалюминиевые провода (АС)	
	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$ , мОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$ , мОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$ , мОм/м
4	2,2	4,52	—	—	—	—
6	2,7	3,05	—	—	—	—
10	3,6	1,79	—	—	4,5	2,695
16	5,1	1,13	5,1	1,8	5,6	1,772
25	6,4	0,72	6,4	1,14	6,9	1,146
35	7,5	0,515	7,5	0,83	8,4	0,773
50	9,0	0,361	9,0	0,576	9,6	0,593
70	10,7	0,267	10,7	0,412	11,4	0,42
95	12,6	0,191	12,3	0,308	13,5	0,314
120	14,0	0,154	14,0	0,246	15,5	0,249
150	15,8	0,122	15,8	0,194	16,8	0,195
185	17,6	0,099	17,5	0,157	18,8	0,159

Таблица 6.17. Сопротивление автоматических выключателей

$I_{ном}$ , А	$r_{д}$ , мОм	$x_{д}$ , мОм
50	7	4,5
70	3,5	2
100	2,15	1,2
140	1,3	0,7
200	1,1	0,5
400	0,65	0,17
600	0,41	0,13
1000	0,25	0,1
1600	0,14	0,08
2500	0,13	0,07
4000	0,1	0,05

Примечание. Приведенные значения сопротивлений включают в себя сопротивления токовых катушек расцепителей и переходные сопротивления подвижных контактов.

Таблица 6.18. Приближенные значения активных сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ

$I_{ном}$ аппарата, А	Активное сопротивление, мОм	
	рубильники	разъединители
50	—	—
70	—	—
100	0,5	—
150	—	—
200	0,4	—
400	0,2	0,2
600	0,15	0,15
1000	0,08	0,08
2000	—	0,02
3000	—	0,02

Таблица 6.19. Активные переходные сопротивления неподвижных контактных соединений

Соединение	Сопротивление, мОм	
Кабель (алюминиевый) сечением, мм <sup>2</sup> :	16	0,85
	25	0,064
	35	0,056
	50	0,043
	70	0,029
	95	0,027
	120	0,024
	190	0,021
	240	0,012
	Шинопроводы типа ШРА-73, ШРА-4 на номинальный ток, А:	250
400		0,006
630		0,0037
Шинопроводы типа ШМА-73, ШМА-4 на номинальный ток, А:	1600	0,0034
	2500	0,0024
	3200, 4000	0,0012

Таблица 6.20. Коэффициенты трансформации  $K_j$  и сопротивления первичных обмоток многовитковых трансформаторов тока

$K_j$	Сопротивление первичной обмотки многовиткового трансформатора, мОм, класса точности			
	1		3	
	$x_{TA}$	$r_{TA}$	$x_{TA}$	$r_{TA}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблица 6.21. Расстояние, мм, между фазами проводников в сетях напряжением до 1 кВ

Шиннопроводы		Кабели сечением, мм <sup>2</sup>				
ШМА	ШРА	2,5 – 10	16 – 35	50 – 95	120 – 185	240
10	45	1,6	2,4	2,8	4,0	4,8

Таблица 6.22. Расстояние между фазами проводников в КТП

$S_{T,ном}$ , кВ · А	400	630	1000	1600	2500
Расстояние, мм	60	60	70	120	180

Таблица 6.23. Сопротивления силовых трансформаторов току однофазного замыкания (схема соединения обмоток  $\Delta/Y_0$ )

$S_{T,ном}$ , кВ · А	$U_{ном}$ , В	$r_T$ , мОм	$x_T$ , мОм	$Z_T$ , мОм
400	400	16,35	57,6	60
	690	52,68	151,8	160,68
	400	66,6	183,2	194,9
	690	199,8	549,6	584,8
630	400	9,63	40,8	42
	690	28,05	121,29	124,5
	400	36,42	123,4	128,7
	690	109,26	370,2	385,99
1000	400	5,73	25,8	26,4
	690	14,4	77,4	79,2
	400	23,0	77,76	81,09
	690	69,0	233,28	243,27
1600	400	3,375	16,2	16,5
	690	10,05	48,03	49,2
	400	18,3	60,76	63,46
	690	54,9	182,28	190,4
2500	400	1,905	10,38	10,56
	690	5,7	30,87	31,41

Таблица 6.24. Полное удельное сопротивление петли фаза – нуль  $Z_{пт,уд}$  для кабеля или пучка проводов с алюминиевыми жилами при температуре жилы 65° С, мОм/м

Сечение фазного провода, мм <sup>2</sup>	Сечение нулевого провода, мм <sup>2</sup>										
	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
2,5	29,64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	24,08	18,52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	15,43	12,34	9,88	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	9,88	7,41	5,92	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	5,92	4,43	3,7	3,35	—	—	—	—
25	—	—	—	5,19	3,7	2,96	2,54	2,22	—	—	—
35	—	—	—	4,77	3,35	2,54	2,12	1,8	1,59	—	—
50	—	—	—	—	3,06	2,22	1,8	1,48	1,27	1,13	—
70	—	—	—	—	—	2,01	1,59	1,27	1,06	0,92	—
95	—	—	—	—	—	—	1,45	1,13	0,92	0,78	—
120	—	—	—	—	—	—	1,37	1,05	0,84	0,7	0,62
150	—	—	—	—	—	—	—	0,99	0,82	0,67	0,52
185	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,73	0,59	0,51

