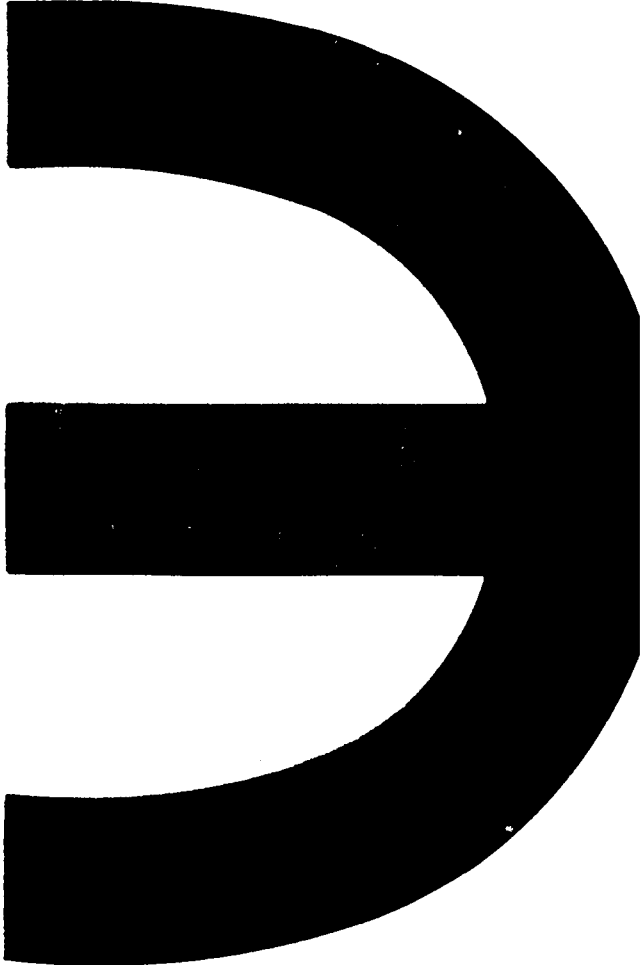




**БИБЛИОТЕЧКА
СЕЛЬСКОГО
ЭЛЕКТРИКА**

С. Ф. СИМОНОВСКИЙ

**ЗАЩИТА
СЕЛЬСКИХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ
ОТ КОРОТКИХ
ЗАМЫКАНИЙ
И ПЕРЕГРУЗОК**





БИБЛИОТЕЧКА СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

С. Ф. СИМОНОВСКИЙ

ЗАЩИТА
СЕЛЬСКИХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ
ОТ КОРОТКИХ
ЗАМЫКАНИЙ
И ПЕРЕГРУЗОК

1004706



МОСКВА «КОЛОС» 1983

Коммунистическая партия и Советское правительство последовательно и целеустремленно претворяют в жизнь заветы В. И. Ленина об электрификации сельского хозяйства. Доля электроустановок в общей структуре энергетических мощностей сельского хозяйства превышает 25% и продолжает увеличиваться. Потребление электроэнергии на нужды сельского хозяйства в конце десятой пятилетки достигло 111 млрд. кВт·ч. Возросла электровооруженность труда. В связи с развитием электрификации сельского хозяйства возросла зависимость его эффективности от надежности и бесперебойности электроснабжения, важным звеном которого являются электрические сети напряжением 380/220 В.

«Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» предусматривается к концу одиннадцатой пятилетки повысить электровооруженность труда в сельском хозяйстве в 1,4...1,5 раза. Для решения этой важной задачи будут сооружены сотни тысяч потребительских подстанций, построены и реконструированы сотни тысяч километров сетей напряжением 380/220 В.

Из-за целого ряда особенностей сельских электрических сетей напряжением 380/220 В, как наружных, так и внутренних, повреждаемость их довольно высока, причем одним из наиболее частых видов повреждений является короткое замыкание, которое может стать причиной пожара, гибели людей, животных. К нежелательным последствиям приводят и перегрузки электрических сетей.

Отечественная электропромышленность выпускает различные аппараты для защиты этих сетей от коротких замыканий и перегрузок. Правильный расчет и выбор защиты от коротких замыканий и перегрузок сетей напряжением 380/220 В сельскохозяйственного назначения

позволяет предотвратить несчастные случаи, исключить отказы или ложную работу защит, что в конечном счете уменьшает материальный ущерб сельскохозяйственному производству от аварийных отключений.

Продовольственная программа, одобренная на майском (1982 г.) Пленуме ЦК КПСС, ставит задачу довести отпуск электроэнергии сельскому хозяйству в 1990 году до 210...235 млрд. кВт·ч. Для этого потребуются поставить сельскому хозяйству миллионы электродвигателей, магнитных пускателей, автоматических выключателей и другой электрической аппаратуры.

Улучшение качества обслуживания электрических машин, аппаратов и сетей, повышение культуры эксплуатации их значительно сократит аварийность. Для этого сельские электрики должны постоянно повышать свою квалификацию.

Цель настоящей книги — познакомить сельских электриков с устройством и принципом действия защитных аппаратов, их характеристиками, способами расчета токов коротких замыканий и методами выбора аппаратов защиты от коротких замыканий и перегрузок.

Специалисты сельской электрификации, ученые, предприятия электропромышленности ведут большую работу по совершенствованию существующих и разработке новых типов защитных устройств от коротких замыканий и перегрузок. Поэтому в ближайшие годы ожидается появление новых аппаратов защиты. В настоящей книге описаны конструкции наиболее совершенных аппаратов защиты, выпускаемых нашей промышленностью.

1. ОСОБЕННОСТИ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В, ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПЕРЕГРУЗОК

1.1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Наружные электрические сети напряжением 380/220 В сельскохозяйственного назначения — это чаще всего воздушные и реже кабельные. Вследствие большой рассредоточенности по территории объектов, к которым должна подаваться электроэнергия, воздушные линии (ВЛ) в сельской местности довольно протяженны и сильно разветвлены. В целях рационального использования проводниковых материалов ответвления от магистрали к маломощным потребителям выполняют проводами малых сечений. Из-за этих особенностей трудно защитить такие сети от коротких замыканий (к. з.), так как нужно обеспечить необходимую чувствительность и селективность защит. Покажем это на конкретной схеме.

На рисунке 1.1 приведена схема типичной для сельской местности ВЛ 380 В. С точки зрения осуществления защиты этой линии от к. з. идеальным был бы случай, при котором одно защитное устройство, расположенное в начале линии (точка *a*), защитило бы всю линию. Но это часто невозможно сделать и вот по какой причине. На головном участке магистрали *ab* в нормальном режиме при максимальной нагрузке протекает рабочий максимальный ток $I_{р. \max}$. Для исключения ложных срабатываний защита должна приходить в действие при токах, превышающих $I_{р. \max}$. Вместе с тем она должна срабатывать, если произойдет к. з. в любой точке рассматриваемой ВЛ. Нередки случаи, когда при к. з., особенно однофазных, в наиболее удаленных точках, например в точке *e*, ток на магистральном участке оказывается меньше тока, при котором защита срабатывает. В таких случаях защита не обладает необхо-

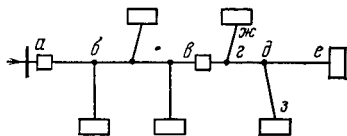


Рис. 1. 1. Схема ВЛ напряжением 380 В.

димой чувствительностью. Чтобы защитить всю линию, кроме защитного устройства в начале ее (точка a), размещают в удобном для этих целей месте (например, в точке b) еще одно защитное устройство. На этом участке линии рабочий ток гораздо меньше, чем $I_{p. \max}$, и это позволяет выбрать дополнительное устройство на значительно меньший ток срабатывания, обеспечив надежную работу дополнительной защиты при к. з. на участках be , gj , $dз$. Таким образом, благодаря увеличению числа защитных устройств удается защитить всю линию: комплект a защищает участки между точками a и b , комплект b — участки за точкой b .

Под селективностью понимают такое действие защиты, при котором к. з. отключается ближайшей к нему защитой. Когда на линии имеется 2...3 комплекта последовательно включенных защит, то необходимо проверять селективность их работы, чтобы исключить неизбежное действие их. Нарушение селективности защит приводит к необоснованным перерывам в электроснабжении и обусловлено главным образом тем, что почти все типы защитных устройств, используемых в сетях 380/220 В, имеют разброс в параметрах срабатывания. Покажем это на примере.

Пусть, например, защита линии, схема которой приведена на рисунке 1.1, выполнена предохранителями типа ПН2, причем в точке a установлены предохранители с плавкой вставкой на 50 А, а в точке b — на 40 А. При к. з. в точке g , когда ток к. з. равен, скажем, 500 А, предохранители a срабатывают за $0,05 \pm 0,025$ с, а предохранители b — за $0,04 \pm 0,02$ с. То есть возможна ситуация (например при времени срабатывания предохранителей a и b соответственно $0,05 - 0,025$ с и $0,04 + 0,02$ с), при которой предохранители a , сработав раньше предохранителей b , отключат всю линию, тогда как при селективной работе к. з. в точке g должно отключаться защитой b . Очевидно, что неселективная работа защит приводит к необоснованным перерывам в электроснабжении тех потребителей, которые подключены к неповрежденным участкам линии (в нашем примере — к участку ab).

1.2. ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Сеть напряжением 380/220 В обычно получает питание от трансформаторов с соединением обмоток Y/Υ или Y/Υ , нейтраль обмотки низшего напряжения кото-

рых заземлена на подстанции. Нулевой провод соединяет нейтраль трансформатора с электроприемниками. Этот провод используют для получения фазного напряжения 220 В или соединения металлических корпусов некоторых приемников с землей. Для более надежного соединения с землей, а также для защиты от перенапряжений грозового характера нулевой провод повторно заземляют. Если сеть 380/220 В питается от генератора, то его нейтраль тоже заземляют, а нулевой провод также имеет повторные заземления.

Коротким замыканием называется аварийный режим, образующийся вследствие нарушения изоляции токоведущих частей. В месте перекрытия или разрушения изоляции происходит соединение фаз сети между собой, на нулевой провод или на землю.

Сеть, у которой нейтраль питающего источника соединяется с землей, называют сетью с глухим заземлением нейтрали. В ней возможны междуфазные и однофазные к. з. К междуфазным к. з. относятся замыкания между всеми тремя фазами (трехфазное к. з.) или между любыми двумя фазами (двухфазное к. з.).

Режим однофазного к. з. создается, если нарушается изоляция между какой-нибудь фазой и землей или нулевым проводом. В сети с глухим заземлением нейтрали возможен еще один вид к. з. — двухфазное к. з. на землю. Этот вид к. з. в настоящей книге не рассматривается, так как это не требуется для расчета и выбора защит от к. з.

Наиболее часто происходят однофазные к. з., они составляют примерно 65% общего числа замыканий. Для остальных видов к. з. этот показатель распределяется так: двухфазные на землю — 20%, двухфазные — 10%, трехфазные — 5%. Трехфазное к. з. является симметричным, а все остальные виды — несимметричными.

Короткое замыкание происходит из-за нарушения изоляции между фазами или между фазой и землей. К нарушениям изоляции приводит ряд причин. Прежде всего — это естественное старение изоляции, в процессе которого под воздействием многих факторов (температуры, агрессивной среды и т. д.) изоляция постепенно теряет свои свойства. Старение изоляции может происходить ускоренными темпами, если она находится под воздействием таких условий, на которые она не рассчитана. Например, если сечение изолированного проводника выбрано заниженным, то под воздействием повышенных

для него токовых нагрузок проводник перегревается до сверхдопустимой для данной изоляции температуры, и в результате изоляция этого проводника быстро теряет свои первоначальные качества.

Внутренние электрические проводки напряжением 380/220 В многих сельскохозяйственных производственных помещений (фермы, кормоцехи) находятся в условиях агрессивной для изоляции проводников среды. Поэтому для таких помещений электропроводки следует выполнять проводами с изоляцией, рассчитанной на воздействие соответствующей агрессивной среды. Учет условий окружающей среды особенно важен при выборе электродвигателей. Наша электропромышленность изготавливает несколько разновидностей электродвигателей по климатическому исполнению и категориям размещения, в том числе и для условий сельскохозяйственного производства [2].

Неправильная эксплуатация, неправильный выбор электродвигателей, при котором не учитываются климатическое исполнение и категория их размещения, приводят к быстрому старению изоляции электродвигателя, ее порче и последующему к. з., то есть электродвигатель преждевременно выходит из строя, тогда как при нормальной эксплуатации средний срок его службы составляет примерно 15 лет.

Одной из основных причин возникновения к. з. в сети напряжением 380/220 В являются перенапряжения грозового характера. Эти перенапряжения наводятся на проводах ВЛ при грозе. Значение возникших перенапряжений может достигать десятков, а иногда и сотен киловольт. Если возникшая волна перенапряжения имеет очень высокий потенциал, достаточный для пробоя изоляции, то в месте ее возникновения происходит к. з. Точнее, волна перенапряжения через место пробоя уходит в землю, а вслед за ней под действием напряжения ВЛ возникает электрическая дуга тока промышленной частоты. Когда же потенциал волны меньше пробивного напряжения изоляции ВЛ, то она распространяется по проводам вдоль линии, претерпевая преломления и отражения на ответвлениях. Доходя до места, где изоляция ослаблена, волна пробивает ее, то есть опять-таки создает к. з.

Несмотря на ряд мероприятий, используемых для ограничения потенциала волны перенапряжения, которая

может проникнуть с ВЛ 380 В во внутренние проводки, значение этого потенциала все же может достигать порядка 2...3 кВ. Это опасно для людей, животных, ряда электробытовых приборов и изоляции внутренних проводок. Очевидно, что под воздействием такого перенапряжения ослабленная, например, естественным старением изоляция внутренних проводок может пробиваться, что приводит к к. з.

В сельской местности часто ветви деревьев касаются проводов ВЛ 380 В или находятся от них в непосредственной близости. При сильном ветре от беспорядочных толчков этих веток провода могут схлестываться, что вызывает к. з. Возможны и другие причины, вызывающие появление к. з. в сети напряжением 380/220 В: обрывы провода с последующим касанием земли, ошибки персонала и т. д.

Многообразны последствия к. з. Резкое увеличение в короткозамкнутой цепи тока соответственно приводит к возрастанию в квадратичной зависимости термического и динамического действия его. Так, например, если ток к. з. по сравнению с нормальным режимом возрос в 10 раз, то электродинамические усилия между токоведущими частями и выделение теплоты в них увеличились в 100 раз. В связи с тем, что в сетях напряжением 380/220 В сельскохозяйственного назначения кратность токов к. з. сравнительно невелика, все электрические аппараты по условно динамической стойкости их к действию токов к. з. имеют достаточно большой запас. Иначе обстоит дело с термической стойкостью электрических аппаратов.

В сельских сетях напряжением 380/220 В используются чаще всего провода малых сечений, то есть с достаточно большим активным сопротивлением. Это, с одной стороны, снижает кратность токов к. з., а с другой — увеличивает время его отключения, так как защитные аппараты имеют обратозависимую характеристику времени срабатывания от тока. В итоге, если учесть, что выделение теплоты в некотором проводнике пропорционально квадрату тока, активному сопротивлению проводника и времени отключения тока к. з., то окажется, что перегрев проводников может достигать опасных пределов, и это надо учитывать при выборе защит от к. з.

Кроме того, к. з. могут нарушать устойчивую работу электродвигателей. При к. з. резко снижается напряжение. Например, в месте возникновения трехфазного к. з.

все фазные и линейные напряжения равны нулю. Снижается при этом напряжение и на шинах питающего источника, а значит, и на зажимах всех электродвигателей, питающихся от него. Поскольку снижения напряжения при к. з. происходят достаточно быстро, то их называют колебаниями напряжения *. Таким образом, к. з. приводят к колебаниям напряжения на зажимах всех электроприемников, в том числе и всех электродвигателей, питающихся от данного источника.

Если снижение напряжения при к. з. оказалось глубоким, а время отключения к. з. достаточно большим, то те электродвигатели, которые присоединены не через магнитные пускатели, останутся подключенными к сети и часть из них к моменту отключения к. з. может успеть затормозиться до полной остановки. После отключения к. з. ближайшей защитой напряжение на шинах источника восстановится и начнется групповой запуск электродвигателей, во время которого все оставшиеся в подключенном состоянии электродвигатели будут потреблять от источника пусковые или близкие к пусковым токи.

Если сеть запроектирована неправильно, то при групповом запуске от протекания больших пусковых токов создаются большие потери напряжения. Вследствие этого все или некоторые электродвигатели не смогут развить необходимый пусковой момент и развернуться до номинальной частоты вращения, то есть они окажутся в аварийном состоянии. Правильно выполненная тепловая защита электродвигателя или защита от перегрузки должна в таком режиме сработать и отключить от сети незапустившиеся электродвигатели.

Колебания напряжения, обусловленные возникающими к. з., вызывают нежелательные последствия также для осветительных и коммунально-бытовых электроприемников. При правильной работе защиты от к. з. эти последствия неопасны и проявляются, например, в погасании на непродолжительное время осветительных ламп и экранов телевизоров. Гораздо серьезнее эти по-

* В соответствии с ГОСТ 13109—67 изменения напряжения, происходящие со скоростью более одного процента в секунду, называются колебаниями напряжения. Колебания напряжения не следует смешивать с отклонениями напряжения, представляющими собой длительно существующую разность между действительным и номинальным напряжением.

следствия, если защита отказывает в действии. В этом случае все потребители, присоединенные к короткозамкнутым фазам, оказываются длительно включенными на значительно сниженное напряжение или на напряжение, близкое по своему значению к нулю. Кроме того, что эти потребители в таком режиме будут испытывать перерыв в электроснабжении, возможен выход из строя электродвигателей холодильников.

В сети напряжением 380/220 В наиболее часто происходят однофазные к. з. При этом виде к. з. ток значительно меньше, чем при двухфазных или трехфазных, поэтому трудно выполнить достаточно чувствительную защиту, реагирующую на однофазное к. з. Особенно трудно осуществить чувствительную к однофазным к. з. защиту силового трансформатора. Недостаточная чувствительность к однофазным к. з. защит, используемых до недавнего времени в комплектных трансформаторных подстанциях, послужила одной из причин сравнительно высокой аварийности потребительских трансформаторов, питающих сети напряжением 380/220 В.

Однофазные к. з. могут создавать так называемые неполнофазные режимы, которые весьма опасны для электродвигателей. Неполнофазный режим образуется, например, при перегорании предохранителя в одной фазе, обрыве одного провода или нарушении контакта одного из полюсов магнитного пускателя или автомата. Чаще всего неполнофазный режим создается после перегорания в одной фазе предохранителя, отключившего однофазное к. з. Поэтому основным мероприятием, предотвращающим неполнофазные режимы работы электродвигателей, следует считать использование трехфазных защитных аппаратов (автоматов) в силовых цепях. Если между выводами источника питания (например, трансформатора) и зажимами электродвигателя используются только трехфазные защитные аппараты, то отключение возникшего однофазного к. з. на линии, связывающей источник с электродвигателем, происходит во всех трех фазах. Иначе говоря, при срабатывании трехфазных аппаратов защиты неполнофазный режим не образуется.

В последнее время, когда для электрификации сельского хозяйства начали широко использоваться трансформаторы мощностью 160...630 кВ·А, замечено еще одно нежелательное последствие от воздействия токов к. з. При неудаленных от трансформаторных подстанций

к. з. на воздушных линиях, выполненных проводом с небольшой площадью поперечного сечения (менее 70 мм²), возникают токи, вызывающие довольно большие динамические усилия — больше веса провода в пролете. При этом возможны схлестывания проводов в пролетах между подстанцией и местом к. з.

В местах непосредственного соприкосновения при таком схлестывании создается электрическая дуга, которая выплавляет некоторое углубление в теле провода. При повторении этих явлений или под воздействием больших механических нагрузок (например, при гололеде) такой провод с ослабленным сечением может обрваться.

С точки зрения электробезопасности особенно опасны обрывы нулевого провода, так как они могут привести к появлению опасного для людей и животных потенциала на заземленных элементах электрооборудования, то есть к электротравматизму. Если, наконец, учесть, что к. з. приводят к ряду нежелательных последствий, в том числе могут вызвать пожар или привести к массовому поражению электрическим током людей и животных, то станет очевидно, как важны профилактические мероприятия по предотвращению к. з., равно как и надежная правильная работа защитных устройств от к. з.

1.3. ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ ПЕРЕГРУЗОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В

Различают перегрузки нормальные и аварийные. Первые возникают в процессе нормальной эксплуатации электроустановок и не приводят к опасным последствиям. Такого рода перегрузками, например, являются пусковые токи электродвигателей. Аварийные перегрузки возникают по разным причинам. Наиболее частая — подключение новых нагрузок, приводящее к увеличению тока на отдельных участках сети сверх допустимого значения. Как известно, в Правилах устройств электроустановок (ПУЭ) приводятся соответствующие нормы на значение токовой нагрузки в зависимости от материала, площади поперечного сечения, условий прокладки проводов и температуры окружающей среды [3]. Если ток проводника оказывается выше нормы, установленной ПУЭ, то проводник перегревается до недопустимых для его изоляции температур. Аналогичная ситуация соз-

дается, если площадь поперечного сечения проводника выбрана неправильно, то есть без учета требований ПУЭ.

Одна из причин перегрузок — неправильное выполнение защиты от к. з. и перегрузок. Заглубление защиты, использование защитных аппаратов, которые не реагируют на токи к. з. в данной сети, установка в предохранителях некалиброванных плавких вставок, а иногда простых проволочных перемычек приводят к отказу защиты при появлении в сети к. з., особенно однофазных, при которых токи подчас едва превосходят рабочие. Длительно протекая, они создают опасные перегрузки для сети.

Особо следует отметить причины перегрузок электродвигателей по току, так как именно из-за таких перегрузок много электродвигателей преждевременно выходит из строя. Статистика свидетельствует, что примерно одна треть от общего числа электродвигателей, выходящих из строя в сельском хозяйстве, портится из-за отсутствия или неправильного выполнения защиты от перегрузки. Одна из причин перегрузок — нарушение технологических режимов работы рабочей машины, приводимой в действие электродвигателем. Этими нарушениями могут быть заклинивание, примерзание рабочих органов, работа с превышением номинальной мощности и т. п.

Довольно часто перегрузка электродвигателя по току возникает из-за неполнофазного режима. Частный случай неполнофазного режима — работа электродвигателя на двух фазах. Оказавшись в таком режиме, работающий электродвигатель перегревается не только из-за того, что в двух фазах его статорной обмотки циркулируют токи, превышающие номинальные, но и из-за появления при этом несимметрии токов, вызывающей повышенный нагрев стали электродвигателя. Общеизвестно также, что невозможно по нормальной схеме осуществить запуск трехфазного электродвигателя, оказавшегося в двухфазном режиме. Потребляя при запуске на двух фазах большие пусковые токи, электродвигатель не может создать вращающего момента, повернуть сочлененную с ним рабочую машину и затем набрать необходимую частоту вращения, то есть он оказывается по существу в режиме к. з. В тех случаях, когда недостаточно квалифицированный обслуживающий персонал, не представляющий, насколько опасен для электродвигателя пуск его

в неполнофазном режиме, пытаются осуществить запуск, судьба такого двигателя предрешена: изоляция его сгорает при одной из таких попыток или, получив серьезные повреждения от недопустимого перегрева, под действием влаги, агрессивной среды и электрического напряжения пробивается в ближайшее время.

Наконец, перегрузки по току у электродвигателей вызываются длительными отклонениями напряжения, превышающими установленные для них пределы. Действующие нормативные документы на показатели качества электроэнергии у потребителей, подключенных к сельским электрическим сетям, требуют, чтобы отклонения напряжения на зажимах электроприемников не превосходили $\pm 7,5\%$. Для электроприемников животноводческих комплексов и птицефабрик допускаемые отклонения напряжения составляют $\pm 5\%$ от номинального напряжения. В послеаварийных режимах в питающих электрических сетях допускается дополнительное снижение напряжения на 5% . При указанных нормированных отклонениях напряжения изменения токов электродвигателей не представляют опасности для температурного состояния изоляции.

При пониженных по сравнению с номинальным напряжениях асинхронные электродвигатели потребляют из сети токи, большие номинального. При этом если снижения напряжения существенно выходят за пределы установленных норм и сохраняются длительно, то электродвигатель перегревается до недопустимых для его изоляции температур, вызывающих интенсивный процесс старения ее. Существует правило, согласно которому каждые дополнительные 8° сверх номинальной температуры, установленной для данного класса изоляции, сокращают срок службы ее в 2 раза. Это правило справедливо не только для изоляции электродвигателей, но и для изоляции проводников сети. Если при этом учесть еще, что выделяемое количество теплоты в проводнике пропорционально квадрату тока в нем, то очевидно, что чем больше ток перегрузки, тем меньше время она допустима.

При значительных перегрузках сети, приводящих к отклонениям напряжения ниже допустимых пределов, возможно так называемое «опрокидывание» асинхронных двигателей. Обычно этот процесс начинается с торможения одного из двигателей, который при сниженном на-

пряжении развивает недостаточный для сочлененной с ним рабочей машины вращающий момент. Затормозившись до полной остановки, такой электродвигатель потребляет из сети большие, равные пусковым, токи, которые еще сильнее снижают напряжение на зажимах остальных двигателей, часть из которых после этого также может «опрокинуться». Так как процесс развивается лавинообразно, то он получил название лавины напряжения. Он чрезвычайно опасен из-за больших токов как для самой сети, так и для электродвигателей, оказавшихся в заторможенном состоянии.

Своевременное отключение опасных для защищаемой сети токов должна обеспечивать защита от перегрузки. Кроме того, при эксплуатации электроустановок, особенно электродвигателей, необходимо следить за тем, чтобы не создавались условия для появления причин, вызывающих перегрузку, а выявленные причины перегрузки своевременно устранять.

1.4. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Условия безаварийной работы сети напряжением 380/220 В создаются в ходе ее проектирования, строительства и эксплуатации. К мероприятиям, которые в значительной мере обеспечивают нормальную эксплуатацию сети, относится прежде всего правильный выбор площади поперечного сечения проводника. При этом учитывают несколько факторов, в том числе и нагрев проводников токами нагрузки. По условию допустимого нагрева следует выбирать такую площадь сечения проводника, чтобы ток нагрузки его с учетом возможных длительных перегрузок не превышал длительно допускаемую для данной площади сечения токовую нагрузку, нормируемую ПУЭ. Не менее важно и другое требование ПУЭ: марка провода, вид проводки и способ ее прокладки должны отвечать характеру окружающей среды. Кроме того, в зависимости от условий окружающей среды присоединенные к сети электрические аппараты, электрооборудование и электродвигатели должны иметь соответствующее климатическое исполнение и категорию размещения. При проектировании сети должны быть предусмотрены также соответствующие защитные от к. з.