Таблица 6.25. Полное удельное сопротивление петли фаза – алюминиевая оболочка трехжильных кабелей с бумажной изоляцией  $Z_{п,уд}$  (без нулевой жилы), мОм/м

Число и сечение жил, мм <sup>2</sup>	Кабели			
	медные АГ, АБ	алюминисвые ААГ, ААБ	медные АШв	алюминисвые ААШв
3 × 6	5,02	7,71	4,98	7,67
3 × 10	3,33	4,95	3,31	4,92
3 × 16	2,35	3,36	2,31	3,33
3 × 25	1,81	2,46	1,79	2,44
3 × 35	1,39	1,85	1,37	1,83
3 × 50	1,09	1,42	1,07	1,40
3 × 70	0,84	1,07	0,83	1,06
3 × 95	0,67	0,84	0,66	0,83
3 × 120	0,57	0,71	0,56	0,70
3 × 150	0,42	0,53	0,44	0,54
3 × 185	0,36	0,45	0,36	0,45
3 × 240	0,31	0,37	0,29	0,36

Таблица 6.26. Полное удельное сопротивление петли фаза — нуль  $Z_{пт,уд}$  с учетом проводимости алюминиевой оболочки четырехжильного кабеля с бумажной изоляцией, мОм/м

Число и сечение жил, мм <sup>2</sup>	Кабели	
	медные АГ, АБ	алюминиевые ААГ, ААБ
3 × 6 + 1 × 4	4,74	7,49
3 × 10 + 1 × 6	3,06	4,73
3 × 16 + 1 × 10	2,01	3,08
3 × 25 + 1 × 16	1,38	2,10
3 × 35 + 1 × 16	1,06	1,57
3 × 50 + 1 × 25	0,78	1,16
3 × 70 + 1 × 25	0,61	0,87
3 × 95 + 1 × 25	0,48	0,69
3 × 120 + 1 × 35	0,41	0,58
3 × 150 + 1 × 50	0,31	0,45
3 × 185 + 1 × 50	0,27	0,37

Таблица 6.27. Технические характеристики предохранителей на напряжение 380 В

Тип	$I_{ном}, А$		Предельный отключаемый ток*, кА
	патрона предохранителя	плавкой вставки	
НПН2-60	60	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 63	10
ПН2-100	100	31,5, 40, 50, 63, 80, 100	100
ПН2-250	250	80, 100, 125, 160, 200, 250	
ПН2-400	400	200, 250, 315, 355, 400	40
ПН2-600	630	315, 400, 500, 630	25
ПП17	1000	500, 630, 800, 1000	120
ПР-2	15	6, 10, 15	0,8/8
	60	15, 20, 25, 35, 45, 60	1,8/4,5
	100	60, 80, 100	6/11
	200	100, 125, 160, 200	
	350	200, 235, 260, 300, 350	
	600	350, 430, 500, 600	13/23
	1000	600, 700, 850, 1000	15/20

\* Действующее значение периодической составляющей ожидаемого тока КЗ. Для ПР-2 данные в числителе относятся к исполнению 1 (короткие предохранители), в знаменателе — к исполнению 2 (длинные предохранители).

Таблица 6.28. Технические характеристики тепловых реле типа РТЛ магистральных пускателей МПА

$I_{ном}$ пускателя, А	Среднее значение тока теплового реле, А	Пределы регулирования тока срабатывания, А
10	0,14	0,1 – 0,17
	0,21	0,16 – 0,26
	0,32	0,24 – 0,4
	0,52	0,38 – 0,65
	0,8	0,61 – 1,0
	1,3	0,95 – 1,6
	2,0	1,5 – 2,6
	3,2	2,4 – 4,0
	5,0	3,8 – 6,0
	6,8	5,5 – 8,0
25	8,5	7,0 – 10,0
	8,5	7,0 – 10,0
	12,0	9,5 – 14,0
	16,0	13,0 – 19,0
	21,5	18,0 – 25,0
40	21,5	18,0 – 25,0
	27,5	23,0 – 32,0
	35,0	30,0 – 40,0
63	35,0	30,0 – 40,0
	44,0	38,0 – 50,0
	52,0	47,0 – 57,0
	60,0	54,0 – 63,0
	60,0	54,0 – 63,0
80	71,5	63,0 – 80,0
	90,0	75,0 – 105,0
125	110,0	95,0 – 125,0
	110,0	95,0 – 125,0
200	140,0	120,0 – 160,0
	175,0	150,0 – 200,0

Таблица 6.29. Коэффициенты\* для расчета тока срабатывания отсечки автоматических выключателей, устанавливаемых в цепях электродвигателей

Тип	Расцепитель	$k_{в}$	$k_{н}$	$k_{р}$	$k_{н}$
А3700, А3790	Полупроводниковый	1,1	1,0	1,3	1,5
					1,6
Электрон	МТЗ-1	1,1	1,4	1,35	1,6
					2,2
АВМ	Электромагнитный	1,1	1,4	1,1	1,8
					2,1
А3110, АП-50, А3700, ВА, АЕ20		1,1	1,4	1,15	1,9
А3120, А3130, А3140					1,9

Примечание. Коэффициенты:

$k_{в}$  — возврата;  $k_{н}$  — аperiodичности;  $k_{р}$  — разброса;  $k_{н}$  — надежности.