и перегрузок устройства и рассчитаны параметры их срабатывания.

Строительные и электромонтажные работы по сооружению сети напряжением 380/220 В необходимо выполнять в строгом соответствии с проектом. Перед вводом в эксплуатацию новые участки сети 380/220 В и присоединяемое к ней электрооборудование нужно подвергать приемо-сдаточным испытаниям. Объем и нормы приемо-сдаточных испытаний приведены в ПУЭ. Основной вид этих испытаний в сетях 380/220 В — измерение сопротивления изоляции мегомметром на 1000 В при снятых плавких вставках и отключенных электроприемниках как в силовых, так и в осветительных цепях, то есть перед измерением отключают все электроприемники, которые образуют электрическую цепь между проводами участка сети, на котором измеряют сопротивление изоляции.

Сопротивление изоляции сети на участке между двумя смежными предохранителями или за последними предохранителями между любым фазным проводом и землей, а также между любыми фазными проводами должно быть не менее 0,5 МОм. При этом длительность испытания кабельных участков линий установлена равной 1 мин. Сопротивление изоляции электродвигателей и электрических аппаратов измеряют также мегомметром на 1000 В, причем отдельно для каждого проверяемого элемента. Сопротивление изоляции катушек магнитных пускателей, автоматов, статорных обмоток новых или капитально отремонтированных асинхронных двигателей должно быть не ниже 0,5 МОм.

Эксплуатацию сети напряжением 380/220 В и электрооборудования, присоединенного к ней, следует проводить в соответствии с Системой планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве (ППРЭсх) [4]. Систематическое проведение технических уходов и текущих ремонтов позволяет правильно наладить эксплуатацию и предупредить появление многих к. з. благодаря своевременному выводу оборудования в ремонт.

Установка там, где это рекомендуется по соображениям техники безопасности, устройств защитного отключения (например, типа ЗОУП-25) — эффективное мероприятие по предотвращению к. з. Такие устройства

отключают участок сети и подключенное к нему электрооборудование не только в случаях прикосновения к токоведущим частям людей или животных, но и когда сопротивление изоляции существенно снизилось по сравнению с нормируемым уровнем. Для обеспечения надежного действия защитных устройств необходимо периодически измерять нагрузку и сопротивление петли «фаза — нуль». Нагрузку рекомендуется измерять токоизмерительными клещами 2 раза в год, в часы предполагаемого максимума нагрузки на контролируемом участке сети. Полученные значения тока используют для решения вопроса о соответствии площади поперечного сечения проводника на данном участке измеренной нагрузке. Если нагрузка на контролируемом участке сети превысила допустимые ПУЭ нормы, необходимо принять меры по разгрузке этого участка (если это возможно) или увеличить площадь поперечного сечения проводников на нем. При этом проверяют также соответствие токов плавких вставок или уставок расцепителей измеренной нагрузке.

В силу ряда причин (окисление контактов, ослабление нажатия в контактном соединении, выгорание контактных поверхностей) сопротивление петли «фаза — нуль» может существенно увеличиться. Это приведет к значительному снижению токов при однофазных к. з., отказу защиты от к. з., выносу опасного потенциала на заземленные корпуса электроустановок, к электротравматизму. Для исключения этого опасного явления один раз в год рекомендуется измерять сопротивление петли «фаза — нуль» отдельных участков сети напряжением 380/220 В. Сопротивление измеряют прибором типа М-417 без отключения источника питания. Результаты измерения позволяют вычислить ожидаемое значение тока однофазного к. з. и тем самым проверить, будет ли срабатывать расположенное в данном месте защитное устройство от к. з.

В заключение еще раз отметим, что предотвращение к. з. обеспечивается правильным проектированием, качественным сооружением и технически грамотной эксплуатацией электроустановок. Устройства защиты не могут предотвратить появления к. з., эти устройства предназначены только для своевременного отключения возникающих к. з.

2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЗАЩИТНЫХ АППАРАТОВ

2.1. КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

2.1.1. Принцип действия предохранителей

Предохранитель — один из самых широко распространенных аппаратов защиты сетей напряжением 380/220 В от к. з. и перегрузок. Он предназначен для отключения опасных для защищаемой цепи токов, обусловленных к. з. или длительной перегрузкой. Предохранитель включается последовательно с защищаемой цепью и состоит из металлической плавкой вставки, контактного устройства и корпуса. Если по каким-то причинам ток защищаемой цепи увеличится до опасных для этой цепи значений, то, протекая по плавкой вставке, он сначала нагревает, а затем и расплавляет ее. Образующаяся на месте плавкой вставки электрическая дуга гасится и защищаемая цепь отключается. Для быстрого гашения в предохранителях электрической дуги почти во всех типах их конструкций предусматриваются специальные дугогасительные устройства.

Если плавкая вставка предохранителя выбрана правильно, то отключение опасных токов произойдет, прежде чем они успеют создать в защищаемой сети опасные последствия. Поскольку для нагревания и расплавления плавких вставок требуется примерно неизменное количество теплоты, а количество теплоты, выделяемое в плавкой вставке протекающим по ней током, пропорционально квадрату его значения, то продолжительность перегорания плавкой вставки оказывается тем меньше, чем больший ток протекает по ней. Этим объясняется обратная квадратичная зависимость времени срабатывания предохранителя $t_{ср}$ от тока, точнее было бы сказать — время нагрева вставки предохранителя до плавления, так как защитные (ампер-секундные) характеристики предохранителей учитывают только время, необходимое для нагрева плавкой вставки до начала ее плавления. Полное время срабатывания предохранителя складывается из трех составляющих: времени нагрева вставки до начала плавления, времени перехода ее из твердого состояния в жидкое и времени горения и гашения дуги. Для кратностей токов к. з. в сельских сетях напряже-

нием 380/220 В двумя последними составляющими можно пренебречь из-за их малости и с достаточной для практических целей точностью полагать, что время срабатывания предохранителя равно времени нагрева его вставки до плавления.

На процесс перегорания вставки (нагревание, плавление ее, горение и гашение образовавшейся на месте вставки дуги) влияет ряд других обстоятельств: температура окружающей среды, значение тока предшествующего режима, а также естественный износ (старение) предохранителя. Так как нет строгой зависимости времени срабатывания предохранителя от значения протекающего по его вставке тока, то оно обычно выражается в виде области возможных значений $t_{ср}$ с учетом ожидаемого разброса (рис. 2.1). Определяемые по таким характеристикам параметры срабатывания могут иметь отклонения $\pm 10\%$ по току и $\pm 25\%$ по времени.

Материалом для плавких вставок служат свинец, сплав свинца с оловом, цинк, алюминий, медь, серебро и некоторые другие металлы. Опыт эксплуатации показал, что вставки из легкоплавких металлов (сплав олова, свинец, алюминий, цинк) менее практичны, чем тугоплавкие: медь и серебро. Медную вставку легко конструктивно выполнить, так как она хорошо штампруется и поддается пайке. Однако при токах, близких к номинальному току плавкой вставки, она нагревается до температуры $850...900^{\circ}\text{C}$, что приводит к перегреву контактов и корпуса предохранителя. Этот недостаток медных вставок в наполненных закрытых предохранителях устраняется при помощи так называемого металлургического эффекта. Если на середину вставки наплавить оловянный шарик, то при нагреве вставки до температуры порядка 230°C олово расплавляется и начинает растворять

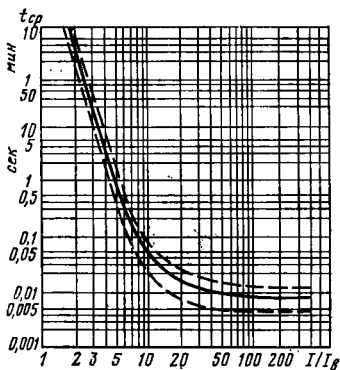


Рис. 2. 1. Защитная характеристика предохранителя типа ПН2: I — ток, протекающий по предохранителю; I_B — номинальный ток плавкой вставки.

в себе более тугоплавкий металл — медь, имеющую температуру плавления 1080°C . Благодаря этому явлению вставка в том месте, где находился шарик, перегорает, а появившаяся дуга расплавляет затем всю вставку и гасится.

По условиям гашения дуги в предохранителях все современные конструкции можно разделить на две основные группы: предохранители, обеспечивающие эффект токоограничения, и предохранители, не создающие ограничения тока. Если предохранитель не обладает токоограничивающим эффектом, то после возникновения к. з. переменный ток в цепи, нарастая по закону синуса *, достигает максимального значения и по истечении времени, необходимого для срабатывания предохранителя, становится равным нулю. При этом и после расплавления вставки аварийный ток также изменяется по закону синуса, продолжая протекать через предохранитель благодаря горению электрической дуги в нем. По истечении некоторого времени, необходимого для гашения дуги, она гасится при переходе тока через нулевое значение, то есть такой предохранитель не оказывает влияния на значение тока к. з., а только отключает его. В токоограничивающих предохранителях ток к. з. не может достигнуть своего максимального значения, так как расплавление и испарение плавкой вставки происходят почти мгновенно.

Быстрое гашение дуги в токоограничивающих предохранителях обеспечивается или за счет газов, выделяющихся из твердого дугогасящего материала под воздействием высокой температуры электрической дуги, или за счет интенсивного теплоотвода от электрической дуги мелкозернистым наполнителем (кварцевый песок). Следует отметить, что токоограничивающее действие предохранителей наблюдается, начиная только с некоторого значения тока короткого замыкания. При меньших токах токоограничивающий эффект отсутствует. В зависимости от области применения и используемого способа гашения дуги предохранители изготавливают в различных конструктивных исполнениях. Для защиты сетей напряжением 380/220 В от к. з. и перегрузок наибольшее рас-

* В первые периоды после возникновения к. з. характер изменения тока несколько отличается от синусоидального закона, так как ток к. з. содержит еще и аperiodическую составляющую (см. рис. 3.1).

пространение получили предохранители типов ПР2, ПН2, НПН2-60, резьбовые пробочного типа и некоторые другие. Рассмотрим конструкцию и технические характеристики первых трех типов.

2.1.2. Конструкция предохранителей типа ПР2

Предохранитель типа ПР2 (рис. 2.2) состоит из фибровой цилиндрической трубки 1, к концам которой заклепками прикреплены латунные обоймы 4 с резьбой. При помощи латунных колпачков 3, навинчиваемых на эти обоймы, зажимаются контактные ножи 5. К ножам болтами прижимается плавкая вставка 2. Плавкие вставки для предохранителей типа ПР2 изготавливают из цинка. Для облегчения гашения электрической дуги они имеют суженные места. Быстрому гашению дуги способствуют и выделяемые при ее горении из стен патрона газы.

Структура обозначения предохранителей, состоящего из пяти знаков, такова: П — предохранитель, Р — разборный, 2 — условный номер разработки; последние два знака указывают климатическое исполнение и категорию размещения [2] *.

Предохранители ПР2 изготавливают однополюсными, переднего и заднего присоединения на номинальные токи до 1000 А (табл. 2.1), степень защиты от соприкосновения и попадания посторонних тел IP00, климатическое исполнение и категория размещения У4 или ХЛ4. В зависимости от длины патрона различают две модификации предохранителей ПР2 — короткие и длинные. Короткие рассчитаны на работу в сетях напряжением до 380 В включительно, длинные — до 500 В. Таким образом, в сетях напряжением 380 В можно использовать как короткие, так и длинные предохранители. Диаметр патрона зависит от номинального тока: чем выше номинальный

* Буквой У обозначают исполнение электрических аппаратов для умеренного, ХЛ — холодного, Т — тропического климата. Категории размещения обозначаются цифрами: 1 — для работы на открытом воздухе, 2 — для работы в помещениях, где температура и влажность такие же, как и на открытом воздухе, 3 — для закрытых помещений с естественной вентиляцией, 4 — для работы в помещениях с искусственным регулированием климата, 5 — для работы в помещениях с повышенной влажностью. Подробные сведения об обозначениях категорий размещения и климатических исполнениях электрических аппаратов приведены соответственно в ГОСТ 15150—69 и ГОСТ 15543—70.

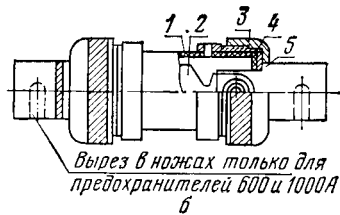
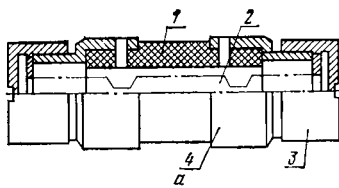
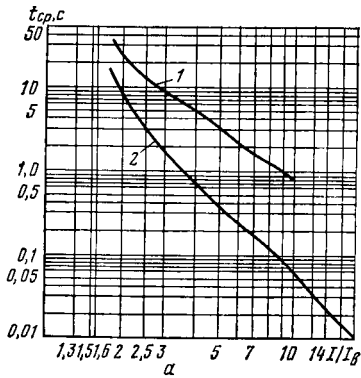


Рис. 2. 2. Предохранитель типа PR2:

a — предохранитель на токи 15 и 60 А; *б* — предохранитель на токи 100...1000 А.

ток, тем больше диаметр. Как видно из таблицы 2.1, в патрон на данный номинальный ток разрешается помещать плавкую вставку с номинальным током, не превышающим номинальный ток патрона.



Например, в патрон, рассчитанный на номинальный ток 60 А, можно монтировать вставки от 15 до 60 А включительно.

Контактные ножи в патронах на номинальные токи 15 и 60 А отсутствуют. Плавкая

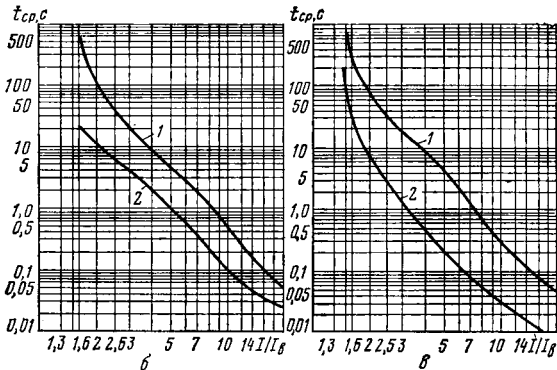


Рис. 2. 3. Защитные характеристики коротких 1 и длинных 2 предохранителей типа PR2:

a — патрона на номинальный ток 15 А; *б* — патрона на номинальный ток 60 А; *в* — патрона на 100 А.

2.1. Номинальные токи и отключающая способность предохранителей типа ПР2

Номинальный ток патрона, А	Номинальный ток плавких вставок, А	Отключающая способность (кА) при напряжении 380 В предохранителей	
		коротких	длинных
15	6, 10, 15	0,8	8,0
60	15, 20, 25, 35, 45, 60	1,8	4,5
100	60, 80, 100	6,0	11,0
200	100, 125, 160, 200	6,0	11,0
350	200, 225, 260, 300, 350	6,0	13,0
600	350, 430, 500, 600	13,0	23,0
1000	600, 700, 850, 1000	15,0	20,0

вставка в таких патронах зажимается колпачками при их завинчивании, а контакт с электрической цепью осуществляется через наружные поверхности колпачков, вставляемых в пружинные контактные стойки.

Предохранители типа ПР2 широко используются в сетях напряжением 380/220 В, особенно в комплектных трансформаторных подстанциях (КТП), через которые получают электрическую энергию сельские сети 380/220 В. Составной частью эти предохранители входят в блок предохранитель-выключатель типа БПВ-31. Такие блоки применяются в некоторых конструкциях КТП для защиты от к. з. и перегрузки отходящих от потребительских подстанций линий. Широко применяются они и для защиты от к. з. и перегрузок внутренних электрических сетей 380/220 В.

Предохранители типа ПР2 при больших токах работают с токоограничивающим эффектом. Перед некоторыми другими типами предохранителей, используемых в сельских электрических сетях, они имеют одно существенное преимущество — позволяют быстро заменить перегоревшую плавкую вставку. На рисунке 2.3 показаны зависимости времени срабатывания предохранителей ПР2 от кратности тока, протекающего по плавкой вставке.

2.1.3. Конструкция предохранителей типа ПН2

Предохранители типа ПН2, так же как и ПР2, работают с токоограничивающим эффектом, но в отличие от ПР2 они имеют наполнитель — мелкий кварцевый песок.

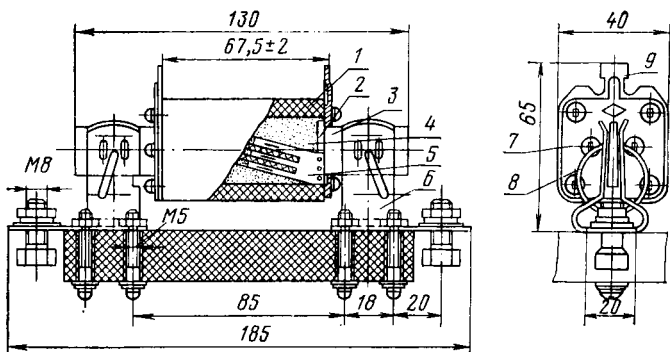


Рис. 2. 4. Предохранитель ПН2 без указателя срабатывания.

Песок создает интенсивный теплоотвод от электрической дуги и тем самым обеспечивает быстрое ее гашение.

Предохранитель типа ПН2 состоит из фарфорового патрона 1, наполненного мелкозернистым кварцевым песком 4 (рис. 2.4). В песке расположена плавкая вставка 5, выполненная из медной ленты путем штамповки. Плавкие вставки на концах приварены к дискам 2, которые крепятся винтами к крышкам 7. К другим сторонам обоих дисков 2 приварены контактные ножи 3, через которые осуществляется электрический контакт предохранителя с контролируемой цепью. Ножи вставляются в контактные стойки 6, подпружиненные кольцевой пружиной 8. Крышки 7 винтами прикрепляются к патрону. Для создания герметизации патрона, предотвращающей просыпание песка, под крышки 7 устанавливаются асбестовые прокладки. Выступы 9 используются для снятия предохранителя под напряжением при помощи специальной рукоятки из изоляционного материала.

2.2. Номинальные токи и отключающая способность предохранителей типа ПН2

Тип предохранителя	Номинальные токи, А		Отключающая способность при напряжении 380 В, кА
	предохранителя	плавкой вставки	
ПН2-100	100	30, 40, 50, 60, 80, 100	100
ПН2-250	250	80, 100, 120, 150, 200, 250	100
ПН2-400	400	200, 250, 300, 350, 400	40
ПН2-600	600	300, 400, 500, 600	25

Отечественная промышленность выпускает четыре типоразмера предохранителей типа ПН2 (табл. 2.2). Каждый из типоразмеров может быть снабжен устройствами, сигнализирующими о срабатывании предохранителя. Такими устройствами являются указатели срабатывания и дополнительные контакты.

Обозначение предохранителя состоит из десяти знаков, например ПН2-100-12-У3. Структура этого обозначения такова: П — предохранитель, Н — неразборный, 2 — номер серии. Следующие три цифры указывают номинальный ток патрона предохранителя. Седьмой знак несет информацию о виде присоединения проводников: 1 — переднее, 2 — заднее. Восьмой знак информирует о наличии указателя срабатывания и дополнительных контактов: 0 — без указателя, 1 — с указателем, 2 — с указателем и замыкающим контактом, 3 — с указателем и размыкающим контактом. Девятый и десятый знаки указывают климатическое исполнение и категорию размещения предохранителя.

В зависимости от номинального тока плавкая вставка состоит из одной или нескольких пластин, называемых плавкими элементами. Плавкие элементы имеют суженные места, образованные выштампованными отверстиями и щелями. На середину каждого плавкого элемента нанесены оловянные шарики, позволяющие снизить температуру плавления вставки.

При перегорании плавкой вставки предохранитель разбирают, оставшиеся диски удаляют, устанавливают новую плавкую вставку на нужный номинальный ток, после чего патрон засыпают песком и закрывают крышкой.

Зависимость времени срабатывания предохранителей типа ПН2 от кратности тока, протекающего по вставке, показана на рисунке 2.1. По этой характеристике можно определить время срабатывания предохранителя при известном токе к. з. Пусть, например, требуется определить время срабатывания предохранителей ПН2-100 с плавкой вставкой $I_B=80$ А при токе к. з., равном 400А. Кратность этого тока к. з. к номинальному току плавкой вставки составляет $I_K/I_B=400/80=5$. По характеристике (рис. 2.1) определяем, что среднее время срабатывания составляет 1 с, а возможный разброс от этого значения — примерно 0,6 с. Таким образом, ожидаемое время срабатывания равно $(1 \pm 0,6)$ с.

2.1.4. Конструкция предохранителей типа НПН2-60

Предохранители типа НПН2-60 предназначены для защиты от к. з. и перегрузок электрооборудования и сетей напряжением 380/220 В. Наряду с предохранителями ПР2 их широко используют в сельских сетях для защиты внутренних проводок. Структуру полного обозначения предохранителя рассмотрим на примере. Так, запись НПН2-60-0У3 расшифровывается следующим образом: НПН — означает, что предохранитель с неразборной плавкой вставкой с наполнителем; 2 — номер серии; 60 — условно обозначает номинальный ток (63 А) основания предохранителя; следующая цифра информирует об исполнении по способу присоединения проводников к клеммам предохранителя: 0 — с передним присоединением, 1 — с задним; наконец, У3 — обозначает климатическое исполнение и категорию размещения.

Предохранители типа НПН2-60 изготавливают в климатических исполнениях У и Т для категорий размещения 3 и в климатическом исполнении ХЛ для категории размещения 4.

На рисунке 2.5 показано устройство предохранителя. Патрон его состоит из стеклянной трубки 1, заполненной кварцевым песком и армированной по концам медными колпачками. Плавкая вставка, впаянная в эти колпачки, состоит из нескольких медных проволочек с оловянным шариком посередине. Наружная цилиндрическая поверхность колпачков служит для создания электрического контакта с контактными стойками 2, к зажимам которых присоединена контролируемая цепь. Плавкие вставки изготавливаются на номинальные токи 6, 10,

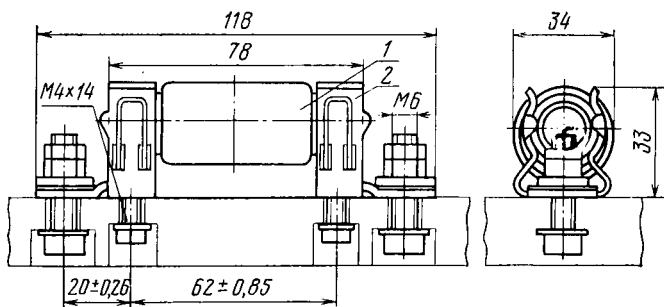


Рис. 2.5. Предохранитель типа НПН2-60.

16, 20, 25, 32, 40 и 63А. Принцип действия предохранителей и форма защитных характеристик такие же, как и у предохранителей ПН2. Свойства предохранителей осуществлять защиту от перегрузок характеризуются данными таблицы 2.3.

2.3. Данные о пограничном токе предохранителей типа НПН2-60

Номинальный ток плавкой вставки, А	Отношение максимального тока неплавления к номинальному току вставки	Отношение минимального тока плавления к номинальному току вставки
6...10	1,5	1,9
16...25	1,4	1,75
32...63	1,3	1,6

2.2. КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВОЗДУШНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

2.2.1. Назначение и принцип действия автоматических выключателей

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) предназначены для отключения защищаемых ими электрических цепей от токов к. з. и перегрузок. Кроме того, их можно использовать для нечастых включений и отключений токов нагрузки. Автоматы должны сколь угодно длительно выдерживать ток нагрузки во включенном положении и быть в состоянии многократно отключать токи к. з. Для предотвращения опасных последствий от токов к. з. и перегрузок время срабатывания автомата по возможности должно быть минимальным.

Автоматы, как и предохранители, включаются последовательно с защищаемой электрической цепью, то есть в рассечку ее. На рисунке 2.6 показана принципиальная схема максимальных автоматов, широко используемых для защиты сетей напряжением 380/220 В. При переводе рукоятки автомата в положение «включено» взводятся его пружины 2 и 6 и механизм свободного расцепления. Этот механизм состоит из рычагов и тяг, имеет довольно сложное устройство и на рисунке 2.6 показан условно. Благодаря усилию F_n , создаваемому пружиной 2, автомат удерживается во включенном состоянии защелкой 1. Ток защищаемой электрической цепи, протекая по об-

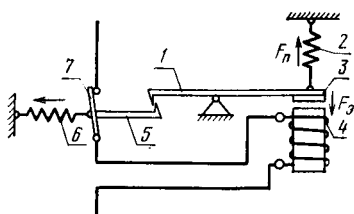


Рис. 2. 6. Принципиальная схема работы автоматического выключателя.

5. Под действием пружины 6 произойдет размыкание контактов 7.

Устройство, воздействующее на защелку автомата (на рис. 2.6 — это электромагнит 4), называется расцепителем. По принципу действия или способу выявления аварийной ситуации, при которой автомат должен быть отключен, различают расцепители электромагнитные, тепловые, нулевые, независимые, минимального напряжения, полупроводниковые и др. В зависимости от исполнения автомат может быть укомплектован одним или несколькими типами расцепителей.

Электромагнитные расцепители используют для быстрого, почти мгновенного отключения автоматов при появлении больших токов в защищаемой цепи. На заводе-изготовителе их настраивают на определенный ток срабатывания, который в условиях эксплуатации регулированию не подлежит.

Для выполнения защиты от перегрузки используют чаще всего тепловые расцепители. Основным элементом теплового расцепителя является биметаллическая пластина, изготовленная из пластинок двух металлов, имеющих разные температурные коэффициенты расширения. Сваркой или горячим прокатом пластины жестко скреплены друг с другом. При нагревании биметаллическая пластина изгибается. Если при этом один конец пластины будет закреплен, то второй, свободный, перемещаясь при изгибе пластины, способен развивать некоторую силу. Это явление используется в автоматах для воздействия на механизм свободного расцепления. Изгиб биметаллической пластины от нагревания ее током используется и в тепловых реле, встраиваемых в магнитные пускатели для защиты электродвигателей от перегрузки, только в тепловых реле свободный конец пластины воздействует

мотке электромагнита 4, создает усилие F_a , которое стремится притянуть якорь 3 к электромагниту. Если ток в обмотке электромагнита достигнет значения, при котором усилие F_a станет больше силы F_n , то якорь 3, притянувшись к электромагниту, провернет защелку и освободит рычаг

на контактную систему. Нагрев пластины происходит или за счет теплоты, выделяемой пропускаемым по ней током нагрузки, или от специального нагревателя, по которому протекает ток, или, наконец, за счет комбинации обоих способов нагрева.

Зависимость времени срабатывания теплового расцепителя от протекающего тока имеет примерно такой же вид, как и для предохранителей (рис. 2.1). Номинальный ток теплового расцепителя $I_{н. т}$ может протекать по защищаемой цепи и расцепителю сколь угодно долго, не приводя к его срабатыванию. Расцепитель срабатывает при токе $I_{ср. т} = (1,2 \dots 1,35) I_{н. т}$ и при токах, больших $I_{ср. т}$. На время срабатывания тепловых расцепителей гораздо в большей степени, чем предохранителей, оказывают влияние побочные факторы, главным образом температура окружающей среды. Поэтому для правильной работы защиты от перегрузки тепловые расцепители или тепловые реле (то есть автоматы или магнитные пускатели) желательно располагать в том же помещении, где находится защищаемый объект. По этой же причине автоматы и магнитные пускатели с тепловой защитой нельзя размещать вблизи источников тепла.

Следует отметить, что температура окружающей среды оказывает влияние не только на время, но и на ток срабатывания. Из-за этого разброс в токе срабатывания тепловых расцепителей в два раза больше, чем электромагнитных. В соответствии с принципом работы расцепители с биметаллической пластинкой имеют довольно большую тепловую инерционность, что не позволяет им обеспечивать своевременное, то есть достаточно быстрое, отключение токов к. з. В связи с этим тепловые расцепители в автоматах чаще всего используются совместно с электромагнитными. Первые осуществляют защиту от перегрузки, вторые — от токов к. з.

Некоторые исполнения автоматов, кроме электромагнитных и тепловых, содержат независимый расцепитель или расцепитель минимального напряжения. Независимый электромагнитный расцепитель предназначается для дистанционного отключения автомата. Обмотку такого расцепителя обычно изготавливают на номинальное напряжение 220 В переменного тока и не рассчитывают на длительный режим включения. Расцепитель минимального напряжения, или, как его просто называют, минимальный расцепитель, является также электромагнитным

и должен отключать автомат при исчезновении электропитания или при снижении напряжения ниже напряжения срабатывания. Автоматы с таким расцепителем часто применяют для предотвращения самозапуска электродвигателей, если такой самозапуск недопустим по каким-либо соображениям, например по условиям одновременного успешного запуска асинхронных двигателей. Кроме того, минимальные расцепители предотвращают работу электродвигателей при недопустимо глубоких снижениях напряжения, когда электродвигатели, развивая недостаточный вращающий момент, могут «опрокинуться», то есть затормозиться и оказаться в аварийном для них режиме. При необходимости минимальный расцепитель можно использовать и как независимый — для дистанционного отключения автомата.

Имеются исполнения автоматических выключателей с электромагнитным расцепителем, включаемым в нулевой провод. Такой расцепитель обычно имеет меньший ток срабатывания, чем расцепители в фазных проводах. Это облегчает выполнение защиты от однофазных к. з. и очень важно для сельских сетей напряжением 380/220 В.

Наибольшее распространение в сельских сетях 380/220 В нашли автоматы серий АП50Б, АЕ20, АЗ700. В эксплуатации еще находится довольно большое число автоматов серии АЗ100, снятой с производства и в новых разработках не применяемой.

2.2.2. Конструкция автоматических выключателей серии АП50Б

Широкое применение, особенно для пуска и защиты электродвигателей в сельскохозяйственном производстве получили автоматы серии АП50. С 1980 г. выпускается модернизированная серия этих автоматов — АП50Б. Автоматы этой серии предназначены для защиты от перегрузок и к. з., оперативных включений и отключений в цепях переменного тока напряжением до 500 В. Допускаемое число циклов включений и отключений — 30 в час, в том числе асинхронных двигателей — до 12 включений в час. Выключатели изготавливают в двух- и трехполюсном исполнениях на номинальные токи максимальных расцепителей до 63 А (табл. 2.4) и в климатических исполнениях У и Т категории размещения 5 в пласт-

массовой оболочке со степенью защиты от воздействий внешней среды IP20. Применение дополнительной металлической оболочки позволяет для всех трех климатических исполнений У, Т и ХЛ получить степень защиты от внешних воздействий IP54.

2.4. Номинальные токи и отключающая способность автоматов АП50Б при напряжении 380 В

Номинальный ток максимальных расцепителей, А	Допустимый ток к. з., кА	
	ударный	действующее значение
1,6	0,5	0,3
2,5	0,7	0,4
4,0	1,0	0,6
6,3	1,4	0,8
10; 16	3,4	2,0
25	5,1	3,0
40; 50	8,5	5,0
63	10,0	6,0

В автоматические выключатели можно встраивать следующие виды расцепителей: электромагнитные максимальные (условное обозначение — М), тепловые максимальные — Т, комбинированные (электромагнитные и тепловые) — МТ, максимальный расцепитель тока в нулевом проводе — 0, минимальный расцепитель напряжения — Н, независимый расцепитель — Д (табл. 2.5). В обозначении типа автомата цифрой перед условным обозначением расцепителя указывается число расцепителей данного вида. Например, автомат АП50Б-2МЗТН содержит два электромагнитных, три тепловых расцепителя и один расцепитель минимального напряжения. Полное обозначение автоматического выключателя серии АП50Б, кроме информации о расцепителях, содержит еще и сведения о климатическом исполнении, категории размещения и номинальном токе главных цепей его. Токи 1,6; 2,5; 4 А обозначаются условно цифрой 1, токи 6,3; 10; 16 А — цифрой 2, токи 25; 40; 50; 63А — цифрой 3. Таким образом, полное обозначение выключателя после признака серии в общем случае может иметь дополнительно еще 8 знаков. Например, обозначение АП50Б-2МЗТ0У3.3 означает, что в данный выключатель встроены два электромагнитных, три тепловых и один расце-

питель в нулевом проводе; климатическое исполнение — У, категория размещения — 3, главная цепь выключателя рассчитана на токи 25...63 А.

Ниже приведены типы трехполюсных автоматов АП50Б в зависимости от встраиваемых в них расцепителей:

Номинальные токи максимальных расцепителей, А	Типы автоматов
1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16	АП50Б-3МТ, АП50Б-3М, АП50Б-2МЗТН
25; 40; 50; 63	АП50Б-2МН, АП50Б-2МЗТД
16; 25; 40; 50; 63	АП50Б-2МЗТО

Автоматы с тепловыми максимальными расцепителями тока срабатывают не более чем за 30 мин при перегрузке, превышающей на 35% номинальный ток этого расцепителя. Повторное включение автомата, отключенного тепловым расцепителем, возможно через 2 мин. Тепловые расцепители имеют устройство регулирования тока срабатывания, позволяющее уменьшать уставку теплового расцепителя в диапазоне от 1 до 0,6 номинального значения.

Кратность тока срабатывания (уставка по току) электромагнитных максимальных расцепителей тока может быть 3,5 или 10 по отношению к его номинальному току. Ее устанавливают на заводе, и регулировка в эксплуатации она не подлежит. Электромагнитные расцепители не отключаются, когда ток, протекающий по их обмоткам, равен 0,8 уставки по току или меньше ее. При токах, превышающих уставку на 20% и более, они надежно срабатывают, отключая автомат.

Максимальный расцепитель в нулевом проводе рассчитан на длительную работу с током 0,6 номинального. Он срабатывает, если ток в нем превысит на 40% номинальный ток максимальных расцепителей в фазах. Минимальный расцепитель напряжения отключает автомат при напряжениях ниже 0,7 номинального и не препятствует включению автомата, если уровень напряжения составляет 0,85 номинального или выше. Независимый расцепитель срабатывает при напряжении 0,7...1,2 номинального.

Корпус автомата выполняют из пластмассы. Он состоит из цоколя, на котором смонтированы все части автомата, и крышки, привинчиваемой винтами к цоколю. Кроме основного коммутирующего устройства, состоя-

щего из главных подвижных и неподвижных контактов, а также и дугогасительной камеры, автомат снабжают дополнительным устройством, содержащим вспомогательные контакты, используемые в цепях управления. Гибкие связи соединяют подвижные контакты с расцепителями.

Если в какой-либо фазе защищаемой цепи возникает аварийный режим (перегрузка или к. з.), срабатывает соответствующий расцепитель, поворачивая при этом отключающую рейку, общую для всех полюсов. Под воздействием рейки срабатывает механизм свободного расцепления, представляющий собой систему рычагов и тяг, связанных с отключающей пружиной. При включении автомата эта пружина взводится и удерживается в заведенном состоянии. Если срабатывает расцепитель, то система рычагов, удерживавшая раньше пружину, ломается и под действием освободившейся пружины автомат отключается (без вмешательства обслуживающего персонала), отключая поврежденный участок от источника питания.

2.2.3. Конструкция автоматических выключателей серии АЕ20

Выключатели серии АЕ20 в сетях напряжением 380/220 В используют для защиты, пуска и остановки асинхронных двигателей, для защиты, оперативных включений и отключений электрических цепей с частотой до 30 включений в час. Выпускаемые выключатели отличаются номинальными токами как самих выключателей, так и максимальных расцепителей, видами встроенных расцепителей, числом полюсов, климатическим исполнением, степенью защиты от внешней среды и другими признаками. Основные отличительные особенности выключателей отображаются в их обозначении.

Полное обозначение выключателя содержит десять или одиннадцать знаков. Первые два — АЕ — условно обозначают выключатель; следующие два — 20 — порядковый номер разработки. Пятый знак обозначает величину выключателя: 1 — первая величина на номинальный ток 10 А; 3 — третья величина на ток 25 А; 4 — четвертая на ток 63 А; 5 — пятая на ток 100 А. Шестой знак несет информацию о числе полюсов и типах максималь-

ных расцепителей: 1 — однополюсные с электромагнитными максимальными расцепителями тока; 2 — двухполюсные с электромагнитными максимальными расцепителями тока; 3 — трехполюсные с электромагнитными максимальными расцепителями тока; 4 — однополюсные с электромагнитными и тепловыми максимальными расцепителями тока; 5 — двухполюсные с электромагнитными и тепловыми максимальными расцепителями тока; 6 — трехполюсные с электромагнитными и тепловыми максимальными расцепителями тока; 7 — четырехполюсные с электромагнитными максимальными расцепителями; 8 — четырехполюсные с электромагнитными и тепловыми расцепителями максимального тока.

Седьмой знак информирует о числе свободных вспомогательных контактов: 1 — без свободных вспомогательных контактов; 2 — один замыкающий свободный вспомогательный контакт; 3 — один размыкающий свободный вспомогательный контакт; 4 — один замыкающий и один размыкающий контакты. Восьмым знаком обозначается наличие дополнительных расцепителей: 1 — минимальный расцепитель напряжения; 2 — независимый расцепитель; 3 — минимальный расцепитель напряжения и независимый расцепитель. Девятым и десятым знаками обозначаются климатическое исполнение и категория размещения.

Автоматический выключатель серии АЕ20 может иметь устройство регулирования номинального тока теплового расцепителя и устройство температурной компенсации. В этом случае на месте девятого знака ставится буква Р, если имеется регулировка номинального тока тепловых расцепителей и температурная компенсация, или буква Н, если регулируется только номинальный ток тепловых расцепителей и отсутствует температурная компенсация. Знаки обозначения климатического исполнения и категории размещения соответственно сдвигаются и становятся десятым и одиннадцатым. Например, обозначение АЕ2036-20РУЗ означает, что этот выключатель серии АЕ20 третьей величины на номинальный ток 25 А, трехполюсный с электромагнитными и тепловыми расцепителями, имеет один замыкающий свободный контакт, без дополнительных расцепителей, с регулированием номинального тока тепловых расцепителей и температурной компенсацией, для умеренного климата, категории размещения 3.

Выключатели серии АЕ20, кроме исполнения У, изготавливают также в климатическом исполнении ХЛ и Т. Категория размещения выключателей зависит от наличия оболочки. Выключатели без оболочки имеют категорию размещения 3 при исполнениях У и Т и категорию 4 для исполнения ХЛ. За счет оболочек степени защиты IP54 для исполнений У и Т обеспечивается категория размещения 1, а для исполнения ХЛ — категория размещения 2. Основные технические данные выключателей серии АЕ20 приведены в таблицах 2.5 и 2.6.

2.5. Номинальные токи выключателей серии АЕ20 и встраиваемых в них максимальных расцепителей

Тип выключателя	Номинальный ток выключателя, А	Номинальные токи максимальных расцепителей, А
АЕ2010	10	0,32; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
АЕ2030	25	0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5; 6; 8; 12,5; 16; 20; 25
АЕ2040	63	10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63
АЕ2050	100	16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100

Конструкция выключателя показана на рисунке 2.7. Все его узлы размещены в пластмассовом корпусе 2, закрытом крышкой 7. Через зажимы 4 выключатель соединяется с внешней электрической цепью, а контактами 3 осуществляется коммутация этой цепи. Для облегчения гашения электрической дуги применена дугогасительная решетка из стальных пластин 5. Рукояткой 8 через механизм 6 управления выключателем его включают и отключают вручную. При помощи электромагнитного 1 и теплового 9 расцепителей, действующих на отключающую рейку, обеспечивается автоматическое отключение токов к. з. и перегрузки. Устройством 10 можно регулировать ток срабатывания теплового расцепителя в пределах от

2.6. Коммутационная способность двух- и трехполюсных выключателей серии АЕ20 при напряжении 380 В

Тип выключателя	Степень защиты	Номинальные токи расцепителей, А	Допустимый ток к. з., кА		Вид максимального расцепителя
			ударный	действующее значение	
АЕ2010	IP00	0,32...1,6 0,32...1,6	5,0 1,0	3,0 0,6	Комбинированный Электромагнитный
	IP20	2,0...6,0 8,0...10	1,5 2,0	0,9 1,2	Комбинированный или электромагнитный
АЕ2030	IP00	0,6...1,6 2,0...12,5	5,0 2,5	3,0 1,6	Комбинированный
	IP20	0,6...1,6 2,0...4,0 5,0...12,5	1,0 1,5 2,5	0,6 0,9 1,5	Электромагнитный
	IP00, IP20 IP54	16...25 16...25	5,0 3,5	3,0 2,0	Комбинированный или электромагнитный
АЕ2040	IP00	10...12,5 16...25 32...63	3,5 5,0 10,0	2,0 3,0 6,0	Комбинированный или электромагнитный
АЕ2050	IP00	16...25 32...40 50...100	5,0 10,0 16,0	3,0 6,0 9,0	Комбинированный или электромагнитный

0,9 до 1,15 тока уставки и создавать температурную компенсацию. Регулировочное устройство содержит термoeлемент, систему рычагов и регулировочный винт. Ток срабатывания теплового расцепителя зависит от температуры окружающей среды (рис. 2.8). Температурная компенсация позволяет улучшить защитные характери-

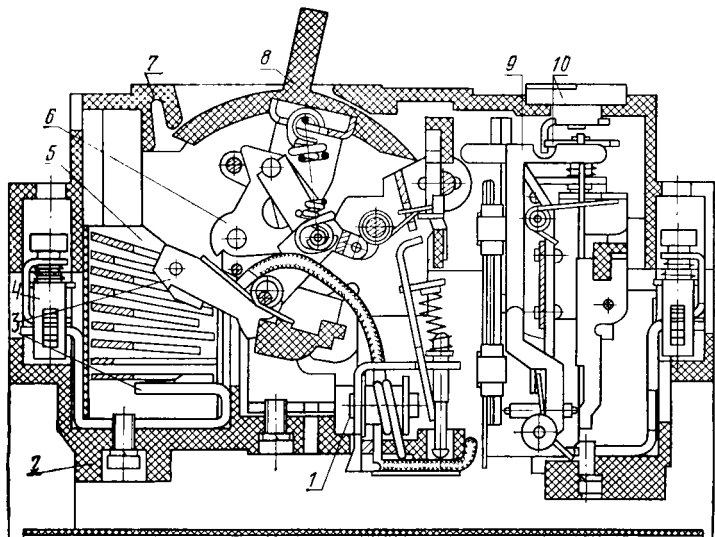


Рис. 2. 7. Автоматический выключатель АЕ20.

стики выключателей за счет ввода соответствующих поправок на температуру окружающей среды.

Коммутационное состояние определяют по знакам: «1» — включенное положение, «0» — отключенное. Для включения выключателя рукоятку управления 8 (рис. 2.7) следует повернуть в положение «1», для отключения — в положение «0». Включение после автоматического срабатывания должно выполняться поворотом рукоятки сначала в положение «0», при этом происходит взвод механизма, а затем поворотом в положение «1». Если отключение произошло от действия тепловых расцепителей, то повторное включение возможно примерно через 2 мин после автоматического срабатывания.

На рисунке 2.9 приведены защитные характеристики

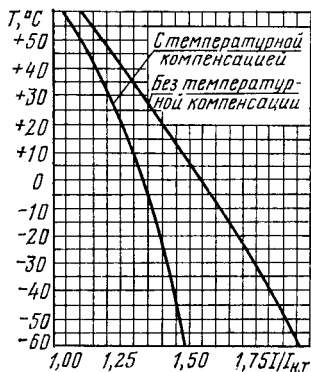


Рис. 2. 8. Зависимость тока срабатывания выключателей серии АЕ20 от температуры окружающего воздуха.

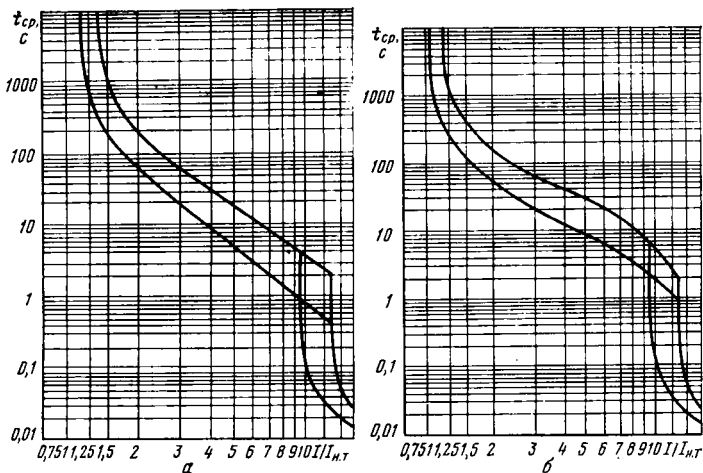


Рис. 2. 9. Защитные характеристики выключателей серии АЕ20: а — без температурной компенсации; б — с температурной компенсацией.

выключателей, представляющие зависимость времени срабатывания от кратности тока к. з. по отношению к номинальному току расцепителя. Поскольку комбинированный расцепитель состоит из двух — электромагнитного и теплового — и электромагнитный расцепитель настроен на срабатывание при кратности 12, то токи, имеющие кратность меньше 12, отключаются тепловым расцепителем с достаточно большой выдержкой времени. Большие токи, превышающие кратность 12...13, отключаются почти мгновенно — с выдержкой, равной нескольким сотым долям секунды.

Подобную конструкцию имеют и выключатели серии АЕ1000, используемые для защиты от к. з. и перегрузок осветительных сетей в жилых зданиях, административных и производственных помещениях. Выключатели серии АЕ1000 при гораздо меньших габаритах имеют меньшую отключающую способность, но вполне достаточную для коммутации токов к. з. в осветительных сетях.

2.2.4. Конструкция автоматических выключателей серии АЗ700

Автоматические выключатели серии АЗ700 предназначены для защиты электроустановок от к. з., перегрузок и недопустимых снижений напряжения, а также

нечастых, до шести в час, оперативных включений и отключений электрических цепей. Выключатели этой серии имеют много различных исполнений. Они выпускаются двух- и трехполюсными, постоянного и переменного тока, токоограничивающими и без токоограничивания, селективными и неселективными, с расцепителями и без расцепителей, в стационарном и выдвижном исполнении. Автоматы могут различаться также по номинальному напряжению главной цепи, номинальному току расцепителей, типам используемых расцепителей, наличию дополнительных узлов: вспомогательных контактов, независимого расцепителя, расцепителя минимального напряжения, дистанционного привода.

Обозначение выключателя несет следующую информацию: А — условное обозначение автоматического выключателя, 37 — порядковый номер разработки, четвертый знак обозначает величину выключателя (1, 2, 3, 4), пятый — цифры от 1 до 8 — число полюсов и исполнение максимальной токовой защиты, шестой — обобщенное исполнение по виду защиты (Б — токоограничивающее, С — селективное, Н — неавтоматическое), наконец, седьмой и остальные знаки — климатическое исполнение и категорию размещения. Первая величина выключателя соответствует номинальному току главной цепи — 160 А, вторая — 250, третья — 400, четвертая — 630 А.

Если на месте пятого знака в обозначении выключателя стоит цифра 1, то это значит, что исполнение его двухполюсное, токоограничивающее с электромагнитными расцепителями; 2 — трехполюсное, токоограничивающее с электромагнитными расцепителями; 3 — двухполюсное, токоограничивающее с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями или селективное с полупроводниковыми расцепителями максимального тока; 4 — трехполюсное, токоограничивающее с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями или селективное с полупроводниковыми расцепителями; 5 — двухполюсное с электромагнитными и тепловыми термобиметаллическими расцепителями; 6 — трехполюсное с электромагнитными и тепловыми расцепителями; 7 — двухполюсное без расцепителей, неавтоматическое; 8 — трехполюсное, неавтоматическое. Например, обозначение А 3714БУЗ свидетельствует о том, что данный выключатель серии А 3700, первой величины, трехполюс-

ный, с электромагнитными и полупроводниковыми расцепителями максимального тока, токоограничивающий, для умеренного климата, категории размещения 3.

На рисунке 2.10 показана конструкция автоматического выключателя исполнения АЗ714БУЗ. Корпус 1 и крышка 6 выключателя выполнены из прочной пластмассы. С внешней электрической цепью автомат соединяется через зажимы 2, закрываемые блоком пламегасителя 4 и полупроводниковым расцепителем 20. Контактная система состоит из контактов 8, связанных с механизмом свободного расцепления, и контактов 7 токоограничивающего устройства. Для повышения термической стойкости контактов к ним приварены металлокерамические пластины 9. При больших токах к. з., порядка нескольких килоампер, контакты 7 под действием электродинамических сил размыкаются раньше, чем успеет сработать электромагнитный расцепитель максимального тока. Так как при этом время отключения обычно не превосходит 10...15 мкс, то ток к. з. не успевает достигнуть своего максимального значения. При кратностях токов к. з., меньших 20...40 по отношению к номинальному току выключателя, что чаще всего бывает в сельских сетях, отключение происходит так же, как и у обычных автоматов, то есть без эффекта токоограничения, от воздействия соответствующих расцепителей.

Гашение дуги при срабатывании обеспечивается за счет дробления и деионизации ее в дугогасящей камере, представляющей собой набор стальных пластин 5, укрепленных в изоляционной оправе. Пластина 3 защищает верхние зажимы 2 от раскаленных газов. Через отверстия в пластине 3 газы направляются для охлаждения в решетку пламегасителя 4.

Рукоятка управления 12 механизмом включения и отключения может находиться в одном из четырех положений: «включено», «отключено автоматически», «отключено вручную», «взведено». Таким образом, по положению рукоятки можно определить, как был отключен выключатель: от защиты или вручную. Чтобы взвести механизм выключателя после автоматического отключения, необходимо переместить рукоятку 12 вниз. При этом рычаг 15 входит в зацепление с собачкой 13, которая другим концом зацепляется с полуосью отключающей рейки 19. После этого можно осуществить операцию включения, двигая рукоятку вверх. Для отключения выключателя

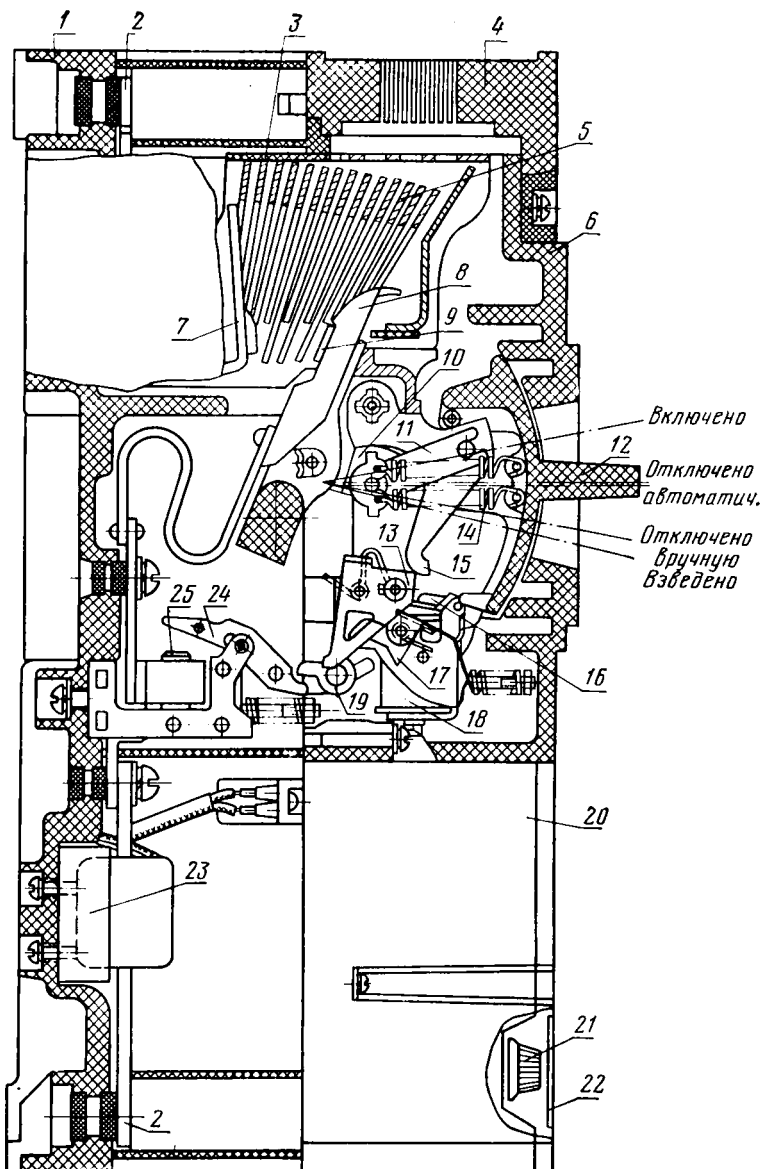


Рис. 2. 10. Автоматический выключатель А 3700.