Таблица 6.30. Технические характеристики выключателей типа Электрон с полупроводниковым реле РТМ на напряжение до 660 В

Тип	Исполнение	$I_{ном}^*$ , А	$I_{ном.б}$ МТЗ, А	Уставки полупроводникового расцепителя РП					ПКС** в цепи 380 В, действующее значение, кА
				Регулируемые на шкалах РП значения					
				$I_{номМТЗ}/I_{ном.б}$	$I_{с.о}/I_{номМТЗ}$	$t_{с.о}^*$ , с	$t_{с.п}^*$ , с, при токе $6I_{номМТЗ}$	$I_{с.п}/I_{номМТЗ}$	
Э06	Стационарное и выдвигное, кроме Т*	1000	630, 800, 1000	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7, 10, 3, 5, 7				40
	Стационарное и выдвигное Т	800	630, 800	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7, 10				
	Выдвигное, кроме Т	1600	630, 1000, 1600	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7, 10, 3, 5, 7				
Э16	Стационарное, кроме Т	4000	1000, 1600, 2500, 4000	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7				45
	Выдвигное Т	1250	1000	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7				
	Стационарное, кроме Т	2000	1600, 2500	0,8, 1,0	3, 5, 7, 3, 5				
Э25	Стационарное Т	3200	1000, 1600, 2500	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7	0,25, 0,45, 0,7	4, 8, 16	1,25	50
	Выдвигное, кроме Т	2500	1600, 2500	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7				
	Стационарное, кроме Т	6300	4000	0,8, 1,0, 1,25, 3	3, 5				
Э40	Стационарное Т	5000	4000	0,8, 1,0, 1,25	3, 5				115
	Выдвигное, кроме Т	5000	2500	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7, 3, 5				
	Выдвигное Т	4000	2500, 4000	0,8, 1,0, 1,25	3, 5, 7, 3, 5				

\* Т — тропическое исполнение.

\*\* Значение ОПКС составляет 110 % указанного в таблице значения ПКС (О — однофазовая; П — предельная; К — коммутационная; С — стойкость).

\*\*\* Индекс "п" означает перегрузку.

Таблица 6.31. Технические характеристики выключателей типа Электрон с полупроводниковым реле МТЗ на напряжение до 660 В

Тип	Исполнение	$I_{ном}$ выключателя, А	$I_{номМТЗ}$ , А	Регулируемые уставки полупроводникового реле МТЗ					ПКС* в цепи 380 В, кА
				$I_{с.п}/I_{номМТЗ}$	$I_{с.о}/I_{номМТЗ}$	$t_{с.п}$ , с, при токе		$t_{с.о}$ , с	
						$I_{номМТЗ}$	$6I_{номМТЗ}$		
Э06	Стационарное, кроме Т	800	250, 400, 630, 800						60
	Стационарное и выдвигное	630	250, 400, 630	3, 5, 7, 10					
	Выдвигное, кроме Т	1600	1000, 1250, 1600	3, 5, 7					
Э16	Выдвигное Т	1250	630, 1000, 1250	3, 5, 7, 10					40
	Стационарное, кроме Т	3200	800	3, 5, 7, 10					
	Стационарное, кроме Т	2500	1000, 1250, 1600, 2000, 2500	3, 5					
Э25	Стационарное Т	2500	1000, 1250, 1600	0,8, 1,25, 2					55
	Выдвигное, кроме Т	2500	1600, 2000, 2500	100, 150, 200	4, 8, 16	0,25, 0,45, 0,7			
	Выдвигное Т	2000	1250, 1600, 2000	3, 5, 7					
Э40	Стационарное, кроме Т	6300	3200, 4000	3, 5					100
	Стационарное Т	5000	2500, 3200, 4000	3					
	Выдвигное, кроме Т	5000	2500	3, 5, 7					
Э40	Выдвигное Т	4000	3200, 4000, 5000	3, 5					160
	Стационарное, кроме Т	5000	2000, 2500	3, 5					
	Выдвигное Т	4000	3200, 4000	3, 5					

\* Значение ПКС указано дробью, в числителе — включающая способность (ударный ток), в знаменателе — наибольшая отключающая способность (действующее значение).

Таблица 6.32. Технические характеристики трехполюсных автоматических выключателей типа АЗ700 с полупроводниковым расцепителем на напряжение до 660 В

Тип	$I_{ном. выключателя}, A$	$I_{ном. БМТЗ}, A$	Уставки полупроводникового расцепителя РП					Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А	ПКС* в цепи 380 В, кА	ОПКС* в цепи 380 В, кА
			Регулируемые на шкалах РП значения							
			$I_{ном. раб.}, A$	$I_{с.о.}/I_{ном. раб.}$	$I_{с.о.}^*, C$	$I_{с.р.}, C$ при токе $I_{ном. раб.}$	$I_{с.п.}/I_{ном. раб.}$			
АЗ734С	250	200	160, 200, 250	0, 1, 0,25, 0,4	-	4, 8, 16	1,25	50	-	
	400	320	250, 320, 400							
АЗ744С	400	320	250, 320, 400	0, 1, 0,25, 0,4	-	4, 8, 16	1,25	60	-	
	630	500	400, 500, 630							
АЗ794С	250	200	160, 200, 250	0, 1, 0,25, 0,4	-	4, 8, 16	1,25	111,1	125	
	400	320	250, 320, 400							
АЗ714Б	630	500	400, 500, 630	0, 1, 0,25, 0,4	-	4, 8, 16	1,25	50,5	57	
	160	32	20, 25, 32, 40							
АЗ724Б	250	200	160, 200, 250	2, 3, 5, 7, 10	-	4, 8, 16	1,25	18	-	
	400	320	250, 320, 400							
АЗ734Б	250	200	160, 200, 250	2, 3, 5, 7, 10	-	4, 8, 16	1,25	36	-	
	400	320	250, 320, 400							
АЗ744Б	400	320	250, 320, 400	2, 3, 5, 7, 10	-	4, 8, 16	1,25	75	150	
	630	500	400, 500, 630							
АЗ794Б	250	200	160, 200, 250	2, 3, 5, 7, 10	-	4, 8, 16	1,25	100	150	
	400	320	250, 320, 400							
	630	500	400, 500, 630	2, 3, 5, 7, 10	-	4, 8, 16	1,25	50,5	68	