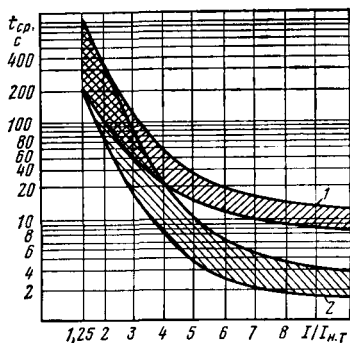


Рис. 2. 11. Защитные характеристики выключателей А3700 с полупроводниковыми расцепителями:
 1— при уставке срабатывания по времени 16с; 2— при уставке срабатывания по времени 4с.

за счет энергии, запасенной в пружинах 14, или от воздействия электродинамических сил, создаваемых большими токами к. з.

Рассмотрим работу автоматического выключателя при первом виде автоматического отключения. Если ток в защищаемой цепи превысил уставку электромагнитного расцепителя, то якорь 24 этого расцепителя притягивается к сердечнику 25, ударяя при этом по кулачку отключающей рейки 19 и поворачивая ее. Аналогичное воздействие рейка может испытывать и при срабатывании полупроводникового расцепителя 20, получающего информацию о значении тока в контролируемой цепи от трансформаторов тока 23. При токах, недостаточных для срабатывания электромагнитного расцепителя, но превышающих уставку срабатывания полупроводникового расцепителя, последний срабатывает и передает отключающий сигнал независимому расцепителю 18, который через якорь 16 и боек 17 воздействует на отключающую рейку 19.

Полупроводниковые расцепители позволяют регулировать номинальный ток, уставку по току в зоне к. з. и время срабатывания, то есть имеется возможность изменять форму времятоковой характеристики (рис. 2.11). Регулировку осуществляют ручкой 21. Переключением штепсельных перемычек изменяют параметры срабаты-

вручную рукоятку из положения «включено» следует двигать вниз. Перемещения рукоятки 12, выполняемые для включения и отключения, через пружины 14 передаются ломающимся рычагам 10 и 11. Под воздействием пружин эти рычаги перебрасываются в одну или другую сторону от их мертвого положения, при этом замыкая или размыкая контакт 8 с контактом 7.

Автоматическое отключение происходит под действием расцепителей

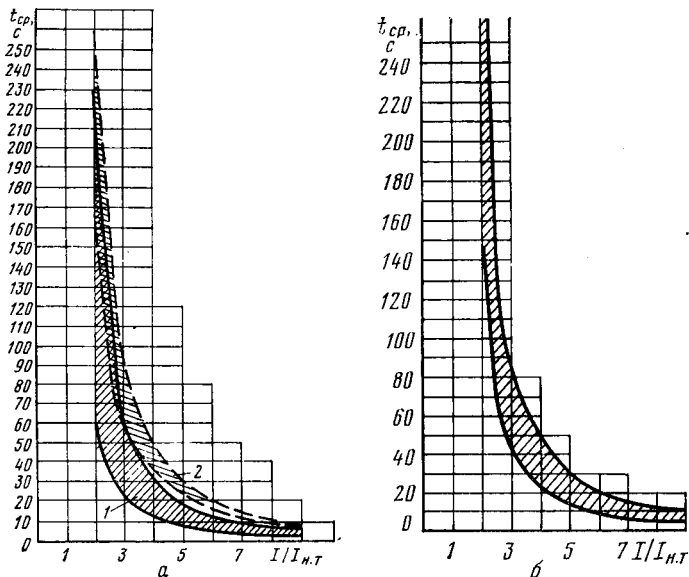


Рис. 2. 12. Защитные характеристики выключателей А3700 с тепловыми расцепителями:

а — для выключателей А3710Б; б — для выключателей А3720Б; 1 — с расцепителями на токи 10, 20, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160 А; 2 — на ток 25 А.

2.7. Основные технические данные токоограничивающих трехполюсных выключателей с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями

Тип исполнения выключателя	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток выключателя, А	Пределы регулирования номинального тока полупроводникового расцепителя, А	Пределы регулирования уставок полупроводникового расцепителя		Уставка по току электромагнитного расцепителя, А	Допускаемое отклонение тока уставки электромагнитных расцепителей, А
				кратности тока к. з. к номинальному току	времени срабатывания, с		
А3714Б	660	160	20...40 40...80 80...160	3...10	4...16	1600	±240
А3724Б	660	250	160...250	3...10	4...16	2500	±370

2.8. Основные технические данные токоограничивающих трехполюсных выключателей с тепловыми и электромагнитными расцепителями на номинальное напряжение 380 В

Типо-исполнение выключателя	Номинальный ток, А		Ток устав-ки электромагнитного расцепителя, А	Допускаемое отклонение тока устав-ки электромагнитных расцепителей, А
	выключателя	теплого расцепителя		
A3716Б	160	16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160	630 или 1600 *	± 125 ± 320
A3726Б	200	170	2000	± 400

* Для выключателей с тепловыми расцепителями на токи не ниже 32 А.

2.9. Основные технические данные трехполюсных выключателей исполнения А3710ФУЗ, А3720ФУЗ и А3730ФУЗ, имеющих номинальное напряжение 380 В

Тип выключателя	Номинальный ток теплового расцепителя, А	Ток срабатывания электромагнитного расцепителя, А	Предельный отключаемый ток, кА
A3716ФУЗ	16	630	3,9
	20	630	7,1
	25	630	10,6
	32, 40	630 или 1600	14,2
	50, 63, 80, 100, 125, 160	630 или 1600	1,77
A3726ФУЗ	160, 200	2500	24,8
A3736ФУЗ	250	2500	35,5
	320	320	35,5
	400	4000	35,5

вания независимого расцепителя. Ручки для регулирования и штепсельные переключатели закрыты прозрачной крышкой 22.

Вместо полупроводниковых расцепителей в автоматических выключателях серии А3700 можно устанавливать тепловые расцепители, имеющие другую форму

времятоковой характеристики (рис. 2.12). Основные технические данные тех типов выключателей, которые могут использоваться в сельских сетях напряжением 380/220 В, приведены в таблицах 2.7, 2.8 и 2.9.

2.3. ДРУГИЕ ВИДЫ АППАРАТОВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛ Я ЗАЩИТЫ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Кроме рассмотренных выше аппаратов для защиты от к. з. и перегрузок, в сельских сетях напряжением 380/220 В используются резьбовые предохранители типов ПРС, Ц-27, пробочные автоматические выключатели и др.

В ряде конструкций КТП10/0,4 кВ для повышения чувствительности защит к однофазным к. з. в нулевой провод линий, защищаемых автоматическими выключателями, включают токовое реле типа РЭ-571Т. При появлении однофазных к. з. это реле подает своими контактами питание на независимый расцепитель автоматического выключателя, который и отключает возникшее к. з. Ток срабатывания реле можно регулировать в пределах от 0,7 до 3 номинального тока данного реле.

В некоторых конструкциях КТП10/0,4 кВ с целью повышения чувствительности защит от к. з. применяют защиту типа ЗТ-0,4У2. Ее используют совместно с автоматическими выключателями АЗ100, АЗ700 и АЕ20, имеющими независимый расцепитель с напряжением срабатывания 36 В. Защита представляет собой приставку к выключателю, конструктивно выполненную в пылевлагозащищенном пластмассовом корпусе, в кото-

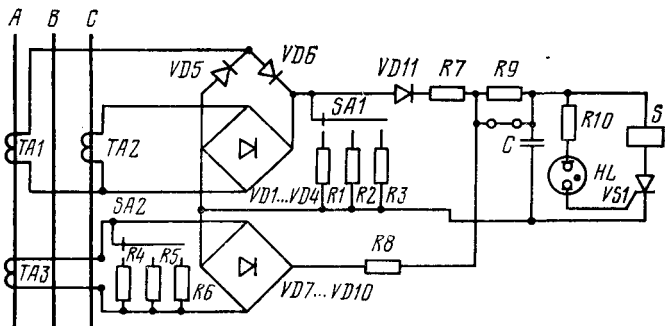


Рис. 2.13. Схема защиты типа ЗТ-0,4У2.

ром предусмотрено три сквозных отверстия для пропуска фазных проводов защищаемой линии. Размещают приставки в низковольтном шкафу КТП, каждую совместно с автоматическим выключателем, который она дополняет. На рисунке 2.13 приведена схема защиты ЗТ-0,44У2.

Защита реагирует как на междуфазные, так и на однофазные к. з. При междуфазных к. з. ток от трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$ выпрямляется диодами $VD1...VD6$ и подается на резисторы $R1...R3$. Переключателем $SA1$ можно включать резисторы $R1$, $R2$ или $R3$ и тем самым изменять ток срабатывания (уставку) защиты от междуфазных к. з. Соответственно трем резисторам имеется три уставки по току: 100, 160 и 250 А. Совокупность трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$, диодов $VD1...VD6$ и резисторов $R1...R3$ представляет собой преобразователь переменного тока в пропорциональное ему выпрямленное напряжение. Поэтому напряжение на выходе этого преобразователя зависит от тока в фазах защищаемой линии. От выпрямленного напряжения через разделительный диод $VD11$, резисторы $R7$ и $R9$ заряжается конденсатор C . Время заряда конденсатора зависит от его емкости и параметров резисторов $R7$ и $R9$ и может быть изменено в 2 раза путем шунтирования резистора $R9$.

В нормальных режимах напряжение на конденсаторе недостаточно для срабатывания защиты. При возникновении к. з. и увеличении токов в фазах почти одновременно увеличивается и напряжение на выходе преобразователя. Затем напряжение начинает постепенно увеличиваться и на конденсаторе C . Как только оно достигает напряжения срабатывания неоновой лампы HL , она зажигается, отпирает тиристор $VS1$ и вызывает разряд конденсатора C на катушку независимого расцепителя S . Расцепитель, срабатывая, отключает автоматический выключатель защищаемой линии.

При однофазных к. з., когда токи в фазах, даже в поврежденной, невелики, напряжение на выходе рассмотренного преобразователя чаще всего оказывается недостаточным для срабатывания защиты. Это обстоятельство всегда имеет место при однофазном к. з. в фазе B , в которой преобразователь не имеет трансформатора тока. Поэтому при однофазных к. з. сигнал для срабатывания защиты создается другим преобразователем, состоящим из трансформатора тока нулевой последовательности

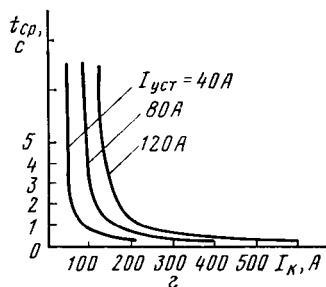
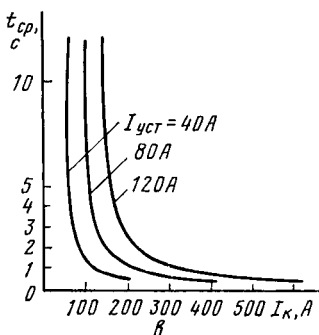
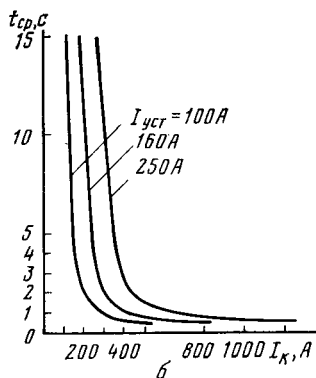
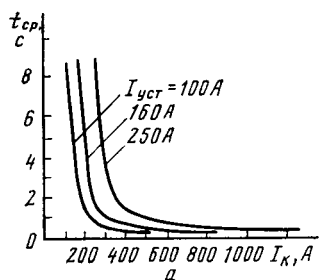


Рис. 2. 14. Защитные характеристики защиты ЗТ-0,4У2:

а — при междуфазных к. з. и $t_{уст} = 0,3$ с; б — при междуфазных к. з. и $t_{уст} = 0,6$ с; в — при однофазных к. з. и $t_{уст} = 0,3$ с; г — при однофазных к. з. и $t_{уст} = 0,6$ с.

ТАЗ, резисторов $R4...R6$ и диодов $VD7...VD10$. Через резисторы $R8$ и $R9$ выпрямленное напряжение от этого преобразователя также подается на конденсатор C . Параметры трансформатора тока ТАЗ и резисторов $R4...R6$ и $R8$ подобраны таким образом, чтобы при однофазных к. з., сопровождаемых гораздо меньшими токами, защита имела достаточную чувствительность, надежно срабатывала при к. з. и не срабатывала от сигнала, обусловленного несимметрией нагрузки.

Переключателем SA2 можно устанавливать соответствующие токи срабатывания защиты для однофазных к. з.: 40, 80, 120 А. Защита может срабатывать и при обрыве одного или двух фазных проводов. Защитные характери-

стики показаны на рисунке 2.14. Выдержка времени в независимой части характеристик может быть установлена 0,6 с (резистор $R9$ включен) или 0,3 с (резистор зашунтирован).

К недостаткам защиты следует отнести возможность ее отказа при однофазных замыканиях непосредственно на землю, когда вследствие довольно большого переходного сопротивления грунта в месте к. з. ток замыкания оказывается еще меньше, чем при замыкании в этом же месте фазы на нулевой провод или на корпус заземленного оборудования.

3. РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

3.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Короткие замыкания в сети напряжением 380/220 В генераторами мощных государственных энергосистем воспринимаются как незначительное изменение нагрузки. На рисунке 3.1 показано изменение во времени тока в одной фазе для случая, когда к. з. произошло в сети 380/220 В, питаемой от государственной энергосистемы через линии напряжением 10...20 кВ и трансформаторную подстанцию 10 (20)/0,4 кВ. Этот случай наиболее характерен для сетей 380/220 В, а такие к. з. называются удаленными.

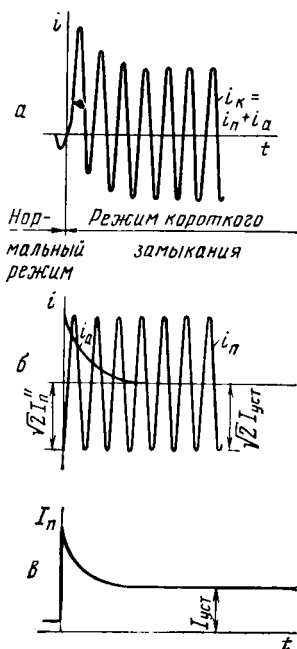


Рис. 3. 1. Изменение тока к. з. во времени при питании сети от мощной энергосистемы:

a — кривая изменения мгновенных значений тока к. з.; b — составляющие тока к. з. (i_a — аperiodическая; i_n — периодическая); I_n'' — начальное значение периодической составляющей тока к. з.; $I_{уст}$ — установившееся значение тока к. з.

Условно ток к. з. разделяют на две составляющие: периодическую $i_{\text{п}}$ и аperiodическую $i_{\text{а}}$ (рис. 3.1, б). Периодическая составляющая тока при удаленном к. з. представляет собой ток, изменяющийся по закону синуса. Следствием этого обстоятельства является равенство

$$I_{\text{п}}'' = I_{\text{уст}}'' \quad (3.1)$$

где $I_{\text{п}}''$ — начальное значение периодической составляющей тока к. з., $I_{\text{уст}}''$ — установившееся значение периодической составляющей тока к. з.

Аperiodическая составляющая всегда затухает довольно быстро и тем быстрее, чем больше доля активного сопротивления в полном сопротивлении до точки к. з.

Расчеты токов коротких замыканий можно выполнять для разных целей: выбора аппаратов защиты, проверки проводников по условиям допустимого нагрева, проверки электрических аппаратов на динамическую стойкость и т. д. В зависимости от целей расчета вычисляют то или иное значение или составляющую тока короткого замыкания. Например, для проверки аппаратов на динамическую стойкость вычисляют наибольшее из мгновенных значений тока к. з. — ударный ток $i_{\text{у}}$. Этого значения ток обычно достигает через полпериода промышленной частоты, то есть через 0,01 с после возникновения к. з.

Ударный ток вычисляют по формуле

$$i_{\text{у}} = \sqrt{2} k_{\text{у}} I_{\text{п}}'' \quad (3.2)$$

где $k_{\text{у}}$ — ударный коэффициент, определяемый по рисунку 3.2 в зависимости от соотношения индуктивного и активного сопротивлений в конкретной цепи к. з.

Для выбора аппаратов защиты чаще всего используют значение периодической составляющей тока в начальный момент времени $I_{\text{п}}''$, для проверки проводников по условию допустимого нагрева $I_{\text{уст}}''$.

Как было отмечено, в подавляющем большинстве случаев источником электрической энергии для сельских сетей напряжением

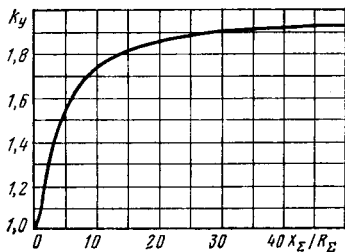


Рис. 3. 2. Зависимость ударного коэффициента от отношения X_{Σ}/R_{Σ} .

380/220 В являются государственные энергосистемы, причем к. з. в сельских сетях будут удаленными для генераторов системы. Основной задачей расчета токов к. з. в таких случаях является вычисление периодической составляющей тока в начальный период времени к. з. $I''_п$. Остальные величины, характеризующие процесс к. з., вычисляют по соотношениям (3.1) и (3.2).

При этом для оценки чувствительности защитных устройств требуется вычислять минимально возможные, а для проверки этих же устройств на коммутационную способность и электродинамическую стойкость — максимально возможные токи к. з., под воздействием которых может оказаться защитный аппарат. Так, для выбора защитного аппарата, устанавливаемого в точке *в* сети, показанной на рисунке 1.1, требуется рассчитать токи к. з. в наиболее удаленных точках защищаемой сети *е*, *ж*, *з*, где токи к. з. ожидаются наименьшими, и в точке *е* где ток к. з. для этого аппарата ожидается наибольшим.

3.2. СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Расчет токов к. з. начинают с составления расчетной схемы. Расчетной называют представленную в условных графических изображениях схему электрических соединений элементов электрической сети, влияющих на силу токов к. з. В расчете токов к. з. в сети напряжением 380/220 В одним из основных элементов, который оказывает влияние на ток к. з., является силовой трансформатор. Все предшествующие элементы (линия 10...20 кВ, трансформатор районной подстанции) условно показывают источником э. д. с. с внутренним сопротивлением, равным нулю. Значение э. д. с. принимают равным значению среднего номинального напряжения, которое на 5% выше номинального напряжения сети, то есть 400 В междуфазное и 230 В фазное.

Следующим основным элементом, существенно влияющим на ток к. з., является линия. На расчетной схеме необходимо указывать марки проводов, длины участков линии, площадь поперечного сечения нулевого и фазных проводов. Если при расчете ударного тока к. з. нужно учесть влияние на его значение подпитки от мощных электродвигателей, то на расчетную схему наносят и наибо-

лее мощные электродвигатели, находящиеся в непосредственной близости от точки к. з.

На значение тока к. з. в сетях напряжением 380/220 В влияют также сопротивления шин, трансформаторов тока, токовых катушек автоматических выключателей, переходные сопротивления контактов. Эти элементы необходимо отображать на расчетных схемах, если рассчитываются короткие замыкания в сети, питаемой через трансформатор мощностью 100 кВ × А и более. При расчетах токов трехфазных к. з. в сети, питающейся от трансформаторов меньшей мощности, эти элементы можно учитывать в случаях, когда рассчитываются токи в точках к. з., расположенных на шинах этих трансформаторов.

Расчетную схему составляют в однолинейном изображении. Каждый элемент на расчетной схеме обозначают буквой. Например, на рисунке 3.3, *а* обозначены: *С* — система (источник питания), *Т* — трансформатор силовой, *ТТ* — трансформатор тока, *В* — выключатель автоматический, *Ш* — шины, *Л* — линия, *Д* — электродвигатель. Точку (место) к. з. обозначают условным знаком и буквой *К*. На схеме может быть нанесено, если это необходимо, несколько точек к. з. На рисунке 3.3 приведены три расчетные схемы, составленные для одной и той же точки к. з. некоторой сети. Схема *а* — наиболее полная. В ней учтены все элементы, влияющие на силу тока к. з. В схеме *б* не учитывается подпитка от электродвигателя, а в схеме *в* не показаны автоматы, трансформаторы тока, шины.

В качестве исходных данных, кроме расчетной схемы, необходимы еще соответствующие сведения о каждом из ее элементов. Так, для силовых трансформаторов такими сведениями являются номинальная мощность S_n , напряжение короткого замыкания u_k , потери мощности корот-

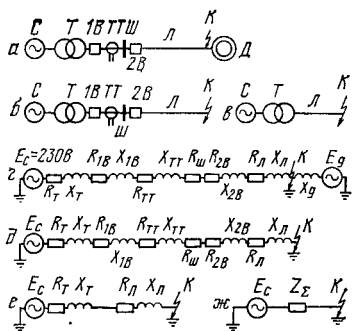


Рис. 3.3. Расчетные схемы (*а, б, в*) и соответствующие им схемы замещения (*г, д, е*):

ж — вид схемы замещения после ее преобразования.

кого замыкания P_k , схемы соединения обмоток высшего и низшего напряжения; для каждого участка линии — длина, марка и площадь поперечного сечения проводов (фазных и нулевого). Для шин указывают материал, из которого они изготовлены, площадь их поперечного сечения и длину. В комплектных трансформаторных подстанциях используют алюминиевые шины. Длину их можно принимать равной 1,5 м. В качестве исходных об автоматических выключателях и трансформаторах тока приводят сведения об их марках и первичном номинальном токе. Из данных об электродвигателях для расчета токов к. з. нужны их номинальная мощность и кратность пускового тока. Все указанные сведения требуются для того, чтобы по соответствующим формулам вычислить или по справочным материалам определить сопротивление каждого из элементов, входящих в расчетную схему.

Весьма важным этапом в расчете токов к. з. является составление схемы замещения и определение значений сопротивлений, входящих в нее. Схему замещения составляют для одной фазы на основе расчетной схемы. В ней каждый элемент расчетной схемы представлен соответствующим образом. Источники, питающие токочку к. з. (мощная система, генератор, электродвигатели в начальный момент к. з.), представляют на схеме замещения э. д. с. и соответствующим сопротивлением. Для мощной системы э. д. с. принимают равной 230 В, а сопротивление — нулю. Остальные элементы расчетной схемы представляют только соответствующими сопротивлениями.

Элементы электроустановок обладают активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями; в сочетании они составляют полное сопротивление элемента. При расчетах токов к. з. в сетях напряжением 380/220 В учитывают только активные и индуктивные сопротивления. При этом есть элементы, у которых активное сопротивление очень мало (электродвигатели, генераторы, трансформаторы мощностью более 400 кВ·А). Такие элементы расчетной схемы на схеме замещения представляют только индуктивными сопротивлениями.

На значение сопротивления трехфазных элементов электроустановок оказывает влияние ряд факторов и прежде всего — конструктивное исполнение самой электроустановки. Например, полное сопротивление воздушной линии зависит от материала, площади поперечного

сечения и длины проводов, расстояния между ними. Кроме того, значение сопротивления трехфазных электроустановок зависит и от того, трехфазными токами какой последовательности они обтекаются. Есть три последовательности трехфазных токов — прямая, обратная и нулевая. Сопротивления элементов электроустановок, не имеющих вращающихся частей (линий, трансформаторов), одинаковы для токов прямой и обратной последовательности. Только у вращающихся электрических машин (генераторов, электродвигателей) сопротивление токам обратной последовательности отличается от сопротивления токам прямой последовательности.

Почти у всех элементов электроустановок сопротивление токам нулевой последовательности значительно отличается от сопротивления этих элементов токам прямой последовательности. Например, для воздушных линий это сопротивление в несколько раз превышает сопротивление токам прямой последовательности. Для потребительских трансформаторов 10...20/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Υ сопротивление токам нулевой последовательности в 6...10 раз выше, чем для токов прямой. Сопротивления трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Υ или Δ/Υ для токов нулевой и прямой последовательностей примерно одинаковые. Вот почему с точки зрения снижения потерь напряжения при несимметричных нагрузках, а значит, и улучшения качества электроэнергии у потребителей всегда отдают предпочтение трансформаторам со схемой Y/Υ или Δ/Υ . Кроме того, трансформаторы с соединением обмоток Y/Υ (как и Δ/Υ), имея сравнительно малое сопротивление токам нулевой последовательности, обеспечивают при однофазных к. з. в сети напряжением 380/220 В довольно высокий уровень токов и тем самым улучшают условия для надежной работы защитных аппаратов.

Большое сопротивление токам нулевой последовательности у трансформаторов с соединением обмоток Y/Υ существенно ограничивает токи однофазных коротких замыканий. При неправильно выполненной на напряжении 0,4 кВ защите трансформатор оказывается не защищенным от опасного термического воздействия токов при однофазном к. з. При таких к. з. сила тока недостаточна для своевременного, то есть быстрого, перегорания вставок предохранителей на низшем напряжении, а плавкие вставки на высшем напряжении, как правило,

оказываются совершенно нечувствительными к однофазным к. з. в сети напряжением 380/220 В или в лучшем случае перегорают за слишком большое время. При этом изоляция трансформатора перегревается до недопустимых пределов, что резко снижает срок его службы.

В связи с таким серьезным недостатком трансформаторов, имеющих соединение обмоток Y/Υ , для электрообеспечения сельского хозяйства в ближайшие годы будут применяться в основном трансформаторы со схемой Y/Υ . В общем случае при нормальном режиме в фазах четырехпроводной сети напряжением 380/220 В протекают неравные, точнее, несимметричные токи, которые содержат составляющие токов всех трех последовательностей. Расчет таких режимов довольно сложен.