\* Выключатели АЗ790С при токе более 20 кА (действующее значение) отключаются без выдержки времени.

\*\* ПКС и ОПКС даны для всех выключателей (кроме АЗ790), мгновенным значением ударного тока, для АЗ790 указаны дробью, в числителе которой — наибольшая включающая способность (ударный ток), в знаменателе — наибольшая отключающая способность (действующее значение).

Таблица 6.33. Технические характеристики трехполюсных автоматических выключателей типа АЗ700 переменного тока с электромагнитными расцепителями

Тип	$I_{п.ном.}, A$	$I_{расц.п.ном.}, A$	$I_{с.о.}, A$	ПКС	ОПКС
				в цепи 380 В	в цепи 380 В
Ударный ток, кА					
<b>Выключатели на напряжение до 660 В</b>					
АЗ712Б	160	80	400	36	—
		160	630, 1000, 1600	75	125
АЗ722Б	250	250	1600, 2000, 250	80	150
АЗ732Б	400	400	2500, 3200, 4000	100	150
АЗ742Б	630	630	4000, 5000, 6300	100	150
АЗ792Б	630	630	2500, 3200, 4000, 5000, 6300	11,1	150
<b>Выключатели на напряжение до 380 В</b>					
АЗ712Ф	160	80	400	25	28
		160	630, 1000, 1600		
АЗ722Ф	250	250	1600, 2000, 2500	35	38
АЗ732Ф	630	400	2500, 3200, 4000	50	53
		630	4000, 5000, 6300		



Таблица 6.34. Технические характеристики трехполюсных автоматических выключателей типа АЗ700 переменного тока с электромагнитными расцепителями

Тип	$I_{н.ном}, А$	$I_{расц.ном}, А$	$I_{с.р}/I_{расц.ном}$	$I_{с.о}, А$	ПКС	ОПКС
					в цепи 380 В	в цепи 380 В
Выключатели на напряжение до 660 В						
АЗ716Б	160	16	1,15	630	5,5	-
		20			10	
		25			15	
		32, 40			20	
		50, 63			30	
		80			45	
		100, 125			60	
		160			75	
АЗ726Б	250	160	1,15	2500	65	150
		200, 250			75	
АЗ736Б	400	250	1,15	2500	65	150
		320		3200	100	
		400		4000		
АЗ796Н	630	250	1,15	2500	65	150
		320		3200	70	
		400		4000		
		500		5000		
		630		6300		
Выключатели на напряжение до 380 В						
АЗ716Ф	160	16	1,15	630	5,5	-
		20			10	
		25			15	
		32, 40			20	
		50, 63, 80			25	
АЗ726Ф	250	160, 200, 250	1,15	2500	35	-
		100, 125, 160			38	
АЗ736Ф	630	250	1,15	2500	50	53
		320		3200		
		400		4000		
		500		5000		
		630		6300		

Таблица 6.35. Технические характеристики выключателей типов ВА53, ВА54, ВД55, ВА57 переменного тока на напряжение до 660 В

Тип	$I_{ном}$ выключателя, А	Регулируемые уставки полупроводникового расцепителя			$I_{с.р.с.}$ при токе $I_{расц.ном}$	$I_{с.о.с}$	$I_{с.о}/I_{расц.ном}$	$I_{с.о}/I_{расц.ном}$ при однофазных КЗ	Ток срабатывания третьей ступени защиты $I_{с.мгн}, КА$	ПКС* в цепи 380 В, КА	ОПКС* в цепи 380 В, КА
		$I_{расц.ном}/I_{н.ном}$	$I_{с.о}/I_{расц.ном}$	$I_{с.о}/I_{расц.ном}$							
ВА53-37	160, 250, 400	0,63, 0,8, 1,0	2, 3, 5, 7, 10**	-	4, 8, 16	1,25	0,5 + 1	-	47,5	53	
ВА53-39	160, 250, 400, 630								55	60	
ВА53-41	1000								135	140	
ВА53-43	1600								135	140	
ВА54-37	160, 250, 400								87	-	
ВА54-39	400, 500, 630								100	-	
ВА54-41	1000								150	160	
ВА55-37	160, 250, 400								32,5	38	
ВА55-39	160, 250, 400, 630								47,5	53	
ВА55-41	1000								55	60	
ВА55-43	1600								80	85	
ВА75-45	2500								60	65	
ВА75-47	2500	70	75								
	4000	45									

\* Действующее значение тока.

\*\* Ток срабатывания электромагнитного расцепителя равен 120 % наибольшей уставки отсечки полупроводникового расцепителя.

Таблица 6.36. Технические характеристики трехполюсных автоматических выключателей типов ВА51 и ВА52 напряжением до 660 В ( $I_{\text{в.ном}} = 250 + 630$  А)

Тип	$I_{\text{в.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{расц.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{с.о}}/I_{\text{расц.ном}}$	$I_{\text{с.о}}$ для исполнения без тепловых расцепителей, А	ПКС в цепи 380 В, действующее значение**, кА		ОПКС в цепи 380 В, действующее значение, кА
					$I_{\text{расц.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{с.о}}/I_{\text{расц.ном}}$	
ВА51-35	250	100	12	1000, 1250, 1600, 2000, 2500	12/12	14	14
		125			15/15	18	
		160, 200, 250			18/15	22	
ВА51-37	400	250, 320, 400	10	1600, 2000, 2500, 3200, 4000	25/25	30	30
		400, 500, 630			35/335	40	
ВА51-39	250	100	12	1000, 1250, 1600, 2000, 2500	30/30	32	32
		125			40/30	42	
		160, 200, 250			40/30	45	
ВА51-37	400	250, 320, 400	10	1600, 2000, 2500, 3200, 4000	35/30	40	40
		400			40/40	45	
ВА51-39	630	250, 320	10	2500, 3200, 4000, 5000, 6300	50/40	55	55
		400, 630			55/40	60	

\* Кратность тока срабатывания тепловых расцепителей — 1,25.

\*\* В числителе — в цикле О — ВО, в знаменателе — в цикле О — ВО — ВО.

Таблица 6.37. Технические характеристики трехполюсных автоматических выключателей ВА51 и ВА52 напряжением до 660 В ( $I_{\text{в.ном}} = 25 + 160$  А)

Тип	$I_{\text{в.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{расц.ном}}, \text{А}$	$I_{\text{с.о}}/I_{\text{расц.ном}}$	$I_{\text{с.о}}/I_{\text{расц.ном}}$	ПКС* в цепи 380 В, действующее значение**, кА		ОПКС в цепи 380 В, действующее значение, кА			
					ВА51	ВА52	ВА51	ВА52		
ВА51-25	25	6,3, 8,0	1,35	2, 2,5, 3,8**	5	—	5	—		
		10, 12,5							5	13
		16, 20, 25							6	16
ВА51Г25	25	0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,25, 1,6	1,2	1,5	5	—	5	—		
		2,0, 2,5, 3,15,							3	—
		4,0, 5,0, 6,3, 8,0							1,5	—
		10, 12,5							—	—
		16, 20, 25							4,5	13
		16							5	13
ВА51-31, ВА52-31	100	20, 25	1,35	3, 7, 10	6	—	6	30		
		31,5, 40							6	20
		50, 63							6	28
ВА51Г31, ВА52Г31	100	16, 20, 25	1,2	14	6	—	6	30		
		31,5, 40							3,6	13
		50, 63							6	16
		80, 100							6	20
		16, 20, 25							6	28
		31,5, 40							6	30
ВА51-33, ВА52-33	160	80, 100	1,25	12,5	15	—	15	38		
		125, 160							38	38
		80, 100							30	38
ВА51Г33, ВА52Г33	160	125, 160	1,2	12,5	15	—	15	38		
		160							38	38

\* Значения ПКС указаны в цикле О — ВО. В цикле О — ВО значения ПКС могут быть меньше и принимаются по каталожным данным. Все значения ориентировочные и будут уточняться по результатам испытаний.

\*\* Для выключателей со степенью защиты IP54 ПКС = 2,0 кА.

Таблица 6.38. Технические характеристики автоматических выключателей типов АЕ20 и АЕ20М на напряжение до 600 В

Тип	$I_{н.ном}$ , А	Вид расцепителя	$I_{расц.ном}$ , А	$I_{с.н}/I_{расц.ном}$	Уставка или пределы регулирования, $I_{с.н}/I_{расц.ном}$
АЕ2023	16	Электромагнитный	0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1, 1,25, 1,6, 2, 2,5, 3,15, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5, 16	12	—
АЕ2026		Комбинированный	—		0,9 – 1,15
АЕ2043	63	Электромагнитный	10, 12, 5, 16, 20, 25, 31, 5, 40, 50, 63	12	—
АЕ2044		Комбинированный	—		1,15
АЕ2046*		Комбинированный	—		0,9 – 1,15**
АЕ2043М	63	Электромагнитный	0,6, 0,8, 1, 1,25, 1,6, 2, 2,5, 3,15, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63	12	—
АЕ2046М*		Комбинированный	—		0,9 – 1,15**
АЕ2053М	100	Электромагнитный	10, 12, 5, 16, 20, 25, 31, 5, 40, 50, 63, 80, 100	12	—
АЕ2056М*		Комбинированный	—		1,15
АЕ2063	160	Электромагнитный	16, 20, 25, 31, 5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	12	—
АЕ2066		Комбинированный	—		1,15

\* При наличии независимого расцепителя не устанавливается электромагнитный расцепитель в одном из полюсов.