С учетом ряда допущений можно считать, что при трехфазном коротком замыкании по аварийному участку протекают токи только прямой последовательности, расчет которых не представляет особых трудностей. Гораздо сложнее точный расчет двухфазных и особенно однофазных коротких замыканий. Например, можно полагать, что при однофазных к. з. в каждой фазе на аварийном участке электроустановки циркулируют токи всех последовательностей. Суммируясь определенным образом в поврежденной фазе, они обуславливают ток к. з. Сумма же этих токов в двух других фазах равна току нагрузки или нулю, если ток нагрузки при расчете к. з. пренебрегают. Вследствие того что точный расчет такого несимметричного режима затруднителен, для расчета токов при однофазных к. з. пользуются упрощенными формулами, а ток двухфазного к. з. вычисляют, исходя из тока трехфазного к. з. в интересующей точке сети.

Активное и индуктивное сопротивления линий вычисляют по формулам:

$$R_{\pi} = r_0 l, \quad (3.3)$$

$$X_{\pi} = x_0 l, \quad (3.4)$$

где R_{π} — активное сопротивление фазного провода линии, мОм; X_{π} — индуктивное сопротивление линии, мОм; r_0 , x_0 — соответственно активное и индуктивное сопротивление 1 м проводов или кабелей рассматриваемой линии, мОм/м; значения r_0 и x_0 принимаются по справочным данным в зависимости от материала и площади поперечного сечения провода или жил кабеля (прил. 2 и 3); l — длина линии, м.

В тех случаях, когда отсутствуют справочные данные о сопротивлении r_0 , его значение можно подсчитать по

формуле

$$r_0 = \frac{\rho}{F} 10^{12},$$

где ρ — удельное сопротивление материала провода, Ом·км; F — поперечное сечение проводника, мм². Для проводов с медной жилой $\rho=18,9 \cdot 10^{-12}$ Ом·км, с алюминиевой — $\rho=31,2 \cdot 10^{-12}$ Ом·км.

Сопротивления трансформаторов рассчитывают по формулам:

$$Z_T = \frac{u_k U^2}{100 S_T}, \quad (3.5)$$

$$R_T = \frac{P_k U^2}{S_T^2}, \quad (3.6)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}. \quad (3.7)$$

Здесь R_T , X_T и Z_T — соответственно активное, индуктивное и полное сопротивления трансформатора, мОм; P_k — потери короткого замыкания, кВт; u_k — напряжение короткого замыкания, %; $U=400$ В — номинальное напряжение; S_T — номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Сопротивления остальных элементов электроустановок (трансформаторов тока, катушек автоматических выключателей, контактов) принимают по справочным данным.

3.3. РАСЧЕТЫ ТОКОВ К.З. ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В

Для расчета токов к. з. сколь угодно сложная схема замещения должна быть преобразована, упрощена до вида, представленного на рисунке 3.3, ж. В этой схеме источник э. д. с. отделен от рассчитываемой точки к. з. результирующим сопротивлением Z_Σ . Важно, конечно, не само преобразование схемы замещения, а определение значения результирующего сопротивления. Для вычисления результирующего полного сопротивления Z_Σ в схеме с последовательным соединением всех сопротивлений (например, в схеме рис. 3.3, е) нужно просуммировать отдельно все активные сопротивления и все индуктивные. В итоге определяются результирующее активное R_Σ и результирующее индуктивное X_Σ сопротивления. Полное результирующее сопротивление (мОм) вычисляют по формуле

$$Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}. \quad (3.8)$$

Ток трехфазного к. з. (кА)

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\Sigma}} = \frac{230}{Z_{\Sigma}}, \quad (3.9)$$

где $U_{\phi}=230$ В — фазное напряжение.

Ток двухфазного короткого замыкания для той же точки к. з. рассчитывают по выражению

$$I_{\kappa}^{(2)} = 0,87 I_{\kappa}^{(3)}. \quad (3.10)$$

Ток однофазного к. з. — фазного провода на нулевой — принято вычислять по упрощенной формуле, рекомендуемой ПУЭ:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{п}} + \frac{1}{3} Z_{\text{T}}^{(1)}} = \frac{230}{Z_{\text{п}} + \frac{1}{3} Z_{\text{T}}^{(1)}}, \quad (3.11)$$

где $Z_{\text{п}}$ — сопротивление короткозамкнутой петли фаза — нуль (МОм) для воздушной четырехпроводной линии напряжением 380/220 В определяют умножением сопротивления 1 м петли фазный — нулевой провод $Z_{\text{п0}}$ (прил. 4) на длину петли $l_{\text{м}}$: $Z_{\text{п}} = Z_{\text{п0}} l_{\text{м}}$; $Z_{\text{T}}^{(1)}$ — сопротивление трансформатора при однофазном к. з. (МОм), значения $\frac{1}{3} Z_{\text{T}}^{(1)}$ для наиболее распространенных в сельском электроснабжении силовых трансформаторов приведены в приложении 1.

Из-за наличия повторных заземлений расчеты токов однофазных к. з. на землю для сетей напряжением 380/220 В оказываются довольно сложными, и их не выполняют для целей расчета защиты от к. з. Токи различных видов к. з., рассчитанные для одной точки сети, находятся в следующем соотношении: $I_{\kappa}^{(2)} = 0,87 I_{\kappa}^{(3)}$; $I_{\kappa}^{(3)} > I_{\kappa}^{(1)}$, и при этом чаще всего $I_{\kappa}^{(2)} > I_{\kappa}^{(1)}$. Таким образом, для каждой точки сети 380/220 В, питаемой от мощной энергосистемы, $I_{\kappa}^{(3)} > I_{\kappa}^{(2)} > I_{\kappa}^{(1)}$, то есть ток однофазного к. з. является наименьшим.

Пример 3.1. Рассчитать токи трех-, двух- и однофазного к. з. на шинах подстанции и в конце питающейся от этой подстанции че-

тырехпроводной линии длиной 120 м. Исходные данные: трансформатор ТМ-160 со схемой соединения обмоток $Y/Y-0$ имеет потери короткого замыкания $P_{\kappa}=2,65$ кВт, напряжение короткого замыкания $u_{\kappa}=4,5\%$; фазные провода А50, нулевой — А35. Нарисуем расчетную и соответствующую ей схемы замещения (рис. 3.4) без учета сопротивлений трансформаторов тока, шин, коммутационных аппара-

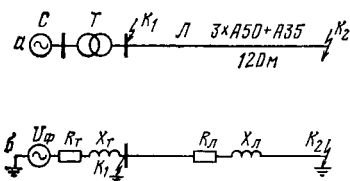


Рис. 3. 4. Схемы к примеру 3. 1: а — расчетная; б — схема замещения.

тов и переходного сопротивления контактов. Определим сопротивления R_T , X_T , R_L , X_L . По данным приложения 1 $R_T=16,7$ мОм; $X_T=42,0$ мОм; $Z_T=45$ мОм; $\frac{1}{3}Z_T^{(1)}=162$ мОм. Из приложений 2 и 4 находим $r_o=0,576$ мОм/м; $X_o=0,353$ мОм/м; $Z_{по}=2,05$ мОм/м. Сопротивления Z_T , R_T и X_T вычисляются по формулам (3.5. . . 3.7):

$$Z_T = \frac{u_k U^2}{100 S_T} = \frac{4,5 \cdot 400^2}{100 \cdot 160} = 45 \text{ мОм};$$

$$R_T = \frac{P_k U^2}{S_T^2} = \frac{2,65 \cdot 400^2}{160^2} = 16,7 \text{ мОм};$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{45^2 - 16,7^2} = 41,8 \text{ мОм}.$$

Далее пользуемся значениями Z_T , R_T и X_T , определенными по приложению 1. По формулам (3.3) и (3.4) находим $R_L \approx r_o l = 0,576 \times 120 = 69,12$ мОм; $X_L = X_o l = 0,353 \cdot 120 = 42,36$ мОм; $Z_n = Z_{по} l = 2,05 \times 120 = 246$ мОм. Вычисляем R_Σ , X_Σ и Z_Σ до точки K_2 : $R_\Sigma = R_T + R_L = 16,7 + 69,12 = 85,82$ мОм; $X_\Sigma = X_T + X_L = 42 + 42,36 = 84,36$ мОм;

$$Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} = \sqrt{85,82^2 + 84,36^2} = 120,34 \text{ мОм}.$$

По соотношениям (3.9), (3.10) и (3.11) вычисляем токи к. з. в точке K_2 :

$$I_{K_2}^{(3)} = \frac{U_\Phi}{Z_\Sigma} = \frac{230}{120,34} = 1,91 \text{ кА};$$

$$I_{K_2}^{(2)} = 0,87 I_{K_2}^{(3)} = 0,87 \cdot 1,91 = 1,66 \text{ кА};$$

$$I_{K_2}^{(1)} = \frac{U_\Phi}{Z_n + \frac{1}{3} Z_T^{(1)}} = \frac{230}{246 + 162} = 0,564 \text{ кА}.$$

Для точки K_1 $Z_\Sigma = Z_T$ и $Z_n = 0$; поэтому

$$I_{K_1}^{(3)} = \frac{U_\Phi}{Z_\Sigma} = \frac{230}{45} = 5,11 \text{ кА};$$

$$I_{K_1}^{(2)} = 0,87 I_{K_1}^{(3)} = 0,87 \cdot 5,11 = 4,45 \text{ кА};$$

$$I_{K_1}^{(1)} = \frac{U_\Phi}{\frac{1}{3} Z_T^{(1)}} = \frac{230}{162} = 1,42 \text{ кА}.$$

3.4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ТОКОВ К. З.

ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В, ВНУТРЕННИХ ПРОВОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ И СЕТЕЙ СО СТАЛЬНЫМИ ПРОВОДАМИ

Для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей на напряжении 380 В начинают применяться кабельные линии. Кабельные сети не портят ценных

сельскохозяйственных угодий, имеют высокую надежность главным образом потому, что не подвержены в такой степени, как воздушные, грозовым явлениям. Кабельные сети напряжением 380/220 В применяют для электроснабжения мощных животноводческих комплексов, птицефабрик, тепличных комбинатов. Одиночные кабельные линии можно использовать и для менее ответственных потребителей. Кроме того, кабелем или изолированным проводом выполняют внутренние проводки в сельскохозяйственных производственных помещениях.

Порядок расчета токов к. з. для кабельных электрических сетей такой же, как и для воздушных. Особенность расчета состоит в том, что кабельные линии представляют на схемах замещения другими сопротивлениями. Это обусловлено тем, что кабельные линии оказывают переменному току иное сопротивление, чем воздушные с проводами такого же сечения, причем существенно отличаются индуктивные сопротивления. Это отличие обусловлено гораздо меньшими расстояниями между токоведущими жилами в кабеле и геометрическими размерами поперечного сечения самих жил. Отличаются от индуктивного сопротивления воздушных линий и индуктивные сопротивления проводок, выполненных в трубах или на роликах. Особенно эти различия сказываются на индуктивном сопротивлении петли фазный — нулевой провод. Эти обстоятельства учитывают в расчетах токов к. з. посредством вычисления фактических сопротивлений кабельных линий или внутренних проводок по соответствующим исходным данным (прил. 3 и 5). Средние значения индуктивных сопротивлений 1 м петли фазный — нулевой провод линий напряжением 380/220 В, выполненных проводами или кабелем из цветных металлов, приведены ниже:

Конструктивное выполнение линии	Индуктивное сопротивление $X_{\text{по}}$, Ом/м (Ом/км)
Кабель или провода, проложенные в трубах	0,15
Изолированные провода на роликах	0,4
Провода на изоляторах внутри помещений, по наружным стенам здания	0,5
Воздушные линии	0,6

На слабо нагруженных участках воздушных сетей 380/220 В можно использовать стальные многопроволоч-

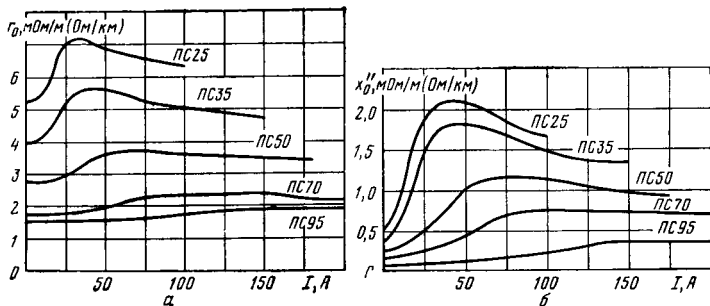


Рис. 3. 5. Зависимость сопротивления стальных проводов от протекающего по ним тока:

а — для активного сопротивления; б — для внутреннего индуктивного.

ные провода. Как известно, значение активного и индуктивного сопротивления стальных проводов зависит от протекающего по ним тока (рис. 3.5). Активное сопротивление стального провода можно определить по кривым на рисунке 3.5, а или по справочным данным [5].

Индуктивное сопротивление стальных проводов складывается из двух составляющих: внешнего индуктивного сопротивления X'_0 , такого же, как и для линий с проводами из цветных металлов, и внутреннего индуктивного сопротивления X''_0 , обусловленного ферромагнитными свойствами материала провода, то есть $X_0 = X'_0 + X''_0$. Внутреннее индуктивное сопротивление стальных проводов, как и активное, определяется по соответствующим кривым или по справочным данным в зависимости от значения протекающего по проводам тока [5].

Поскольку ток к. з. сам является предметом расчета, то неизвестно, каким значением активного и индуктивного сопротивления надо представлять стальные провода в схеме замещения. Для упрощения расчетов поэтому принято вводить в схему замещения стальные провода некоторыми средними значениями сопротивлений (табл. 3.1), а затем, если появится необходимость в уточнении, по справочным данным уточняют сопротивления стальных проводов и расчет повторяют.

В таблице 3.1 сопротивления 1 м петли фазный — нулевой провод приведены для площади поперечного сечения нулевого провода такого же, как и фазного. Приближенное значение сопротивления 1 м петли фаза — нуль при других сочетаниях сечений проводов в петле можно получить, суммируя полное сопротивление фазного и

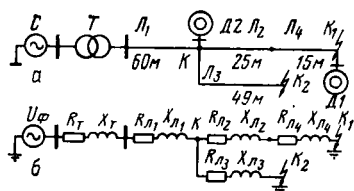


Рис. 3. 6. Схемы к примеру 3. 2:
а — расчетная; б — схема замещения.

соответственно полные сопротивления (мОм/м) 1 м фазного и нулевого проводов.

Активное и индуктивное сопротивления стальных проводов значительно превышают соответствующие параметры проводов из цветных металлов такого же сечения. Это приводит к тому, что уровень токов к. з. в сетях со стальными проводами существенно ниже, что, в свою очередь, затрудняет выполнение чувствительной защиты этой сети от коротких замыканий.

3.1. Средние значения сопротивлений 1 м стальных многопроволочных проводов для воздушных линий напряжением 380/220 В, мОм/м (Ом/км)

Марка провода номинальное сечение, мм ²	Активное сопротивление R_0	Внешнее индуктивное сопротивление X'_0	Внутреннее индуктивное сопротивление X''_0	Полное сопротивление Z''_0	Сопротивление петли фазный — нулевой провод $Z_{п0}$
ПС25	6,2	0,376	1,4	6,45	14,0
ПС25	4,5	0,362	1,2	4,76	10,3
ПС50	3,3	0,353	0,6	3,43	7,6
ПС70	2,1	0,341	0,4	2,23	4,8

Пример 3.2. Рассчитать токи к. з. в точках K_1 и K_2 сети напряжением 380/220 В, схема которой приведена на рисунке 3.6. Питающий трансформатор ТМ-63 имеет схему соединения $Y/\sqrt{3}$. Сеть выполнена на участках L_1 и L_2 проводами 3·А35+А25, на участке L_3 — проводами 3·ПС35+ПС25 и на участке L_4 — кабелем АВВГ с площадью сечения фазных жил 25 и нулевой 16 мм². На рисунке 3.6 изображена соответствующая схема замещения. По приложению 1 определяем сопротивления трансформатора: $R_T=61$ мОм; $X_T=103$ мОм; $\frac{1}{3} Z_T^{(1)}=88$ мОм. Из приложений 2, 3, 4, 5 и таблицы 3.1 находим сопротивления 1 м для каждого участка линии, мОм/м:

для участков L_1 и L_2 — $r_{01}=0,83$; $x_{01}=0,362$; $z_{п01}=2,79$;

для участка L_3 — $r_{03}=4,5$; $x_{03}=1,562$; $z_{п03}=10,3$;

для участка L_4 — $r_{04}=1,54$; $x_{04}=0,072$; $z_{п04}=3,26$.

По формулам (3.3), (3.4) вычисляем сопротивления участков L_1, L_2, L_3, L_4 , мОм:

$$R_{л1} = 0,83 \cdot 60 = 49,8; \quad X_{л1} = 0,362 \cdot 60 = 21,72;$$

$$R_{л2} = 0,83 \cdot 25 = 20,75; \quad X_{л2} = 0,362 \cdot 25 = 9,05;$$

$$R_{л3} = 4,5 \cdot 42 = 189; \quad X_{л3} = 1,562 \cdot 42 = 65,6;$$

$$R_{л4} = 1,54 \cdot 15 = 23,1; \quad X_{л4} = 0,072 \cdot 15 = 1,08;$$

$$Z_{п1} = 2,79 \cdot 60 = 167,4;$$

$$Z_{п2} = 2,79 \cdot 25 = 69,25;$$

$$Z_{п3} = 10,3 \cdot 42 = 432,6;$$

$$Z_{п4} = 3,26 \cdot 15 = 48,9.$$

Определяем результирующие сопротивления до точки K_1 :

активное $R_{\Sigma 1} = R_r + R_{л1} + R_{л2} + R_{л4} = 61 + 49,8 + 20,75 + 23,1 = 154,65$ мОм;

индуктивное $X_{\Sigma 1} = X_r + X_{л1} + X_{л2} + X_{л4} = 103 + 21,72 + 9,05 + 1,08 = 134,85$ мОм;

полное $Z_{\Sigma 1} = \sqrt{R_{\Sigma 1}^2 + X_{\Sigma 1}^2} = \sqrt{154,65^2 + 134,85^2} = 205,19$ мОм;

сопротивление петли фазный — нулевой провод

$$Z_n = Z_{п1} + Z_{п2} + Z_{п4} = 167,4 + 69,25 + 48,9 = 286,05 \text{ мОм.}$$

Вычисляем токи к. з. для точки K_1 :

$$I_{K_1}^{(3)} = \frac{U_\Phi}{Z_{\Sigma 1}} = \frac{230}{205,19} = 1,12 \text{ кА}; \quad I_{K_1}^{(2)} = 0,87 \quad I_{K_1}^{(3)} = 0,87 \times$$

$$\times 1,12 = 0,975 \text{ кА}; \quad I_{K_1}^{(1)} = \frac{U_\Phi}{Z_n + \frac{1}{3} Z_r} = \frac{230}{286,05 + 88} =$$

$= 0,615 \text{ кА.}$

Аналогично подсчитываем результирующие сопротивления до точки K_2 :

активное $R_{\Sigma 2} = R_r + R_{л1} + R_{л3} = 61 + 49,8 + 189 = 299,8$ мОм;

индуктивное $X_{\Sigma 2} = X_r + X_{л1} + X_{л3} = 103 + 21,72 + 65,6 = 190,32$ мОм;

полное $Z_{\Sigma 2} = \sqrt{R_{\Sigma 2}^2 + X_{\Sigma 2}^2} = \sqrt{299,8^2 + 190,32^2} = 355,11$ мОм;

сопротивление петли фазный — нулевой провод

$$Z_n = Z_{п1} + Z_{п3} = 167,4 + 432,6 = 600 \text{ мОм.}$$

Токи к. з. для точки K_2 :

$$I_{K_2}^{(3)} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Sigma 2}} = \frac{230}{355,11} = 0,648 \text{ кА}; \quad I_{K_2}^{(2)} = 0,87 \cdot 0,648 = \\ = 0,563 \text{ кА}; \quad I_{K_2}^{(1)} = \frac{U_{\Phi}}{Z_n + \frac{1}{3} Z_T^{(1)}} = \frac{230}{600 + 88} = 0,334 \text{ кА}.$$

Если бы питающий трансформатор имел схему Y/Υ (то есть $\frac{1}{3} Z_T^{(1)} = 411 \text{ МОм}$), то ток однофазного к. з. в точке K_2 составлял бы:

$I_{K_2}^{(1)} = \frac{230}{600 + 411} = 0,227 \text{ кА}$, что примерно на $\frac{1}{3}$ меньше, чем от трансформатора со схемой Y/Υ .

3.5. ПРОВЕРКА ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Токи к. з., протекая по проводам и кабелям, быстро нагревают токоведущие жилы. Повышение температуры, в свою очередь, ведет к снижению механической прочности проводов, разложению изоляции, потере изоляцией электрических и механических свойств. ПУЭ ограничивают допустимые для проводников сети напряжением 380/220 В температуры нагрева при к. з. до следующих пределов:

для кабелей и изолированных проводов с полихлорвиниловой или резиновой изоляцией с медными или алюминиевыми жилами	150 °С
для алюминиевых неизолированных проводов при тяжениях более 9,81 МПа	160 °С

В соответствии с ПУЭ проводники сетей напряжением 380/220 В не требуется проверять на термическую устойчивость при к. з. Этот вывод справедлив для промышленных и городских электрических сетей с довольно высокими уровнями токов к. з. Но опыт эксплуатации сельских сетей 380/220 В показал, что из-за малой кратности токов к. з. в них значительно увеличивается время отключения коротких замыканий, что в итоге иногда приводит к недопустимому перегреву проводов и кабелей. Поэтому целесообразно проверять провода и кабели сельских сетей напряжением 380/220 В на термическую устойчивость к действию токов к. з. Проверять можно по кривым, приведенным на рисунке 3.7. Кривые представляют собой зависимость допускаемого значения тока трехфазного к. з. $I_{к}^{(3)}$ от длительности циркуляции этого тока

по проводам при условии, что температура токоведущей жилы провода при этом достигает, но не превосходит предельных значений, регламентируемых ПУЭ.

Порядок пользования кривыми объясняется на примере. Пусть требуется определить термическую устойчивость проложенного по стенам производственного помещения кабеля АВРГ с площадью поперечного сечения 25 мм^2 , который обтекается током к. з. $I_k^{(3)} = 900 \text{ А}$ в течение времени $t_k = 1,5 \text{ с}$. Поскольку при указанном способе прокладки кабеля тяжение будет менее $9,81 \text{ МПа}$, то пользоваться следует сплошной кривой для площади сечения 25 мм^2 . По току $I_k^{(3)} = 0,9 \text{ кА}$ и времени $t_k = 1,5 \text{ с}$ определяем точку с этими координатами на рисунке 3.7. Поскольку она находится ниже кривой, характеризующей термическую устойчивость кабелей с площадью поперечного сечения $F = 25 \text{ мм}^2$, то проверяемый кабель будет термически устойчив.

Проверку проводников на термическую устойчивость можно выполнять также по формуле

$$F_T = I_k^{(3)} \frac{\sqrt{t_k}}{C}, \quad (3.12)$$

где F_T — площадь поперечного сечения, обеспечивающая термическую устойчивость провода или кабеля при заданном токе к. з. $I_k^{(3)}$, мм^2 ; $I_k^{(3)}$ — наибольший ток трехфазного к. з., который может обтекать проверяемый кабель в данной электроустановке, расчетную точку для вычисления этого тока выбирают в начале проверяемого кабеля, А; t_k — время отключения короткого замыкания, с; C — постоянная величина, зависящая от номинального напряжения проводов и кабелей, материала их токоведущих жил и устанавливаемых ПУЭ допустимых температур нагрева жил в нормальном режиме и при к. з.; для проводов и кабелей сельских распределительных сетей напряжением $380/220 \text{ В}$ с алюминиевыми жилами можно принимать $C = 69,5$, с медными жилами — $C = 105$.

Если проверяемый на термическую устойчивость провод или кабель защищен от к. з. автоматическим выключо-

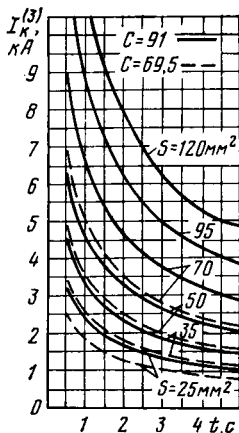


Рис. 3. 7. Кривые для проверки алюминиевых проводов и кабелей на термическую устойчивость (по данным института «Сельэнергопроект»).

чателем, то время t_k следует определять как сумму времени срабатывания теплового расцепителя t_p при соответствующем токе $I_k^{(3)}$ и времени отключения самого автоматического выключателя t_0 , которое берут с определенным запасом для всех типов выключателей, равным 0,05 с. Значение t_p определяют по защитным характеристикам автоматических выключателей.

В тех случаях, когда защитными аппаратами для проверяемого кабеля являются предохранители, время t_k определяют по защитной характеристике данного типа предохранителя с соответствующим номинальным током плавкой вставки с учетом значения тока к. з. $I_k^{(3)}$, отключаемого предохранителем.

Если площадь сечения F_T , вычисленная по формуле (3.12), окажется меньше, чем фактическая, то проверяемый кабель будет термически устойчив к действию тока к. з. Проиллюстрируем использование формулы (3.12) для условий вышеприведенного примера:

$$F_T = I_k^{(3)} \frac{\sqrt{t_k}}{C} = 900 \frac{1,5}{69,5} = 15,86 \text{ мм}^2.$$

Так как $15,86 < 25$, условие термической устойчивости кабеля АВРГ с площадью поперечного сечения 25 мм^2 к току 900 А, отключаемого за время 1,5 с, выполняется.

Пример 3.3. Проверить термическую устойчивость кабеля марки АПВГ с площадью поперечного сечения 35 мм^2 , защищенного предохранителями ПН2 с номинальным током плавкой вставки 120 А. Ток при трехфазном к. з. в начале кабеля равен 500 А.

По ампер-секундным характеристикам предохранителей ПН2 определяем, что плавкая вставка на ток 120А перегорит при токе к. з. 500 А за 2 с, то есть $I_k^{(3)} = 500 \text{ А}$, $t_k = 2 \text{ с}$. На рисунке 3.7 находим точку с координатами $I_k^{(3)} = 0,5 \text{ кА}$ и $t_k = 2 \text{ с}$, которая лежит значительно ниже кривой для площади сечения 35 мм^2 , что свидетельствует о достаточной термической устойчивости проверяемого кабеля. К этому же выводу мы бы пришли, если бы проверку выполняли по формуле (3.12):

$$F_T = I_k^{(3)} \frac{\sqrt{t_k}}{C} = 500 \frac{\sqrt{2}}{69,5} = 10,17 \text{ мм}^2.$$

Поскольку $F_T = 10,17 < 35$, то очевидно, что проверяемый кабель имеет достаточно большой запас термической устойчивости.