\*\* Тепловой расцепитель имеет температурную компенсацию. Возможно исполнение без регулирования,  $I_{с.н} = 1,15I_{расц.ном}$

Таблица 6.39. Предельная коммутационная способность выключателей типа АЕ20 и АЕ20М

Тип	Вид расцепителя	$I_{расц.ном}$	ПКС*, действующее значение, кА, при напряжении	
			220 В*	380 В
			АЕ2020	Комбинированный
АЕ2020	Электромагнитный	0,3 – 1,6	—	0,7 (4)
	Комбинированный или электромагнитный	2 – 6	—	1 (4)
АЕ2040	Комбинированный или электромагнитный	8 – 16	—	2 (4)
		10 – 12,5	2 (6)	2 (6)
		16 – 25	3 (6)	3 (6)
АЕ2040М	Комбинированный или электромагнитный	31,5 – 63	6 (7)	6 (7)
		0,6 – 1,6	—	5*** (6,5)
		2 – 12,5	—	1,5 (6,5)
АЕ2050М	Комбинированный или электромагнитный	16 – 63	—	4,5*** (6,5)
		10 – 12,5	—	2,4 (6)
		16 – 25	—	3,5 (6)
АЕ2060	Комбинированный или электромагнитный	31,5 – 100	—	6*** (7)
		16 – 25	—	3,5 (6)
		31,5 – 40	—	6 (15)
		50 – 100	—	9*** (15)
		125 – 160	—	11,5*** (17)

\* Для однополюсных выключателей.

\*\* В скобках указано значение ОПКС.

\*\*\* Для пыле- и брызгозащищенных выключателей (со степенью защиты IP54) ПКС меньше указанной, см. каталожные данные.

Таблица 6.40. Двухобмоточные трансформаторы

Тип	Номинальная мощность, кВ·А	Сочетание напряжений, кВ			Потери, кВт		$U_{кш}$ , %	$I_{кш}$ , %	Размеры, м		
		ВН	НН	НН	$\Delta P_{кш}$	$\Delta P_{кш}$			l	b	h
ТМ-25/10 У1	25	6, 10	0,4	0,4	0,13	0,6	4,5	3,2	1,12	0,46	1,22
ТМ-40/10 У1	40	6, 10	0,4	0,4	0,19	0,88	4,5	3,0	1,12	0,48	1,27
ТМ-63/10 У1	63	6, 10	0,4	0,4	0,26	1,28	4,5	2,0	1,12	0,56	1,40
ТМ-100/10 У1	100	6, 10	0,4	0,4	0,36	1,97	4,5	2,6	1,20	0,80	1,47
ТМ-160/10 У1	160	6, 10	0,4, 0,69	0,4, 0,69	0,56	2,65	4,5	2,4	1,21	0,92	1,58
ТМ-250/10 У1	250	6, 10	0,4, 0,69	0,4, 0,69	0,82	3,70	4,5	2,3	1,26	1,04	1,72
ТМ-400/10 У1	400	6, 10	0,4, 0,69	0,4, 0,69	1,05	5,50	4,5	2,1	1,40	1,08	1,90
ТМ-630/10 У1	630	6, 10	0,4, 0,69	0,4, 0,69	1,56	7,60	5,5	2,0	1,75	1,27	2,15
ТМ-1000/10 У1	1000	6, 10	0,4 – 10,5	0,4 – 10,5	2,45	12,2	5,5	1,4	2,70	1,75	3,00
ТМС-1000/10 У1	1000	3,15 – 10,5	0,4 – 0,525	0,4 – 0,525	2,75	12,2	8,0	1,5	2,70	1,77	3,15
ТМ-1600/10 У1	1600	6, 10	0,4 – 6,3	0,4 – 6,3	3,30	18,0	5,5	1,3	2,45	2,30	3,40
ТМ-2500/10 У1	2500	6, 10	0,4 – 10,5	0,4 – 10,5	4,60	26,0	5,5	1,0	3,50	2,26	3,60
ТМ-4000/10 У1	4000	6, 10	3,15, 6,3	3,15, 6,3	6,40	33,5	6,5	0,9	3,90	3,65	3,90
ТМ-6300/10 У1	6300	10	3,15 – 10,5	3,15 – 10,5	9,00	46,5	6,5	0,8	4,30	3,70	4,05

Трансформаторы трехфазные мощностью от 25 до 25 000 кВ·А, напряжением 6 – 10 кВ без регулирования напряжения

Тип	Номинальная мощность, кВт · А	Сочетание напряжений, кВ		Потери, кВт		$U_{\text{кш}}, \%$	$I_{\text{кш}}, \%$	Размеры, м		
		ВН	НН	$\Delta P_{\text{кш}}$	$\Delta P_{\text{кш}}$			l	b	h
<i>с регулированием напряжения под нагрузкой: РПН на стороне ВН <math>\pm 12\% \pm 8</math> ступеней</i>										
ТРДНС-25000/10-73У1	25000	10,5	6,3	25	115	9,5	0,5	6,22	4,3	5,34
<i>С переключением без возбуждения: ПВБ на стороне ВН <math>\pm 2 \times 2,5\%</math> Масляные</i>										
ТМЗ-400/10 У1	400	6, 10	0,4	1,08	5,50	5,5	4,5	1,72	1,1	1,58
ТМЗ-630/10 У1	630	6, 10	0,4	1,68	7,60	6,5	3,2	1,93	1,10	1,83
ТМЗ-1000/10 У1	1000	6, 10	0,4, 0,69	2,45	11,0	5,5	1,4	2,28	1,25	2,07
ТМЗ-1600/10 У1	1600	6, 10	0,4, 0,69	3,30	16,5	5,5	1,3	2,51	1,34	2,58
ТМЗ-2500/10 У1	2500	6, 10	0,4, 0,69	4,60	24,0	5,3	1,0	3,50	2,30	3,50
<i>с несгоревшим заполнением</i>										
ТНЗ-630/10 У1	630	6, 10	0,4	1,68	7,6	5,5	3,2	1,90	1,10	1,80
ТНЗ-1600/10 У1	1600	6, 10	0,4, 0,69	3,30	16,5	5,5	1,3	2,50	1,40	2,60
ТНЗ-2500/10 У1	2500	6, 10	0,4, 0,69	4,60	24,0	5,5	1,0	3,50	2,30	3,50