3.6. РАСЧЕТ ТОКОВ К.З. ДЛЯ СЕТИ, ПИТАЕМОЙ ОТ РЕЗЕРВНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения наиболее ответственных потребителей электрической энергии во многих хозяйствах применяются резервные ди-

зельные электростанции (ДЭС). При нарушении централизованного электроснабжения электроэнергия таким погребителям подается от ДЭС. По сравнению с расчетом токов к. з. для сети, питаемой от мощной энергосистемы, расчет токов к. з. при питании от ДЭС имеет ряд особенностей.

Эти особенности обусловлены тем, что на характер изменения токов к. з. в сети, питаемой непосредственно от генераторов, влияет переходный процесс в самом генераторе. При этом на переходный процесс в генераторе существенно влияет устройство регулирования возбуждения, точнее, та его часть, которая вступает в действие при к. з., она называется автоматической форсировкой возбуждения (АФВ). Устройство АФВ устанавливают для того, чтобы за счет увеличения тока возбуждения увеличить электродвижущую силу (ЭДС) генератора и тем самым восстановить или как-то скомпенсировать сильное снижение напряжения на шинах генератора при появлении к. з. в сети. Быстрое восстановление напряжения на зажимах генератора благоприятно сказывается на работе потребителей, питаемых от шин генератора по линиям, на которых нет к. з.

На рисунке 3.8 показано изменение во времени тока в одной фазе при трехфазном к. з. для случая, когда замыкание произошло в сети напряжением 380/220 В, питаемой от резервной ДЭС. При таких к. з. изменение аperiodической составляющей аналогично изменению ее при удаленных к. з. (рис. 3.1). Несколько иной вид имеет

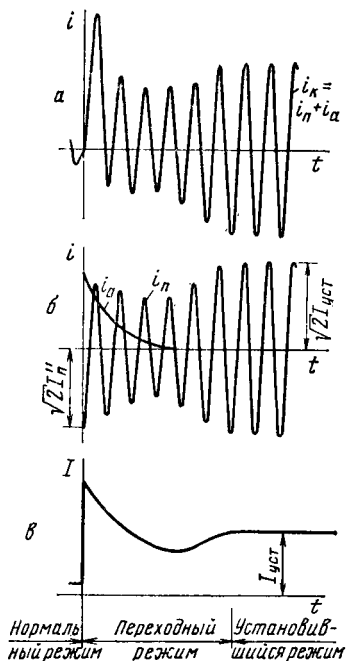


Рис. 3. 8. Изменение тока к. з. во времени при питании сети от ДЭС:

a — кривая изменения мгновенных значений тока к. з.; *б* — составляющие тока к. з. (i_a — аperiodическая, i_n — периодическая); *в* — кривая действующих значений тока к. з.

периодическая составляющая: сначала ее амплитуды уменьшаются, а затем (после того как начнет работу устройство автоматической форсировки возбуждения) увеличивается до некоторого установившегося значения $\sqrt{2}I_{уст}$ (рис. 3.8, б).

При удаленных к. з. начальное $I''_п$ и установившееся $I_{уст}$ значения периодической составляющей тока к. з. равны. При к. з. в сети, питаемой от местных генераторов, то есть при неудаленных к. з., $I_{уст}$ и $I''_п$ могут находиться в различных соотношениях друг с другом. При близких к шинам генератора к. з. $I''_п > I_{уст}$. По мере удаления места к. з. от шин генератора вместе с уменьшением каждого из токов (как $I''_п$, так и $I_{уст}$) снижается и их разница. При некотором внешнем сопротивлении $Z_{вн} = Z''_{кз}$ (точка б на рис. 3.9) токи $I''_п$ и $I_{уст}$ оказываются равными. Дальнейшее перемещение от генератора точки к. з. приводит к соотношению $I_{уст} > I''_п$, и разница этих значений токов сначала увеличивается, а затем (при $Z_{вн} > Z_{кр}$) уменьшается. При достаточно больших значениях внешнего сопротивления между генератором и точкой к. з. получаем режим удаленного к. з., при котором $I''_п = I_{уст}$ (см. точку г на рис. 3.9). При этом оказывается, что если к. з. произошло на незначительном удалении от генератора ($Z_{вн} < Z_{кр}$), то напряжение на зажимах генератора не удастся восстановить до номинального, несмотря на то что ЭДС генератора достигнет своего максимального, предельного значения $E_{пр}$. В тех случаях, когда к. з. возникает на достаточно большом удалении, при котором $Z_{вн} < Z_{кр}$, устройству АФВ удастся восстановить на зажимах генератора номинальное напряжение. Эти обстоятельства весьма важны

при расчете установившегося тока к. з. $I_{уст}$.

При расчетах защит от к. з. сети, питаемой от ДЭС, необходимо знать оба значения тока к. з., как начальное $I''_п$, так и установившееся $I_{уст}$. Рассмотрим порядок расчета начального значения периодической составляющей тока к. з. $I''_п$. В начальный момент к. з. генератор имеет элект-

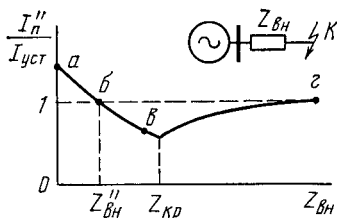


Рис. 3. 9. Изменение отношения $I''_п / I_{уст}$ в зависимости от удаленности до точки к. з., то есть от внешнего сопротивления $Z_{вн}$.

родвижущую силу и сопротивления не такие, как в нормальном режиме его работы. Эти параметры генератора для начального момента к. з. называют сверхпереходными. Для вычисления начального значения тока I''_n при трехфазном к. з. в соответствующей схеме замещения генератор представляют сверхпереходной э. д. с. E'' и сверхпереходным сопротивлением X''_d .

Сверхпереходное сопротивление X''_d в именованных единицах, мОм, вычисляют по формуле

$$X''_d = X''_{d*} \frac{U^2}{S_n}, \quad (3.13)$$

где X''_{d*} — сверхпереходное сопротивление генератора в относительных единицах, значения X''_{d*} приводятся в паспортных данных генератора; $U=400$ В; S_n — полная мощность генератора, кВ·А.

Полную мощность определяют по отношению

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n},$$

где P_n — номинальная мощность генератора, кВт; $\cos \varphi_n$ — номинальный коэффициент мощности.

Фазное значение сверхпереходной э. д. с. E'' (В) можно вычислить по соотношению

$$E'' = E''_* U_\phi, \quad (3.14)$$

где E''_* — значение сверхпереходной э. д. с. в относительных единицах; $U_\phi=230$ В.

Значение E''_* можно определить, используя паспортные данные, по формуле

$$E''_* = 1 + X''_{d*} \sin \varphi_n, \quad (3.15)$$

где $\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}$.

Если между генератором и рассматриваемой точкой к. з. находится участок линии, то его представляют на схеме замещения соответствующими сопротивлениями активным R_λ и индуктивным X_λ , подсчитанными по приведенным выше формулам (3.3) и (3.4). Затем путем суммирования находят результирующие сопротивления R_Σ , X_Σ и по формуле (3.8) — полное сопротивление Z_Σ . Сопротивления других элементов, находящихся в рассматриваемой цепи к. з., шин, трансформаторов тока, токовых катушек аппаратов и переходные сопротивления

их контактов можно не учитывать из-за их малости по сравнению с сопротивлением генератора.

Начальное значение $I_{\Pi}^{(3)}$ периодической составляющей тока (кА) при трехфазном к. з. вычисляют по формуле

$$I_{\Pi}^{(3)} = \frac{E''}{Z_{\Sigma}}. \quad (3.16)$$

Для частного, но наиболее часто встречающегося случая, представленного на рисунке 3.10, а, схема замещения для расчета трехфазного к. з. будет иметь довольно простой вид (рис. 3.10, б), а начальное значение тока $I_{\Pi}^{(3)}$ трехфазного к. з. можно определить по соотношению

$$I_{\Pi}^{(3)} = \frac{E''}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_d'' + X_{\Sigma})^2}}. \quad (3.17)$$

Начальное значение тока $I_{\Pi}^{(2)}$ при двухфазном к. з. в той же точке сети меньше тока $I_{\Pi}^{(3)}$. В зависимости от удаленности ток однофазного к. з. $I_{\Pi}^{(1)}$ может быть больше тока $I_{\Pi}^{(3)}$, равен ему или меньше него для той же точки к. з. Но, несмотря на возможность соотношения $I_{\Pi}^{(3)} < I_{\Pi}^{(1)}$, отключающую способность защитных аппаратов проверяют по току трехфазного к. з., так как условия гашения электрической дуги при этом виде к. з. оказываются более трудными, чем при однофазном.

Установившийся ток трехфазного к. з. $I_{уст}^{(3)}$ оказывается меньше, чем ток двухфазного или однофазного к. з. Объясняется это тем, что в установившемся режиме сопротивление генератора токам прямой последовательности значительно больше сопротивлений генератора токам обратной и нулевой последовательностей. Сеть и генератор имеют защиты от к. з., работающие с выдержкой времени, причем длительность этой выдержки такова,

что процесс к. з. успевает к моменту срабатывания этих защит перейти в установившийся режим. Поскольку чувствительность защит проверяют по наименьшему току, то для установившегося режима к. з. из всех видов рассчитывают только трехфазное к. з.

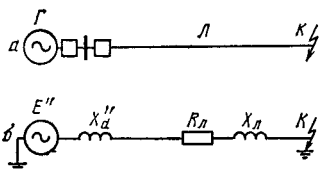


Рис. 3.10. Типичные схемы для расчетов к. з. в сети, питаемой от ДЭС:

а — расчетная схема; б — схема замещения; Г — генератор; Л — линия.

Для вычисления установившегося тока $I_{уст}^{(3)}$ при трехфазном к. з. пользуются двумя расчетными выражениями. Использование того или иного расчетного выражения обуславливается удаленностью к. з. от генератора. Удаленность к. з. от генератора оценивается путем сравнения внешнего сопротивления $Z_{вн}$ с критическим сопротивлением $Z_{кр}$. Внешнее сопротивление равно сумме сопротивлений элементов электроустановок, обтекаемых током к. з. на пути от зажимов генератора до точки к. з. В простейшем случае, когда к. з. возникает в сети, питаемой непосредственно от шин генератора, внешнее сопротивление равно сопротивлению участка линии между шинами генератора и местом к. з.

Критическим сопротивлением называется такое наименьшее внешнее сопротивление, при к. з. за которым АФВ восстанавливает напряжение до номинального. Вычисляют его по формуле

$$Z_{кр} = \frac{X_{г}}{E_{пр*} - 1}, \quad (3.18)$$

где $E_{пр*}$ — максимальное предельное значение ЭДС в относительных единицах; эта ЭДС соответствует предельному току возбуждения $I_{пр*}$, кратность которого в относительных единицах приводится в паспортных данных генератора

$$E_{пр*} = 0,2 + 0,75 I_{пр*}; \quad (3.19)$$

$X_{г}$ — сопротивление генератора в установившемся режиме к. з., мОм,

$$X_{г} = \frac{E_{пр*} U^2}{ОКЗ I_{пр*} S_{н}}. \quad (3.20)$$

В этой формуле ОКЗ — отношение короткого замыкания, значение которого указывается в паспортных данных генератора.

Если $Z_{вн} < Z_{кр}$, то установившееся значение тока при трехфазном к. з. $I_{уст}^{(3)}$ (кА) вычисляют по формуле

$$I_{уст}^{(3)} = \frac{E_{пр*} U_{\phi}}{\sqrt{R_{вн}^2 + (X_{г} + X_{вн})^2}}. \quad (3.21)$$

В тех случаях, когда $Z_{вн} \geq Z_{кр}$, ток $I_{уст}^{(3)}$ определяют по соотношению

$$I_{уст}^{(3)} = \frac{U_{\phi}}{Z_{вн}}. \quad (3.22)$$

В формулах (3.21, 3.22) $R_{вн}$, $X_{вн}$, $Z_{вн}$ представляют собой соответственно активное, индуктивное и полное сопро-

тивления внешней цепи между точкой к. з. и зажимами генератора, причем, $Z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + X_{вн}^2}$.

Таким образом, порядок расчета установившегося тока при трехфазном к. з. должен быть следующим: вычисляют критическое сопротивление генератора $Z_{кр}$; определяют сопротивления внешней цепи между генератором и точкой к. з. — $R_{вн}$, $X_{вн}$, $Z_{вн}$; сравнивают $Z_{вн}$ и $Z_{кр}$; если $Z_{вн} < Z_{кр}$, то ток $I_{уст}$ подсчитывают по формуле (3.21); при $Z_{вн} \gg Z_{кр}$ значение тока $I_{уст}^{(3)}$ вычисляют по формуле (3.22).

4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПЕРЕГРУЗКИ

4.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ СЕТИ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПЕРЕГРУЗКИ

Для предотвращения или уменьшения опасных последствий от к. з. применяют специальные защитные устройства, которые при возникновении к. з. автоматически срабатывают и отключают участок сети с повреждением, приведшим к короткому замыканию. Защиту от к. з. можно выполнять разными аппаратами, основными из которых для сетей напряжением 380/220 В являются предохранители и автоматические выключатели.

Защита от к. з. должна обладать необходимой чувствительностью и селективностью. Чувствительность характеризует способность защиты придти в действие при к. з. в конце защищаемой зоны. Защищаемая зона состоит из основной и резервируемой. К основной зоне относится участок сети между рассматриваемым и ближайшими по направлению к потребителям защитными аппаратами.

Количественно чувствительность защиты оценивается по отношению наименьшего тока к. з. в основной защищаемой зоне к току срабатывания защитного аппарата. Для различных аппаратов регламентируемые значения этих отношений различны. Так, например, если защита выполнена предохранителями, то ток однофазного к. з. в конце основной зоны защиты должен превышать номинальный ток плавкой вставки ближайшего (по направ-

лению к источнику питания) предохранителя не менее чем в 3 раза. Такое же требование к кратности тока к. з. предъявляется и в тех случаях, когда защита сети выполнена автоматическими выключателями с тепловыми расцепителями: ток однофазного к. з. не менее чем в 3 раза должен быть больше номинального тока теплового расцепителя. Если же автоматический выключатель имеет только электромагнитные расцепители, то кратность тока однофазного к. з. к уставке такого расцепителя должна быть не менее 1,25...1,4.

Если защита не удовлетворяет требованиям к чувствительности, то следует принять меры по ее увеличению. Для повышения чувствительности увеличивают площадь поперечного сечения фазного и нулевого проводов, устанавливают дополнительные защитные аппараты, то есть секционируют сети, применяют более совершенные защитные устройства, такие, например, как ЗТ-0,4У2.

Под селективностью понимают способность защиты отключать к. з. ближайшим к месту его возникновения защитным аппаратом. Для защит, выполненных предохранителями, селективность обеспечивается, если номинальные токи плавких вставок последовательно включенных предохранителей различаются не менее чем на 2 ступени. Более подробно условия, обеспечивающие селективную работу защитных аппаратов, рассматриваются ниже.

Как и защита от к. з., защита от перегрузки должна предотвращать опасные последствия, вызываемые перегрузкой, путем своевременного отключения перегруженного электрическим током участка сети.

От перегрузки должны быть защищены сети жилых и общественных зданий, а также служебных и производственных помещений, где по условиям технологического процесса или режима работы сети может возникнуть длительная перегрузка проводов и кабелей. От перегрузки, кроме того, защищают сети в пожаро- и взрывоопасных помещениях независимо от особенностей технологических процессов в них или режимов сети, могущих вызвать перегрузки. Защиту сети от перегрузки обычно совмещают с защитой от к. з., то есть осуществляют общим защитным аппаратом. Защиту электродвигателей от перегрузки можно выполнять другими способами и аппаратами (тепловыми реле, температурной защитой и т. д.).

Для обеспечения достаточной чувствительности и надежности в работе защиты номинальные токи плавких вставок и токи уставок автоматических выключателей следует выбирать по возможности наименьшими, но с таким расчетом, чтобы защитные аппараты не отключались от кратковременных допустимых перегрузок (например, от пусковых токов).

Аппараты защиты должны быть в состоянии по своей отключающей способности отключить ток к. з. в начале защищаемого участка. Их располагают в тех местах сети, где этого требуют условия соблюдения селективности или где площадь поперечного сечения проводников изменяется на меньшую, например в местах ответвления от магистрали. При этом защитные аппараты нужно устанавливать, как правило, непосредственно в местах присоединения этого ответвления к питающей линии.

Поскольку сеть напряжением 380/220 В работает в режиме глухого заземления нейтрали, то защиту от к. з. нужно выполнять в трехэлементном исполнении, то есть защитные элементы (предохранители, расцепители) необходимо устанавливать в каждой фазе. Если автоматический выключатель имеет максимальный расцепитель в нулевом проводе, то его срабатывание должно приводить к отключению всех трех фаз защищаемой линии или ответвления.

4.2. УЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАСЧЕТАХ ЗАЩИТ ОТ К.З. И ПЕРЕГРУЗКИ. ПРОВЕРКА СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В ПО УСЛОВИЯМ УСПЕШНОГО ПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Наличие асинхронных двигателей в сети напряжением 380/220 В значительно усложняет выполнение защиты ее от к. з. и перегрузок. Основная трудность в осуществлении защиты — необходимость отстройки ее от пусковых токов асинхронных двигателей. Неучет или неправильный учет пусковых токов может привести или к отказам защиты, или к ложным ее срабатываниям. Очевидно, что то и другое крайне нежелательно.

Если сеть 380/220 В правильно рассчитана и выполнена, то режим пуска электродвигателя не представляет опасности ни для запускаемого двигателя, ни для других электроприемников. В противном случае пуск становится опасным как для самого запускаемого двигателя, так

и для остальных работающих электродвигателей, подключенных к данной сети.

Известно, что при пуске асинхронные короткозамкнутые электродвигатели потребляют из сети в течение всего времени пуска $t_{п}$ пусковой ток $I_{п}$, превышающий в 4...7,5 раза номинальный ток двигателя (рис. 4.1). В

первоначальный момент пуска происходит бросок пускового тока, максимальная амплитуда которого достигает $(1,3...1,5) \sqrt{2} I_{п} \cong 2 I_{п}$ (рис. 4.1). Длительность этого броска вполне достаточна для срабатывания электромагнитного расцепителя автоматического выключателя. Бросок пускового тока может быть и большим, если двигатель работает с реверсами (противовключениями) или повторными пусками после кратковременных (до 1...1,5 с) остановок.

В паспортных данных электродвигателей приводятся значения кратности $I_{п*}$ пускового тока по отношению к номинальному току двигателя $I_{п*} = I_{п} / I_{н.д.}$. Пусковой ток с такой кратностью будет обтекать обмотки электродвигателя, если напряжение на его зажимах при пуске равно номинальному. Фактический пусковой ток может существенно отличаться от паспортного, на его значение влияет целый ряд факторов: мощность питающего трансформатора, площадь поперечного сечения, марка и длина проводов сети напряжением 380/220 В, по которым двигатель получает электропитание, уровень напряжения в сети и др. В каталожных данных об электродвигателях приводится также кратность $M_{п*}$ пускового вращающего момента $M_{п}$ в относительных единицах от номинального момента $M_{н.д.}$ двигателя: $M_{п*} = M_{п} / M_{н.д.}$. Так, для асинхронных короткозамкнутых двигателей сельскохозяйственного исполнения серии 4А $M_{п*} = 2...2,2$, причем эта кратность соответствует пуску двигателя при номинальном напряжении на его зажимах.

В силу особенностей сельских сетей пусковой ток питаемых от них асинхронных двигателей обычно меньше паспортного значения. Кроме того, напряжение на за-

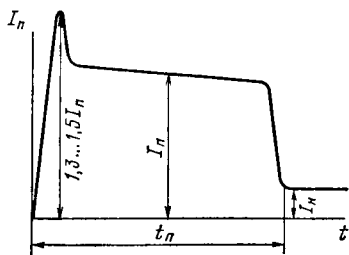


Рис. 4.1. Кривая изменения пускового тока электродвигателя.

жимах пускаемого и остальных работающих электродвигателей при пуске существенно снижается. Это приводит к уменьшению пускового момента. Уменьшение может быть настолько значительным, что развиваемый момент у запускаемого двигателя окажется меньше, чем момент трогания M_T приводимой им рабочей машины. В этом случае пуск электродвигателя не состоится и, если защита его выполнена неправильно, он сгорит.

Снижение напряжения, вызванное запуском электродвигателя с максимальным пусковым током, происходит и на зажимах остальных работающих электродвигателей. Вследствие этого снижаются их вращающие моменты, в том числе и максимальные M_{\max} . Если при этом максимальный момент M_{\max} какого-либо работающего электродвигателя окажется меньше момента сопротивления M_c сочлененной с двигателем рабочей машины, то двигатель «опрокинется»: ротор его затормозится, двигатель, оставаясь подключенным к сети, будет потреблять от нее пусковые токи, чем еще больше снизит уровень напряжения на зажимах оставшихся в работе двигателей. В итоге возможно нарастающее и лавинообразное опрокидывание асинхронных двигателей. Поэтому, приступая к расчету защиты от к. з. и перегрузок, сначала проверяют сеть по условиям возможности пуска асинхронных электродвигателей.

Пуск будет успешным, если фактический пусковой момент M'_n больше момента трогания рабочей машины M_T . В несколько видоизмененной форме это условие можно записать так:

$$M'_{n*} \geq k_3 M_{T*} \quad (4.1)$$

Здесь M'_{n*} — кратность фактического пускового момента; $k_3 = 1,4$ — коэффициент запаса; M_{T*} — кратность момента трогания рабочей машины: $M_{T*} = M_T / M_{н.д}$; M_T — определяют по паспортным или каталожным данным рабочей машины, а номинальный момент двигателя (Н·м) вычисляют по формуле

$$M_{н.д} = 9,6 \cdot 10^3 \frac{P_{н.д}}{n_n}, \quad (4.2)$$

где $P_{н.д}$ — номинальная мощность двигателя, кВт; n_n — номинальная частота вращения, об/мин.

Далее по паспортным данным или по приведенной ниже формуле находят номинальный ток электродвига-

теля $I_{н. д}$ (А):

$$I_{н. д} = \frac{P_{н. д} 10^3}{\sqrt{3} U_{н} \eta \cos \varphi}, \quad (4.3)$$

где $U_{н}$ — 380 В — номинальное напряжение, В; η — номинальный коэффициент полезного действия двигателя в относительных единицах; $\cos \varphi$ — номинальный коэффициент мощности.

Затем вычисляют коэффициент мощности при пуске $\cos \varphi_{п}$:

$$\cos \varphi_{п} = \frac{M_{п*} \cos \varphi}{I_{п*}}. \quad (4.4)$$

Уровень напряжения на зажимах пускаемого электродвигателя

$$U_{п*} = 1 - \frac{\sqrt{3}(R_{\Sigma} \cos \varphi_{п} + X_{\Sigma} \sin \varphi_{п})}{U_{н}} I_{п*} I_{н. д}, \quad (4.5)$$

где R_{Σ} и X_{Σ} — результирующие активное и индуктивное сопротивления внешней по отношению к двигателю сети, Ом; каждое из них включает сопротивления питающего трансформатора и участков сети, через которые двигатель соединен с трансформатором; вычисляют их в соответствии с указаниями в п. п. 3.2 и 3.3;

$$\sin \varphi_{п} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{п}}.$$

Далее определяют кратность $M'_{п*}$ фактического пускового момента:

$$M'_{п*} = U_{п*}^2 M_{п*}. \quad (4.6)$$

Наконец, по соотношению (4.1) проверяют возможность успешного пуска асинхронного двигателя. Если соотношение (4.1) не выполняется, то необходимо принять меры по улучшению условий пуска. Чаще всего для этого увеличивают площадь поперечного сечения проводов питающей сети и реже — увеличивают мощность питающего трансформатора.

Рассмотрим теперь порядок проверки устойчивой работы подключенных к сети двигателей при запуске двигателя с наибольшим пусковым током.

Работающий электродвигатель сохранит устойчивую работу, если его максимальный момент $M'_{глах}$ при снижении напряжения из-за пуска другого двигателя будет больше момента сопротивления M_c рабочей машины. Выражая эти моменты через соответствующие кратности, получим математическую запись условия сохранения

устойчивости работающим двигателем:

$$M'_{\max*} \geq k_3 M_{c*}, \quad (4.7)$$

где $M'_{\max*} = M_{\max} U_{p*}^2$ — кратность максимального момента при сниженном уровне напряжения, отн. ед.; $k_3 = 1,4$ — коэффициент запаса; $M_{c*} = M_c / M_{н.д}$ — кратность момента сопротивления рабочей машины, о. е.

Кратность максимального момента $M_{\max*}$ для соответствующих марок электродвигателей приводится в каталожных данных. Для большинства электродвигателей сельскохозяйственного исполнения серии 4А она равна 2,2. Уровень напряжения U_{p*} на зажимах проверяемого двигателя вычисляют по формуле (4.5), только R_{Σ} и X_{Σ} будут иметь соответствующие для проверяемого двигателя значения. Момент сопротивления M_c рабочей машины находят по паспортным справочным или каталожным данным. Если условие (4.7) не выполняется, то нужно принять меры по повышению устойчивости.

Рассмотрим еще некоторые обстоятельства, связанные с пуском асинхронных двигателей и усложняющие выполнение защиты от к. з. и перегрузок. Пусковой режим характеризуется не только значением пускового тока, но и длительностью пуска $t_{п}$, то есть временем, в течение которого двигатель разворачивается до нормальной частоты вращения (рис. 4.1). Условно разделяют пуски на нормальные и тяжелые. К нормальным относят редкие пуски с длительностью не более 5 с. К тяжелым относят частые пуски (более 15 раз в час) или пуски с длительностью более 10 с. Длительность пуска зависит от ряда факторов, в том числе от типа двигателя, характеристики рабочей машины, мощности питающего трансформатора, сопротивления проводов питающей сети и др.

Для того чтобы предохранитель, защищающий двигатель, не перегорел при нормальных условиях пуска, ток его плавкой вставки должен быть примерно в 2,5 раза меньше пускового. В итоге ток плавкой вставки превышает номинальный ток электродвигателя примерно в 2,5 раза. Расплавить такую плавкую вставку в течение часа может ток, превышающий номинальный ток двигателя по крайней мере в 3...3,5 раза.

Примерно в такой же ситуации оказываются и двигатели с тяжелыми условиями пуска. Очевидно, что, несмотря на то, что предохранители имеют защитную характеристику, обратно зависящую от квадрата тока,

защиту электродвигателей от перегрузки предохранителями выполнить не удастся. Поэтому в тех случаях, когда сеть или ответвление, питающие электродвигатель, защищены предохранителями, защиту двигателя от перегрузки обычно выполняют тепловыми реле, встроенными в магнитный пускатель. При этом требуется правильно выбрать тепловые реле и тщательно их настроить, чтобы обеспечить удовлетворительную работу этих реле как аппаратов защиты двигателей от перегрузки.

Возможны и желательны другие, более совершенные виды защиты от перегрузки, например, такие, как встроенная температурная защита электродвигателей, подобная УВТЗ, но с улучшенными защитными характеристиками. Такие защиты разработаны, и ими будут оснащаться асинхронные двигатели, поставляемые сельскому хозяйству. Некоторые из этих видов защит уже нашли применение в сельскохозяйственном производстве [2].

Пример 4.1. Проверить сеть, схема которой показана на рисунке 3.6, по условиям пуска асинхронных двигателей. К сети в точке K_1 подключен электродвигатель $D1$, а в точке K — двигатель $D2$. Необходимые для расчета параметры электродвигателей и сочлененных с ними рабочих машин приведены в таблице 4.1.

Очевидно, что наиболее тяжелый режим будет при пуске электродвигателя $D1$. Вычислим по формуле (4.4) коэффициент мощности при его пуске:

$$\cos \varphi_n = \frac{M_{п*} \cos \varphi}{I_{п*}} = \frac{2 \cdot 0,87}{7,5} = 0,232.$$

Соответственно

$$\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} = \sqrt{1 - 0,232^2} = 0,973.$$

В примере 3.2 подсчитаны результирующие сопротивления до точки K_1 : $R_\Sigma = 154,65 \text{ мОм} = 0,155 \text{ Ом}$ и $X_\Sigma = 134,85 \text{ мОм} = 0,135 \text{ Ом}$.

По формуле (4.5) подсчитаем уровень напряжения на зажимах двигателя $D1$ при его пуске:

$$U_{п*} = 1 - \frac{\sqrt{3} (R_\Sigma \cos \varphi_n + X_\Sigma \sin \varphi_n)}{U_n} I_{п*} I_{н.д} =$$

$$= 1 - \frac{\sqrt{3} (0,155 \cdot 0,232 + 0,135 \cdot 0,973)}{380} \cdot 7,5 \cdot 22 = 0,874.$$

Используя выражение (4.6), определим фактическую кратность пускового момента у двигателя $D1$:

$$M'_{п*} = U_{п*}^2 M_{п*} = 0,874^2 \cdot 2 = 1,53.$$

Наконец, по соотношению (4.1) проверим возможность успешного пуска двигателя $D1$:

$$M'_{п*} \geq k_3 M_{г*}, \text{ то есть } 1,53 \geq 1,4 \cdot 1,0.$$

Теперь проверим, сохраняется ли устойчивость работы электродвигателя Д2 при пуске двигателя Д1. Для этого аналогично тому, как это делалось в примере 3.2, подсчитаем результирующие сопротивления до точки К, места подключения к сети двигателя Д2:

$$R_{\Sigma} = R_{\Gamma} + R_{Л1} + R_{Л2} = 61 + 49,8 + 20,75 = 131,55 \text{ мОм} = 0,132 \text{ Ом};$$

$$X_{\Sigma} = X_{\Gamma} + X_{Л1} + X_{Л2} = 103 + 21,72 + 9,05 = 133,77 \text{ мОм} = 0,134 \text{ Ом}$$

По формуле (4.5) найдем уровень напряжения U_{p*} на зажимах двигателя Д2 при пуске двигателя Д1:

$$U_{p*} = 1 - \frac{\sqrt{3} (0,132 \cdot 0,232 + 0,134 \cdot 0,973)}{380} \cdot 7,5 \cdot 22 = 0,879.$$

Вычислим кратность максимального вращающего момента у двигателя Д2 при уровне напряжения U_{p*} :

$$M'_{\max*} = M_{\max*} U_{p*}^2 = 2,2 \cdot 0,879^2 = 1,7.$$

Затем проверим выполнение соотношения (4.7):

$$M'_{\max*} \geq k_3 M_{c*}, \text{ то есть } 1,7 \geq 1,4 \cdot 0,95.$$

Таким образом, проверяемая сеть удовлетворяет условиям успешного пуска двигателя Д1.

4.1. Параметры электродвигателей и машин к примеру 4.1

Двигатели	Мощность $P_{н.д.}$, кВт	Номинальные данные двигателей					Параметры рабочих машин	
		ток $I_{н.д.}$, А	$\cos \varphi$	кратность пускового момента $M_{п*}$	кратность пускового тока $I_{п*}$	кратность максимального момента $M_{\max*}$	кратность момента трогания $M_{т*}$	кратность момента сопротивления $M_{с*}$
Д1	11	22	0,87	2,0	7,5	2,2	1,0	1,0
Д2	5,5	12	0,8	2,0	7,0	2,2	0,3	0,95

4.3. ЗАЩИТА ВНУТРЕННИХ ПРОВОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

4.3.1. Защита предохранителями

Порядок расчета защит внутренних проводок от к. з. и перегрузок зависит от того, выполняется расчет для вновь сооружаемой сети или для действующей. Рассмотрим сначала порядок расчета для первого случая. Для

участка сети, где намечено установить предохранители, по известным сведениям об электрических нагрузках и по соответствующей методике подсчитывают рабочий максимальный ток $I_{p. \max}$. Далее выбирают номинальный ток плавкой вставки I_B предохранителя, А:

$$I_B \geq k_n I_{p. \max}, \quad (4.8)$$

где k_n — коэффициент надежности.

Коэффициент надежности зависит от характера потребителей. Для ламп накаливания и тепловой нагрузки его принимают равным 1, для ламп типа ДРЛ — 1,1, для люминесцентных ламп — 1,2. Если по защищаемой проводке предполагается питать один или несколько электродвигателей, то ток плавкой вставки выбирают еще и с учетом следующего соотношения:

$$I_B \geq I_{\max}/\alpha, \quad (4.9)$$

где I_{\max} — максимальный ток защищаемой проводки, обусловленный пусковыми токами электродвигателей, А. Значение этого тока определяют по приводимым ниже формулам; α — коэффициент, позволяющий обеспечивать несрабатывание предохранителей при протекании по ним пусковых токов.

Значение коэффициента α зависит от типа применяемых предохранителей и условий пуска асинхронных двигателей. Для безынерционных предохранителей (типа ПН2, НПН2-60) и нормальных условий пуска коэффициент α принимают равным 2,5, а при тяжелых условиях пуска — 1,6. Для малоинерционных предохранителей (типа ПР2) и нормальных условий пуска этот коэффициент равен 3, а при тяжелых пусках — 2.

Максимальный ток одиночного двигателя вычисляют по формуле

$$I_{\max} = I_n = I_{n*} I_{n. \text{д}}, \quad (4.10)$$

то есть принимают равным пусковому току. Для группы, состоящей из n двигателей,

$$I_{\max} = I_{n. \max} + k_0 \sum_1^{n-1} I_n, \quad (4.11)$$

где $I_{n. \max}$ — наибольший пусковой ток двигателя в данной группе; k_0 — коэффициент одновременности, учитывающий неодновременность работы потребителей и разную степень их загрузки; $\sum_1^{n-1} I_n$ — сумма номинальных токов электродвигателей, присоединенных к

защищаемой сети, без учета тока двигателя, имеющего наибольший пусковой ток.

Коэффициенты одновременности k_0 для однородных соизмеримых нагрузок сети напряжением 380 В следующие:

Число соизмеримых нагрузок (двигателей)	Коэффициент одновременности
2	0,85
3	0,80
4...5	0,75
6...7	0,70
8...10	0,65
11...15	0,60
16...20	0,55
21...30	0,50

Примечание. К соизмеримым относятся нагрузки, мощности которых отличаются не более чем в 4 раза.

Очевидно, что формулой (4.10) пользуются, если через защищаемую проводку питается только один электродвигатель. Затем для выбранного по соотношениям (4.8) и (4.9) номинального тока плавкой вставки определяют площадь поперечного сечения провода, который она сможет защищать. Если в соответствии с ПУЭ [3] проводку, для которой рассчитывают защиту, следует защищать от к. з. и перегрузок, то выбирают соответствующую условиям окружающей среды марку провода с таким поперечным сечением, чтобы соблюдалось условие

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{в}}, \quad (4.12)$$

где $I_{\text{доп}}$ — длительно допустимый ток по условиям нагрева, А.

Сведения о допускаемых токовых нагрузках приведены в ПУЭ, а для некоторых видов проводов, используемых в сетях напряжением 380/220 В, в приложениях 6...8.

По условию (4.12) выбирают сечение проводников с резиновой, полихлорвиниловой и подобной ей изоляцией для выполнения силовых сетей в производственных, общественных и торговых помещениях, осветительных сетей в жилых и общественных зданиях, в торговых и служебно-бытовых помещениях, а также сетей всех видов в пожароопасных и взрывоопасных помещениях. Если для данной проводки защиту от перегрузки выполнять не обязательно, то допускается выбирать такое сечение, для которого выполняется соотношение

$$I_{\text{доп}} \geq 0,33 I_{\text{в}}. \quad (4.13)$$

При составлении таблиц допустимых нагрузок [3] приняты следующие исходные условия: температура окружающей среды — земли $+15^{\circ}\text{C}$, воздуха $+25^{\circ}\text{C}$, допустимая температура нагрева жил для изолированных проводников $+65^{\circ}\text{C}$, для неизолированных $+70^{\circ}\text{C}$. В реальных условиях температура окружающей среды может существенно отличаться от указанных значений. Поэтому выбранную площадь поперечного сечения проводника окончательно проверяют по следующему условию:

$$k_T I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р. макс}}, \quad (4.14)$$

где k_T — поправочный коэффициент (прил. 9), позволяющий учесть отличие реальных условий работы проводника от условий, принятых для определения допустимых нагрузок [3].

Обычно условие (4.14) выполняется, но если оно не соблюдено, следует принять ближайшую большую площадь поперечного сечения проводника.

После определения площади сечения проводов следует рассчитать токи к. з., а затем выбранный предохранитель с номинальным током плавкой вставки I_B проверить по ряду дополнительных условий.

1. Номинальное напряжение предохранителя $U_{\text{н.п}}$ не должно быть меньше номинального напряжения сети $U_{\text{н}}$:

$$U_{\text{н. п}} \geq U_{\text{н}}. \quad (4.15)$$

2. Предельный отключаемый ток предохранителем $I_{\text{пр}}$ должен быть больше максимального тока трехфазного к. з. $I_{\text{к. макс}}^{(3)}$ в месте установки предохранителя:

$$I_{\text{пр}} \geq I_{\text{к. макс}}^{(3)}. \quad (4.16)$$

3. Выбранный предохранитель должен работать селективно с предшествующими, считая от приемников электроэнергии, предохранителями или защитными аппаратами. Для предохранителей разных типов селективность обеспечивается, если номинальные токи плавких вставок последовательно включенных предохранителей отличаются не менее чем на две ступени шкалы. Например, предохранитель ПН2-100 с плавкой вставкой на номинальный ток 100 А будет работать селективно с любым предохранителем типа НПН2-60, так как ток плавкой вставки последнего будет не выше 63 А. Для однотипных предохранителей селективная работа достигается

чаще всего при разнице токов плавких вставок в одну ступень. При разных видах защитных аппаратов (например, предохранитель и автоматический выключатель) селективность работы можно проверить путем сопоставления времени срабатывания их при одних и тех же значениях токов к. з. При этом время срабатывания должно определяться по защитным характеристикам этих аппаратов с учетом возможного его разброса и быть бóльшим у каждого последующего аппарата, считая от электроприемника.

4. Должна обеспечиваться необходимая чувствительность, оцениваемая по отношению минимального тока к. з. I_k на защищаемом участке к номинальному току плавкой вставки. В соответствии с требованиями ПУЭ должно удовлетворяться условие:

$$I_k/I_B \geq 3. \quad (4.17)$$

Значение тока к. з. для использования в формуле (4.17) вычисляют для наиболее удаленной от данного предохранителя точки к. з., причем рассматривают вид к. з., обуславливающий наименьший ток. Обычно этим видом является однофазное к. з.

5. Если последовательно с предохранителями в защищаемой ими цепи оказываются включенными магнитные пускатели, то должно быть выдержано соотношение

$$I_k^{(2)}/I_B \simeq 10 \dots 15, \quad (4.18)$$

где $I_k^{(2)}$ — ток двухфазного к. з. в наиболее удаленной точке защищаемой цепи.

Выполнение этого соотношения предотвращает порчу контактов магнитных пускателей при их отпадании из-за снижений напряжения при к. з. Отключаясь при к. з. раньше предохранителей, магнитные пускатели коммутируют своими контактами, не предназначенными для такой операции, токи к. з. Если же ток к. з. в наиболее удаленной точке в 10...15 раз превышает ток плавкой вставки, то она перегорает в течение 0,1...0,2 с, то есть раньше, чем успеет сработать магнитный пускатель.

Для действующей сети порядок выбора номинального тока плавкой вставки несколько другой. Для известной марки и сечения провода определяют длительно допустимый ток. Далее по соотношению (4.12) или (4.13) определяют ток плавкой вставки предохранителя, после чего по формулам (4.8) и (4.9) проверяют несрабатывание

его от рабочих максимальных и пусковых токов. В дальнейшем выбранную плавкую вставку проверяют так же, как и для вновь сооружаемой проводки.

4.3.2. Защита автоматическими выключателями

При выборе автоматических выключателей для защиты внутренних проводок от к. з. и перегрузки необходимо соблюсти ряд требований.

1. Номинальное напряжение автоматического выключателя не должно быть ниже номинального напряжения сети, то есть должно соблюдаться соотношение (4.15).

2. По своей отключающей способности контактная система выключателя должна быть в состоянии отключить максимальные токи к. з., которые могут возникнуть на защищаемом участке. Это требование (4.16) для сельских сетей обычно выполняется. Исключения могут быть только в случаях использования автоматических выключателей типа АП50Б, имеющих сравнительно невысокую коммутационную способность.

3. Рабочий максимальный ток нагрузки $I_{p. \max}$ не должен превышать номинальный ток теплового расцепителя $I_{н.т.}$, а максимальный допустимый ток для защищаемой проводки I_{\max} должен быть меньше тока срабатывания электромагнитного расцепителя $I_{э}$:

$$I_{н.т.} \geq k_3 I_{p. \max}; \quad (4.19)$$

$$I_{э} \geq k_n I_{\max}, \quad (4.20)$$

где k_3 — коэффициент запаса, равный 1,25; k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,25.

Для тяжелых условий пуска в формулу (4.19) следует подставлять значения коэффициента надежности $k_3 = 1,5$. Соблюдение требования достигается выбором выключателя с необходимым значением номинального тока теплового расцепителя, а также при необходимости регулировкой этого тока в тех выключателях, конструкции которых позволяют ее осуществить.

Выполнение условия (4.20) предотвращает ложные отключения выключателей при пусках асинхронных двигателей. Максимальный ток I_{\max} подсчитывают по формуле (4.10) или (4.11). Отстройка электромагнитного расцепителя от этого тока обеспечивается подбором такого исполнения автоматического выключателя, у

которого кратность уставки электромагнитного расцепителя достаточная для соблюдения соотношения (4.20).

В большинстве случаев внутреннюю проводку нужно защищать не только от к. з., но и от перегрузок. Для этого соотношение между длительно допустимой токовой нагрузкой $I_{\text{доп}}$ проводки и током уставки аппарата защиты должно удовлетворять следующим условиям:

для автоматических выключателей, имеющих только электромагнитные расцепители,

$$I_{\text{доп}}/I_{\text{э}} \geq 1,25, \quad (4.21)$$

для автоматических выключателей с тепловыми расцепителями

$$I_{\text{доп}}/I_{\text{н. г}} \geq 1,0. \quad (4.22)$$

Если проводка защищена только от к. з., то должны быть соблюдены следующие соотношения:

для автоматических выключателей, имеющих только электромагнитные расцепители,

$$I_{\text{э}}/I_{\text{доп}} \leq 4,5, \quad (4.23)$$

для выключателей с регулируемым тепловыми расцепителями

$$I_{\text{н. г}}/I_{\text{доп}} \leq 1,25, \quad (4.24)$$

для автоматических выключателей с тепловыми расцепителями, не имеющих устройств регулирования тока срабатывания,

$$I_{\text{н. г}}/I_{\text{доп}} \leq 1,0. \quad (4.25)$$

Выбрав сечение проводников, следует рассчитать токи к. з., а затем проверить чувствительность защиты и ее способность защитить данную сеть от недопустимых перегревов при перегрузках и к. з. Для автоматических выключателей с тепловыми расцепителями чувствительность защиты проверяют по соотношению

$$I_{\text{к}}/I_{\text{н. г}} \geq 3. \quad (4.26)$$

Для автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями и номинальным током до 100 А эту проверку выполняют по формуле

$$I_{\text{к}}/I_{\text{э}} \geq 1,4, \quad (4.27)$$

где $I_{\text{к}}$ — ток короткого замыкания в конце защищаемого данным выключателем участка.

Вид к. з. для определения тока I_K берут такой, при котором этот ток имеет наименьшее значение, то есть чаще всего это ток однофазного к. з. Для выключателей с номинальным током более 100 А соотношение токов (4.27) допускается иметь равным 1,25.

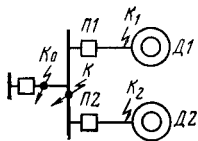


Рис. 4.2. Схема к примеру 4.2.

Пример 4.2. Выбрать устройства защиты от к. з. и перегрузки внутренней проводки в коровнике, по которой питаются электродвигатели $D1$ и $D2$ (рис. 4.2).

Данные электродвигателя $D1$: номинальная мощность $P_{нD1} = 4$ кВт, номинальный ток $I_{нD1} = 9,1$ А, кратность пускового тока $I_{п*1} = 6$, режим пуска — тяжелый. Данные электродвигателя $D2$: номинальная мощность $P_{нD2} = 2,2$ кВт, номинальный ток $I_{нD2} = 6,1$ А, кратность пускового тока $I_{п*2} = 6$, режим пуска — нормальный. Управление работой двигателей $D1$ и $D2$ осуществляется через магнитные пускатели.

Так как для управления работой двигателей используют магнитные пускатели, то защита двигателей от перегрузки выполнена тепловыми реле, встроенными в пускатели. Защиту ответвлений к двигателям от к. з. и перегрузки, а также защиту двигателей от к. з. выполним предохранителями типа НПН2-60. Вычислим пусковые токи электродвигателей: $I_{п1} = I_{нD1} I_{п*1} = 9,1 \cdot 6 = 54,6$ А. $I_{п2} = I_{нD2} I_{п*2} = 6,1 \cdot 6 = 36,6$ А.

Выберем плавкие вставки для каждого двигателя. По условиям (4.8) и (4.9) имеем: для двигателя $D1$ $I_{н1} \geq 9,1$ А, $I_{в1} \geq I_{макс1} / \alpha = I_{п1} / \alpha = 54,6 : 1,6 = 34,12$ А, для двигателя $D2$ $I_{в2} \geq 6,1$ А, $I_{в2} = I_{п2} / \alpha = 36,6 : 2,5 = 14,64$ А.

Выбираем для двигателя $D1$ плавкую вставку на ток 40 А, а для двигателя $D2$ — на 16 А, то есть $I_{в1} = 40$ А, $I_{в2} = 16$ А.

Принимаем, что ответвления к электродвигателям будут выполняться проводом марки АПВ в стальных тонкостенных трубах. По соотношению (4.12) определяем длительно допустимый ток и по приложению 8 выбираем площадь поперечного сечения фазных проводов: для двигателя $D1$ $I_{доп1} = 1,25 I_{в1} = 1,25 \cdot 40 = 50$ А, площадь сечения 16 мм²; для двигателя $D2$ $I_{доп2} = 1,25 I_{в2} = 1,25 \cdot 16 = 20$ А, площадь сечения 4 мм².

Для защиты от к. з. и перегрузки магистрального участка сети, а также для резервирования работы предохранителей $P1$ и $P2$ выбираем автоматический выключатель типа АЕ20. Для выбора конкретного выключателя вычислим рабочий максимальный ток на магистральном участке: $I_{р.макс} = k_0 (I_{нD1} + I_{нD2}) = 0,85(9,1 + 6,1) = 12,92$ А. По соотношению (4.11) рассчитаем также максимальный ток магистрали, создаваемый пуском двигателя $D1$ при работе двигателя $D2$:

$$I_{макс} = I_{п1} + I_{нD2} = 54,6 + 6,1 = 60,7 \text{ А.}$$

Теперь по формуле (4.19) определим номинальный ток теплового расцепителя: $I_{н.г} \geq k_3 I_{р.макс} = 1,5 \cdot 12,92 = 19,38$ А. Выбираем трехполюсный автоматический выключатель с тепловыми и электромагнитными расцепителями АЕ 2034-10НУЗ с номинальным током

максимальных расцепителей 20 А. Ток срабатывания электромагнитного расцепителя $I_0 = 12 \cdot 20 = 240$ А, что больше $1,25 I_{\max} = 1,25 \times 60,7 = 75,87$ А, то есть условие (4.20) выполняется. Для магистрали выбираем кабель марки АВРГ, проложенный на скобках по стенам здания. Используя соотношение (4.22) и данные о допустимых нагрузках (прил. 8), выбираем площадь поперечного сечения фазных жил кабеля 4 мм^2 . Возможен был выбор и площади сечения $2,5 \text{ мм}^2$, но, как показал расчет, эта площадь сечения не отвечает требованиям на допустимые у электродвигателей отклонения напряжения.

Для выбранных площадей поперечных сечений проводников с учетом сопротивлений наружной сети и трансформатора выполнен расчет токов к. з. в указанных на рисунке 4.2 точках (этот расчет здесь не приводится). Результаты расчета таковы:

Точки к. з.		K_0	K	K_1	K_2
Токи к. з., А:					
трехфазного	$I_K^{(3)}$	1250	1012	980	970
двухфазного	$I_K^{(2)}$	1087	880	853	844
однофазного	$I_K^{(1)}$	515	410	375	350

Теперь по соотношению (4.17) проверяем чувствительность плавких вставок к минимальным токам к. з.: для предохранителя $П1$ к однофазному к. з. в точке K_1 $I_{K_1}^{(1)}/I_{н1} = 375 : 40 = 9,4 > 3$; для предохранителя $П2$ к однофазному к. з. в точке K_2 $I_{K_2}^{(1)}/I_{н1} = 350 : 16 = 21,9 > 3$. Таким образом, выбранные плавкие вставки имеют достаточно высокую чувствительность.

По условию (4.18) проверяем селективную работу предохранителей с магнитными пускателями: для $П1$ $I_{K_1}^{(2)}/I_{н1} = 853 : 40 = 21,32$, что больше кратностей $10 \dots 15$; для $П2$ $I_{K_2}^{(2)}/I_{н2} = 844 : 16 = 52,75$, что также больше $10 \dots 15$. Так как условие (4.18) выполняется, то при к. з. в защищаемых зонах предохранители $П1$ и $П2$ будут срабатывать раньше, чем успеет отключиться из-за снижения напряжения магнитный пускатель.

Теперь проверим по соотношению (4.26) чувствительность теплового расцепителя $I_K^{(1)}/I_{н.т} = 410 : 20 = 20,5$, что больше 3 и что свидетельствует о высокой чувствительности выбранного аппарата к токам к. з. в защищаемой сети.

Наконец, условия (4.15) и (4.16) также выполняются для всех выбранных защитных устройств.

В приведенном примере наглядно видно, как нерационально с точки зрения экономного расходования проводникового материала выполнять защиту электродвигателей от к. з. предохранителями. Для того чтобы предохранитель $П1$ защищал проводку к двигателю $Д1$ от перегрузки, площадь поперечного сечения проводников пришлось выбрать 16 мм^2 . Между тем для магист-

рального участка, защищенного автоматическим выключателем, оказалось возможным выбрать (даже с запасом по допустимому току) площадь сечения 4 мм².

4.4. ЗАЩИТА НАРУЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

4.4.1. Защита наружных сетей предохранителями

Как отмечалось, наружные электрические сети напряжением 380/220 В довольно протяженны. В связи с этим одним комплектом защитить всю наружную сеть — от шин подстанции до вводов в здание — часто не удается. Поэтому при выборе аппаратов защиты наружной сети от к. з. и перегрузок принято определять длину линии (зону), которую этот аппарат защищает [5]. Если оказывается, что эта зона меньше, чем фактическая длина линии, то для защиты этой линии необходимо установить еще по крайней мере один комплект защиты.

Предохранители для защиты наружной сети от к. з. выбирают в следующем порядке. Исходя из конкретных условий (удобство монтажа, наличие того или другого типа предохранителей), выбирают тип предохранителя. По соотношению (4.15) проверяют соответствие номинального напряжения предохранителя напряжению сети. Далее в зависимости от числа присоединенных к защищаемой линии электродвигателей по формуле (4.8) или (4.9) определяют номинальный ток плавкой вставки, а затем по соотношению (4.16) предохранитель проверяют на отключающую способность. Если условия проверки соблюдаются, то определяют чувствительность защиты, выполненной предохранителями. Для оценки чувствительности сопоставляют кратность наименьшего для защищаемой линии тока однофазного к. з. к номинальному току плавкой вставки с нормируемым значением этой кратности, равным трем. Должно удовлетворяться следующее требование:

$$\frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{в}}} \geq 3, \quad (4.28)$$

где $I_{\text{к}}^{(1)}$ — ток однофазного к. з. в наиболее удаленной точке защищаемой линии.

Если это требование не удовлетворяется, то необходимо установить дополнительный комплект предохранителей (или другой защитный аппарат), который осуществил бы защиту не защищенной основным комплектом части линии. Примерное место для установки дополнительного комплекта определяют сравнением предельного сопротивления $Z_{пр}$, характеризующего зону, защищаемую выбранными предохранителями, с фактическим сопротивлением петли фазный — нулевой провод выделенного для защиты участка $Z_{уч}^{(1)}$.