**Примечание.** Значения букв и цифр в структуре условного обозначения трансформатора двухобмоточных трехфазных: первая буква Т и О — трехфазное и однофазное исполнение; вторая буква или сочетание букв М, Д, ДЦ, Ц, Н — исполнение и изоляции активной части, т.е. М, Д, Д, Ц — изоляция масляная, Н — изоляция негорючий заполнитель; исполнение системы охлаждения активной части: М(Н) — естественная циркуляция заполнителя (трансформаторного масла или негорючей жидкости) и теплоотдача через стенки бака трансформатора, а также через трубчатые радиаторы с естественной циркуляцией воздуха; Д — естественная циркуляция масла и принудительная воздушная ДЦ — принудительная циркуляция масла и воздуха; Ц — принудительная циркуляция масла и охлаждающей воды; буква перед обозначением системы охлаждения: Р — с расширенной обмоткой НН; З — трансформатор без расширителя, защищенный азотной подушкой, герметичный; Н — с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН); С — для собственных нужд электростанций; числитель дроби — номинальная мощность, кВт; знаменатель — номинальное напряжение, кВ; цифра после дроби — год разработки; VI — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

## Список литературы

1. **Инструктивные** и информационные материалы по проектированию электроустановок / Тяжпромэлектропроект. М., 1996. № 5.
2. **Правила устройства электроустановок.** 7-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001.
3. **Подстанции трансформаторные комплектные** мощностью от 630 до 2500 кВ · А напряжением 6 — 10 кВ: Каталог / Информэлектро. М., 1985.
4. **Комплектные трансформаторные подстанции типа КТП-400:** Каталог / Информэлектро. М., 1983.
5. **ГОСТ 28249-93.** Короткие замыкания в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: Изд-во стандартов, 1994.
6. **Беляев А. В.** Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. Л.: Энергоатомиздат. 1988.
7. **Выключатели автоматические** серии “Электрон”: Каталог / Информэлектро. М., 1988.
8. **Выключатели автоматические** типов ВА53-43, ВА55-43, ВА56-43: Каталог / Информэлектро. М., 1988.
9. **Выключатели автоматические** типов ВА51-25 и ВА51Г-25: Каталог / Информэлектро. М., 1988.
10. **Выключатели автоматические** серии А3700: Каталог / Информэлектро. М., 1981.
11. **Выключатели автоматические** серии АЕ20 и АЕ20М (модернизированные): Каталог / Информэлектро. М., 1987.
12. **Киреева Э. А.** Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения. — М.: Энергоатомиздат. 1998.
13. **Киреева Э. А., Григорьев В. И., Миронов В. А., Чохонелидзе А. Н.** Электроснабжение и электрооборудование цехов. — М.: Энергоатомиздат, 2003.
14. **Киреева Э. А.** Повышение надежности, экономичности и безопасности систем цехового электроснабжения. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2002.
15. **Киреева Э. А.** Рациональное использование электроэнергии в системах промышленного электроснабжения. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2000.
16. **Киреева Э. А., Григорьев В. И.** Справочные материалы по электрооборудованию систем электроснабжения промышленных предприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2002.
17. **Быстрицкий Г. Ф., Кудрин Б. И.** Силовые трансформаторы промышленных предприятий. — М.: Изд-во МЭИ, 2001.

В брошюре Колюховой Е. А. **Определение потерь мощности по потерям напряжения в электрических сетях промпредприятий** — выпуск 8(56), 2003 на стр. 30 — 32 в ряде формул автором допущены опечатки. Формулы, которых это коснулось, должны читаться следующим образом.

$$\sum_{i=1}^n (n-i)^2 = \frac{n(n-1)(2n-1)}{6}.$$

$$\Delta P_{\text{ТШ}} = \frac{n^2 p_i^2 (1 + \operatorname{tg} \varphi^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} \left[ R_{\tau} + \frac{R_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right) \right], \quad (3.2)$$

$$\Delta Q_{\text{ТШ}} = \frac{n^2 p_i^2 (1 + \operatorname{tg} \varphi^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} \left[ X_{\tau} + \frac{X_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right) \right]. \quad (3.3)$$

$$\Delta P_{\text{ТШ}^*} = \frac{\Delta P_{\text{ТШ}}}{n p_i} = \frac{n p_i (1 + \operatorname{tg} \varphi^2)}{U_{\text{НОМ}}^2} \left[ R_{\tau} + \frac{r_{0\text{ш}} L_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right) \right]. \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta P_{*}}{\Delta U_{*}} = (1 + \operatorname{tg} \varphi^2) \frac{R_{\tau} + \frac{R_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right)}{R_{\tau} + \frac{n-1}{2n} R_{\text{ш}} + \operatorname{tg} \varphi \left( X_{\tau} + \frac{n-1}{2n} X_{\text{ш}} \right)}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\Delta P_{*}}{\Delta U_{*}} = (1 + \operatorname{tg} \varphi^2) \frac{\frac{R_{\tau}}{r_{0\text{ш}}} + \frac{L_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right)}{\frac{R_{\tau}}{r_{0\text{ш}}} + \frac{n-1}{2n} L_{\text{ш}} + \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{X_{\tau}}{r_{0\text{ш}}} + \frac{n-1}{2n} \frac{X_{0\text{ш}}}{r_{0\text{ш}}} L_{\text{ш}} \right)}. \quad (3.9)$$

$$\Delta n_{\text{ТШ}^*} = (1 + \operatorname{tg} \varphi^2) \left[ \frac{R_{\tau}}{r_{0\text{ш}}} + \frac{L_{\text{ш}}}{6} \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right) \right]. \quad (3.10)$$

$$L_{\text{экв.п}} = \frac{R_{\tau}}{r_{0\text{ш}}} + \frac{L_{\text{ш}}}{6} \left\{ \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right) \right\}. \quad (3.11)$$

Нелинейный характер зависимостей  $L_{\text{экв.п}} - f(n)$  придает выражение  $\left( 1 - \frac{1}{n} \right) \left( 2 - \frac{1}{n} \right)$ .

## Содержание

Предисловие . . . . .	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Цеховые трансформаторные подстанции . . . . .	4
1.1. Основные характеристики цеховых трансформаторных подстанций . . . . .	4
1.2. Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов . . . . .	7
1.3. Выбор трансформаторов для питания сварочных нагрузок . . . . .	12
1.4. Компоновка и размещение трансформаторных подстанций . . . . .	14
1.5. Сухие трансформаторы и трансформаторы с негорючим жидким наполнителем . . . . .	21
ГЛАВА ВТОРАЯ. Внутрицеховое распределение электроэнергии . . . . .	23
2.1. Принципы построения цеховой сети . . . . .	23
2.2. Схемы питания силовых потребителей . . . . .	24
2.3. Осветительные сети . . . . .	31
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Выбор и проверка элементов системы электроснабжения . . . . .	38
3.1. Выбор сечения проводов и жил кабелей . . . . .	38
3.2. Выбор комплектных шинпроводов . . . . .	39
3.3. Выбор распределительных шкафов и пунктов . . . . .	41
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Расчет токов короткого замыкания . . . . .	43
4.1. Особенности расчета токов короткого замыкания в сетях напряжением до 1 кВ . . . . .	43
4.2. Расчет токов трехфазного короткого замыкания . . . . .	44
4.3. Пример расчета токов трехфазного КЗ . . . . .	49
4.4. Расчет токов однофазного короткого замыкания . . . . .	56
ГЛАВА ПЯТАЯ. Выбор и проверка защитной аппаратуры . . . . .	59
5.1. Общие положения . . . . .	59
5.2. Защита плавкими предохранителями . . . . .	60
5.3. Защита автоматическими выключателями . . . . .	64
5.4. Пример выбора защитной аппаратуры для участка схемы электроснабжения цеха . . . . .	78
ГЛАВА ШЕСТАЯ. Справочные материалы по цеховому электрооборудованию . . . . .	89
Список литературы . . . . .	117

### **Библиотечка электротехника**

*Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"*

**КИРЕЕВА ЭЛЬВИРА АЛЕКСАНДРОВНА  
ОРЛОВ ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ  
СТАРКОВА ЛАРИСА ЕВГЕНЬЕВНА**

**Электроснабжение цехов промышленных предприятий**

#### **АДРЕС РЕДАКЦИИ:**

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23  
Телефоны: (095) 275-19-06, тел. 275-00-23 доб. 22-47; факс: 234-74-21

---

Редакторы: Л. Л. Жланова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Корректор З. Б. Драновская

---

Сдано в набор 24.11.2003 г. Подписано в печать 15.12.2003 г.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.

Леч. л. 7,5. Тираж 1200 экз. Заказ БЭТ/12(60)-2003

Макет выполнен издательством "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства "Фолиум": 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

## **Журнал "Энергетика за рубежом"**

— приложение к журналу "Энергетик"

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу "Энергетик" — **"Энергетика за рубежом"**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал "Энергетика за рубежом" знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики, такими, как:

- *развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;*
- *особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;*
- *опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;*
- *модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;*
- *распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;*
- *энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.*

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **"ПРЕССА РОССИИ"**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

### **Индексы журнала "Энергетика за рубежом"**

— приложения к журналу "Энергетик"

**87261** — для предприятий и организаций;

**87260** — для индивидуальных подписчиков.

## Об авторах

*Киреева*



**Эльвира Александровна  
Киреева —**

*канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
электрообеспечения  
промышленных  
предприятий  
Московского  
энергетического  
института,  
отличник энергетики  
и электрификаций.  
Имеет более 50 печатных  
работ.*



**Владимир  
Владимирович Орлов —**

*канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
электрообеспечения  
Вологодского  
Государственного  
технического  
университета,  
специалист в области  
электрических  
аппаратов.  
Имеет более 40 печатных  
работ.*



**Лариса Евгеньевна  
Старкова —**

*канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
электротехники  
Вологодского  
Государственного  
технического  
университета,  
специалист в области  
электрооборудования  
и электрообеспечения.  
Имеет два патента и  
авторское свидетельство  
на изобретение и более  
60 печатных работ.*

Технически и экономически обоснованный выбор  
цеховых электрических сетей и последующая их  
рациональная эксплуатация обеспечивают надежную  
и безопасную работу всего  
промышленного предприятия