Предельное сопротивление вычисляют по формуле

$$Z_{пр} = \frac{73}{I_B} - \frac{1}{3} Z_T^{(1)} - Z_{л.о}, \quad (4.29)$$

где I_B — номинальный ток плавкой вставки, А; $Z_T^{(1)}$ — сопротивление трансформатора при однофазном к. з., Ом (прил. 1); $Z_{л.о}$ — сопротивление петли фазный — нулевой провод участка линии от подстанции (КТП) до места установки предохранителя, определяется в соответствии с рекомендациями п. 3.3, Ом.

Аналогично сопротивлению $Z_{л.о}$ подсчитывают и сопротивление $Z_{уч}^{(1)}$. Дополнительный комплект защиты следует установить в таком месте, где сопротивление участка сети между основным и дополнительным комплектами не превышает предельное сопротивление $Z_{пр}$.

Если защищаемая линия выполнена проводом одинаковой площади поперечного сечения по всей длине, то удаленность дополнительной защиты от основной не должна быть больше длины линии l_3 , защищаемой основным комплектом защиты. Длину (м) защищаемой при однофазных к. з. зоны l_3 определяют по формуле

$$l_3 = Z_{пр} / Z_{п.о}, \quad (4.30)$$

где $Z_{пр}$ — предельное сопротивление, мОм; $Z_{п.о}$ — сопротивление 1 м петли фазный — нулевой провод, мОм/м.

Выбор предохранителей завершают проверкой селективности их работы с предшествующими защитными аппаратами. Если предшествующим, считая от потребителя, защитным аппаратом является также предохранитель, то для определения их селективности можно пользоваться следующими сочетаниями номинальных токов плавких вставок, обеспечивающих селективную их работу:

Номинальный ток вставки предшествующего предохранителя, А	6	10	15	20	25	30	35	40
Минимальное по условию селективности значение номинального тока плавкой вставки согласуемого предохранителя, А	15	20	25	35	45	60	60	80

Продолжение

Номинальный ток вставки предшествующего предохранителя, А	45	50	60	80	100	125	160	200
Минимальное по условию селективности значение номинального тока плавкой вставки согласуемого предохранителя, А	80	100	125	160	200	225	300	350

В случаях, когда предшествующим аппаратом защиты для предохранителя является автоматический выключатель, селективную работу удобно проверять по совмещенным защитным характеристикам.

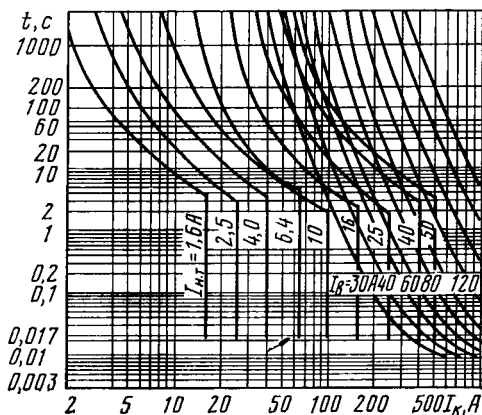


Рис. 4.3. Совмещенные защитные характеристики автоматических выключателей типа АП50Б и предохранителей типа ПН2:

I_k — ток к. з.; I_n — номинальный ток плавкой вставки; $I_{н.Т}$ — номинальный ток теплового расцепителя.

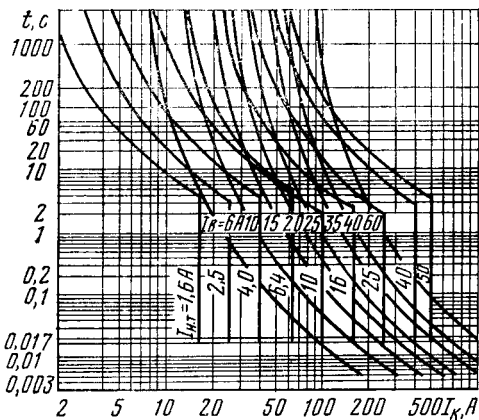


Рис. 4.4. Совмещенные защитные характеристики автоматических выключателей типа АП50Б и предохранителей типа НПН2-60.

На рисунках 4.3 и 4.4 приведены такие характеристики для автоматических выключателей типа АП50Б и предохранителей ПН2 и НПН2-60. Предохранитель будет работать селективно, если его характеристика во всем диапазоне токов (от рабочего до максимального тока трехфазного к. з.) располагается выше характеристики автоматического выключателя, причем минимальное расстояние между характеристиками по вертикали не должно быть меньше 1 с. Опыт показывает, что предохранитель работает селективно с автоматическим выключателем, если выполняется условие:

$$I_{в} \geq 1,2 I_{п. г.}$$

4.4.2. Защита наружных сетей автоматическими выключателями

Защиту наружной сети от к. з. с использованием автоматических выключателей выполняют в следующих вариантах:

- а) автоматическим выключателем со встроенными тепловыми и электромагнитными расцепителями;
- б) автоматическим выключателем со встроенными тепловыми, электромагнитными расцепителями и расцепителем в нулевом проводе;
- в) автоматическим выключателем, имеющим, кроме электромагнитного расцепителя тока, еще и независимый

расцепитель и снабженным приставкой к выключателю типа ЗТ-0,4У2.

Для этих вариантов проверке или расчету подлежат параметры срабатывания тепловых и электромагнитных расцепителей, уставки по току и коэффициенты чувствительности защиты ЗТ-0,4У2.

Намечаемый к установке выключатель сначала проверяют по условиям (4.15) и (4.16), а затем по соотношению (4.19) контролируют соответствие номинального тока теплового расцепителя $I_{н.т}$ рабочему максимальному току нагрузки.

Электромагнитный расцепитель, срабатывая при к. з. почти мгновенно, осуществляет токовую защиту, называемую отсечкой. Для того чтобы отсечка не срабатывала преждевременно и давала возможность отключать поврежденный участок ближайшим к месту повреждения выключателем, ее ток срабатывания $I_{отс}$ должен быть больше, чем ток трехфазного к. з. $I_{к}^{(3)}$ в месте установки предшествующего, считая от потребителя, аппарата защиты, то есть

$$I_{отс} = 1,25 I_{к}^{(3)}. \quad (4.31)$$

Автоматический выключатель должен иметь такое исполнение, чтобы ток срабатывания его электромагнитного расцепителя $I_{э}$ превышал рассчитанный ток срабатывания отсечки:

$$I_{э} \geq I_{отс}. \quad (4.32)$$

Ток срабатывания органа защиты ЗТ-0,4У2, реагирующего на междуфазные к. з., определяют по формуле

$$I_{с.з} = 1,5 I_{р. \max}. \quad (4.33)$$

По вычисленному значению $I_{с.з}$ выбирают ближайшую большую из имеющихся (100, 160, 250 А) уставку срабатывания по току $I_{у}$.

Аналогично определяют уставку срабатывания $I_{у}^{(1)}$ органа защиты ЗТ-0,4У2, реагирующего на однофазные к. з. По току срабатывания этого органа $I_{с.з}^{(1)}$ выбирают ближайшую большую из трех имеющихся уставок: 40, 80, 120 А. Ток срабатывания подсчитывают по формуле

$$I_{с.з}^{(1)} = 0,6 I_{р. \max}. \quad (4.34)$$

Эффективность отсечки оценивают по коэффициенту чувствительности $k_{\text{ч. отс}}$, вычисляемому по соотношению

$$k_{\text{ч. отс}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{з}}}, \quad (4.35)$$

где $I_{\text{к}}^{(2)}$ — ток двухфазного к. з. в месте установки выключателя.

Отсечка считается эффективной, если $k_{\text{ч. отс}} \geq 1,1$.

Чувствительность защиты, осуществляемой тепловым расцепителем, определяют по коэффициенту чувствительности, который должен быть не менее 3. Определяют его по выражению

$$k_{\text{ч. т}} = \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{\text{н. т}}} \geq 3, \quad (4.36)$$

где $I_{\text{к}}^{(1)}$ — ток однофазного к. з. в наиболее удаленной точке защищаемого участка линии.

Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$ органа защиты ЗТ-0,4У2, реагирующего на междуфазные к. з., должен быть не менее 1,5, то есть

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{у}}} \geq 1,5, \quad (4.37)$$

где $I_{\text{к}}^{(2)}$ — ток двухфазного к. з. в наиболее удаленной точке защищаемого участка линии.

Таким же требованиям должен удовлетворять коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}^{(1)}$ органа защиты ЗТ-0,4У2, реагирующего на однофазные к. з.:

$$k_{\text{ч}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к}}^{(1)} - 0,5I_{\text{р. max}}}{I_{\text{у}}^{(1)}} \geq 1,5, \quad (4.38)$$

где $I_{\text{к}}^{(1)}$ — ток однофазного к. з. в самой удаленной в электрическом отношении точке защищаемого участка линии.

Нередки случаи, когда коэффициенты чувствительности, подсчитанные по соотношениям (4.35...4.38), оказываются ниже нормируемых значений. Если $k_{\text{ч. отс}} < 1,1$, то это свидетельствует о том, что отсечка будет срабатывать только при трехфазных к. з., возникающих в начале защищаемого участка. Специальных мер по повышению чувствительности отсечки обычно не предпринимают.

Если коэффициент чувствительности $k_{\text{ч. т}}$ защиты, реагирующим органом которой является тепловой рас-

цепитель, оказывается меньше трех, то необходимо установить дополнительный комплект защиты, так как основной не охватывает весь выделенный под его защиту участок сети. Месторасположение дополнительной защиты определяют в такой же последовательности, как это изложено в п. 4.4.1 применительно к предохранителям. Только для автоматического выключателя с тепловыми расцепителями предельное сопротивление определяют по несколько иной формуле:

$$Z_{\text{пр}} = \frac{45}{I_{\text{н. т}}} - \frac{1}{3} Z_{\text{н}}^{(1)} - Z_{\text{л. о.}} \quad (4.39)$$

В ряде случаев дополнительный комплект защиты можно не устанавливать, если в основном комплекте использовать защиту типа ЗТ-0,4У2 совместно с автоматическим выключателем, имеющим независимый расцепитель.

Наличие приставки типа ЗТ-0,4У2 позволяет обеспечить селективную работу автоматических выключателей между собой или с предшествующими им предохранителями. Селективность в этих случаях достигается за счет выбора у каждой последующей, считая от электроприемника, защиты нарастающих по значению уставок срабатывания по току и по времени. Даже при одинаковых уставках по току срабатывания две последовательно включенные на одной линии защиты ЗТ-0,4У2 будут работать селективно, если у предшествующей уставку по времени принять 0,3 с, а у последующей — 0,6 с.

В остальных случаях добиться селективной работы выключателей, как правило, не удастся.

4.5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ЗАЩИТЫ СЕТЕЙ, ПИТАЕМЫХ ОТ ДЭС

Защиту сети напряжением 380/220 В, питаемой от ДЭС, выполняют чаще всего автоматическими выключателями. Схемами первичных соединений большинства ДЭС предусматривается присоединение генератора к шинам станции и каждой отходящей от них линии через отдельный выключатель. Автоматические выключатели поставляют комплектно с ДЭС, и в задачу обслуживающего персонала входит выполнение проверочного расчета параметров срабатывания электромагнитных и тепловых

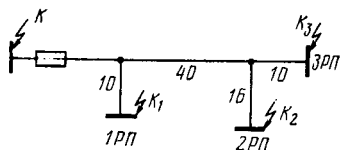


Рис. 4.5. Схема сети к примеру 4.3.

расцепителей этих выключателей. При этом особое внимание следует обращать на учет пусковых токов электродвигателей.

Расчет выполняют в такой же последовательности, как это изложено в п.п. 4.3 и 4.4. Некоторое отличие есть только в определении чувствительности защит. Если защита выполнена автоматическим выключателем, то коэффициент чувствительности его теплового расцепителя $k_{\text{ч.т}}^{(3)}$ следует определять не по соотношению (4.36), а по выражению

$$k_{\text{ч.т}}^{(3)} = \frac{I_{\text{уст}}^{(3)}}{I_{\text{н.т}}} \geq 2, \quad (4.40)$$

где $I_{\text{уст}}^{(3)}$ — установившийся ток трехфазного к. з. в наиболее удаленной точке защищаемой сети.

По рассчитанным параметрам настраивают тепловой расцепитель, если это позволяет сделать конструкция автоматического выключателя.

Пример 4.3. Выбрать плавкую вставку предохранителей ПР2, выполняющих защиту от к. з. наружной сети напряжения 380/220 В, схема которой приведена на рисунке 4.5. Сведения о питаемых этой сетью объектах приведены в таблице 4.2, а результаты расчета токов к. з. — в таблице 4.3. Сеть выполнена проводом А95. Тип предохранителя обусловлен используемой типовой КТП 10/0,4 кВ.

Вычислим рабочие максимальные токи каждого объекта электроснабжения.

$$\text{Установка вентилирования сена: } I_{\text{р. max}} = \frac{S_{\text{р1}}}{\sqrt{3} U} = \frac{49,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 75 \text{ А.}$$

$$\text{Коровник: } I_{\text{р. max}} = \frac{32 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 48,6 \text{ А.}$$

$$\text{Телятник: } I_{\text{р. max}} = \frac{61 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 92,7 \text{ А.}$$

Определим теперь расчетную мощность и рабочий максимальный ток на головном участке линии, то есть там, где будут расположены предохранители ПР2:

$$S_{\text{р}} = k_0 \sum_{i=1}^{i=3} S_{\text{рi}} = 0,8 (49,4 + 32 + 61) = 142,4 \text{ кВт} \cdot \text{А};$$

$$I_{\text{р. max}} = \frac{142,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 216,3 \text{ А.}$$

4.2. Данные к примеру 4.3

Номер распределительного щита	Наименование объекта электропитания	Установленная мощность, кВт	Расчетная мощность, S_{p1} , кВт·А	Сведения о наиболее мощном электродвигателе		
				номинальная мощность, кВт	кратность пускового тока	режим пуска
1РП	Установка вентилирования сена	37	49,4	18,5	7,0	Нормальный
2РП	Коровник на 200 коров	60	32	5,5	7,0	Тяжелый
3РП	Телятник на 160 телят	94	61	11,0	7,5	Нормальный

4.3. Результаты расчета токов к. з.

Точки к. з. (рис. 4.5)	Токи к. з., А		
	трехфазного	двухфазного	однофазного
K	4890	4254	4890
K_1	2315	2014	1293
K_2	1928	1677	1013
K_3	1964	1709	1038

Используя соотношение (4.11), находим максимальный ток на головном участке линии. Анализ таблицы 4.2 показывает, что максимальным ток будет в режиме, когда коровник и телятник потребляют свои рабочие токи, работает один из двигателей установки вентилирования сена, а второй при этом запускается:

$$I_{\max} = I_n + k_0 \sum I_{p, \max} = 7 \cdot 35,5 + 0,8 (35,5 + 48,6 + 92,7) = 389,94 \text{ А.}$$

По соотношениям (4.8) и (4.9) определяем ток плавкой вставки: $I_B \geq 216,3 \text{ А}$; $I_B \geq 389,94/3 = 129,98 \text{ А}$.

По таблице 2.1 выбираем плавкую вставку с номинальным током 225 А. Проверяем выбранную плавкую вставку на отключающую способность: предельный ток отключения предохранителя ПР2 с выбранной вставкой составляет 6 кА, а максимальное значение тока к. з. в

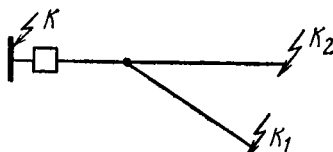


Рис. 4.6. Схема сети к примеру 4.4.

месте установки предохранителя составляет 4,89 кА (см. табл. 2.1 и 4.3.)

Теперь по соотношению (4.28) проверяем эту вставку на чувствительность к однофазным к. з.: $1013 : 225 = 4,5$, что больше 3.

Пример 4.4. Выбрать аппарат защиты наружной сети напряжением 380/220 В от к. з. Схема сети показана на рисунке 4.6. Дано, что рабочий максимальный ток на головном участке линии $I_{p. \max} = 65$ А, а максимальный ток при пуске наиболее мощного двигателя $I_{\max} = 120$ А. Результаты расчета токов к. з. таковы:

Точки к. з. Токи к. з., А:	K	K_1	K_2
трехфазного $I_K^{(3)}$	1832	1115	648
двухфазного $I_K^{(2)}$	1594	970	564
однофазного $I_K^{(1)}$	1932	324	227

Используя соотношение (4.19), выбираем автоматический выключатель с номинальным током электромагнитных и тепловых расцепителей $I_{н.т} = 80$ А: АЕ2056-ОРУЗ. Ток срабатывания его электромагнитного расцепителя, то есть ток срабатывания отсечки $I_{\text{отс}} = I_{с.отс} = 12 \cdot 80 = 960$ А, что значительно больше $I_{\max} = 120$ А. Таким образом, условие (4.20) выполняется.

По соотношению (4.36) определяем чувствительность теплового расцепителя к однофазным к. з. Наименьший ток имеем в точке K_2 , поэтому $k_{ч.т} = I_{K_2}^{(1)} / I_{н.т} = 227 : 80 = 2,84 < 3$. Так как должно быть $k_{ч.т} < 3$, то необходимо предусмотреть меры по повышению чувствительности защиты или поставить еще один комплект защиты, например в начале отпайки к точке K_2 .

Проверяем возможность повышения чувствительности защиты до нормируемого значения использованием приставки ЗТ-0,4У2. Для этого выбираем автоматический выключатель, например АЕ2057-32УЗ, с напряжением срабатывания 36 В. Выбранный выключатель также имеет электромагнитные расцепители с номинальным током 80 А, то есть ранее рассчитанный ток срабатывания отсечки остается в силе и для нового исполнения защиты.

Определяем по выражению (4.33) ток срабатывания органа защиты ЗТ-0,4У2, реагирующего на междуфазные к. з.: $I_{с.з} = 1,5 I_{p. \max} = 1,5 \cdot 65 = 97,5$ А. Принимаем уставку по току $I_y = 100$ А, уставку по времени — 0,3 с. Вычисляем по формуле (4.34) ток срабатывания органа защиты, реагирующего на однофазные к. з. $I_{с.з}^{(1)} = 0,6 I_{p. \max} = 0,6 \cdot 65 = 39$ А. Принимаем ток уставки $I_y^{(1)} = 40$ А.

Используя соотношения (4.37) и (4.38), проверяем чувствительность защиты ЗТ-0,4У2 к междуфазным к. з.: $k_{ч} = I_{K_2}^{(2)} / I_y = 564 : 100 = 5,64 > 1,5$; к однофазным к. з.:

$$k_{ч}^{(1)} = \frac{I_{K_2}^{(1)} - 0,5 I_{p. \max}}{I_y^{(1)}} = \frac{227 - 0,5 \cdot 65}{40} = 4,86 > 1,5.$$

Теперь определяем эффективность отсечки по формуле (4.35).

$$k_{ч.отс} = I_{K_2}^{(2)} / I_{\text{отс}} = 1594 : 960 = 1,66 > 1,1.$$

Таким образом, применив высокочувствительную защиту ЗТ-0,4У2, удалось защитить одним комплектом защиты всю линию.

Осталось проверить выбранный выключатель на коммутационную способность. Из таблицы 2.6 следует, что отключающая способность выключателя пятой величины с номинальным током максимальных расцепителей 80 А составляет 9 кА. Ожидаемый максимальный ток трехфазного к. з. в месте установки выключателя (точка К) составляет всего 1,832 кА. Так что условие (4.16) выполняется.

4.6 НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИЗАЦИИ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 380/220 В

Протяженность сельских сетей напряжением 380/220 В превышает 1,8 млн. км. Оказываясь под различного рода воздействиями — грозowymi перенапряжениями, низкими температурами, сильными ветрами, гололедными образованиями и т. п., низковольтные линии довольно часто выходят из строя. Это приводит к отключению сельскохозяйственных потребителей, что наносит ущерб народному хозяйству. Правильный выбор защиты позволяет отключить повреждение ближайшим защитным аппаратом и существенно сократить размер ущерба от недоотпуска электроэнергии.

Рассмотренные типы защит в определенных режимах работы сетей оказываются несовершенными. Например, почти все виды рассмотренных защитных устройств имеют низкую чувствительность к однофазным к. з., не всегда обеспечивают эффективную защиту электродвигателей от перегрузки, от неполнофазных режимов.

Поэтому наши ученые, отечественная электропромышленность заняты разработкой и подготовкой к выпуску новых, более совершенных видов устройств защиты и автоматизации низковольтных сетей.

Использование новой элементной базы — микроэлектроники и полупроводниковых приборов открывает новые перспективы перед создателями таких устройств. Появляется возможность сделать их универсальными, более чувствительными, правильно реагирующими не только на простые, но и на сложные виды аварийных и ненормальных режимов. Примерами таких защитных устройств, разрабатываемых в настоящее время, могут быть комплектное устройство защиты от всех видов повреждений, токовая фазосравнивающая защита от замыканий на землю, самонастраивающаяся токовая защита сетей 380/220 В.

Большой вклад в разработку новых устройств защи-

ты и автоматизации сетей вносят ученые Московского института инженеров сельскохозяйственного производства (МИИСП).

Интенсивно ведутся разработки средств автоматизации сети напряжением 380/220 В. Одним из таких средств является устройство автоматического повторного включения (АПВ). Известно, что в воздушных сетях большинство коротких замыканий носит неустойчивый характер. Это связано с тем, что в месте возникновения к. з. чаще всего образуется и горит электрическая дуга. При отключении линии дуга гаснет, воздушный промежуток, в котором она горела, быстро восстанавливает свою диэлектрическую прочность и при повторном включении линии возобновляется электроснабжение потребителей.

Неустойчивый характер коротких замыканий, способность большинства из них самоустраняться при отключении линии широко используется для повышения надежности электроснабжения. На линиях напряжением 10 кВ и выше уже давно применяются устройства АПВ. Процент их успешных действий достигает 80. Доказана целесообразность использования этого вида сетевой автоматики и для сетей напряжением 380/220 В. На ближайшие годы планируется разработка и выпуск таких устройств. Ими будут комплектоваться коммутационные аппараты для того, чтобы восстанавливать электроснабжение после отключений коротких замыканий.

Большой ущерб сельскохозяйственному производству наносят неполнофазные режимы работы сетей. Одна из причин появления неполнофазных режимов — обрыв фазного провода. Последствия такого повреждения могут быть самые тяжелые: массовый выход из строя электродвигателей, электротравматизм людей и животных.

В МИИСПе разработано устройство, выявляющее обрыв проводов в низковольтной линии. Срабатывание устройства в конечном итоге приводит к отключению линии с оборванным фазным проводом.

Регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) является довольно распространенным видом сетевой автоматики. Но до настоящего времени регулирование напряжения в сельских сетях напряжением 380/220 В практически не осуществлялось. Имеющееся на силовых трансформаторах устройство переключения ответвлений позволяет при отключенном трансформаторе изменять его коэффициент трансформации в пределах $\pm 2 \times 2,5\%$. Этот

способ регулирования называют переключением без возбуждения (ПБВ) и используют обычно в сочетании с РПН на питающих подстанциях и для сезонного регулирования напряжения.

В связи с тем, что на подавляющем большинстве подстанций, питающих распределительные электрические сети сельских районов, отсутствуют устройства РПН, а возможности регулирования ПБВ часто не используются, качество напряжения на зажимах сельскохозяйственных электроприемников в ряде случаев не отвечает нормам. Плохое качество напряжения вызывает нежелательные последствия, в том числе и перегрузку электрических сетей.

Для улучшения качества напряжения на зажимах сельскохозяйственных электроприемников Всесоюзным институтом электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ) разработано устройство РПН трансформаторов с использованием полупроводниковых приборов. Как сама схема регулирования, так и переключающее устройство будут иметь гораздо бóльшую надежность и долговечность, чем существующие конструкции на контактных элементах. С бесконтактными устройствами РПН будут выпускаться трансформаторы как для питающих, так и для потребительских подстанций. Использование этих трансформаторов существенно улучшит качество напряжения в сельских электрических сетях.

Комплексная электрификация сельского хозяйства предполагает широкое применение электрической энергии для удовлетворения тепловых нужд сельскохозяйственного производства. Но электрообогрев является очень энергоемким видом электропотребления. Он может создавать большие трудности в работе энергосистем, приводя к снижению частоты, и вызывать перегрузку сельских электрических сетей. Поэтому энергосистемы иногда ограничивают электронагрев в сельскохозяйственном производстве или разрешают его только в часы минимальных нагрузок, когда электростанции и электрические сети работают с недогрузкой.

Эстонские электрификаторы разработали автоматическое устройство, которое позволяет применять электроэнергию для получения тепла в разрешенные энергосистемой часы суток. Такого рода устройства создают положительный экономический эффект не только в сель-

скохозяйственном производстве, но и в энергетических системах.

Для повышения надежности электроснабжения ответственных сельскохозяйственных потребителей, особенно потребителей первой категории, решено использовать резервирование не только по сетям энергосистем, но и местное от резервных дизельных электростанций. Эффект от местного резервирования будет высоким, если перерывы в электроснабжении будут минимальными, что обеспечивается автоматическим подключением ДЭС. Большинство видов дизельных электростанций, поступающих в хозяйства, позволяют осуществить эту операцию. Но реализовать ее на практике обычно не удастся, так как при проектировании, а затем и при строительстве объекта, электроснабжение которого подлежит резервированию, не предусмотрен ряд обстоятельств.

Во-первых, не предусмотрено место для расположения и подключения резервной ДЭС. Наиболее удобными для этих целей оказываются закрытые трансформаторные подстанции.

Во-вторых, электроприемники первой категории, для резервирования электроснабжения которых устанавливается ДЭС, оказываются присоединенными не к отдельной одной или двум линиям, а подключены к разным, чаще всего ко всем питающим линиям. Поэтому на вновь сооружаемых объектах электроснабжения следует учитывать эти обстоятельства.

Краткий перечень новых разработок по защите и автоматизации сельских электрических сетей напряжением 380/220 В свидетельствует о том, что в ближайшее время в распоряжение сельских электриков поступит большое количество новой аппаратуры. Для организации правильной эксплуатации ее сельские электрики должны постоянно повышать свои технические знания. Только в этом случае они окажутся в состоянии успешно выполнить свои задачи по реализации Продовольственной программы партии.

Приложение 1. Расчетные сопротивления трансформаторов 10/0,4 кВ, приведенные к напряжению 0,4 кВ (по данным института «Сельэнергопроект»)

Номинальная мощность, кВ·А	Схемы соединения обмоток	Сопротивление прямой последовательности, мОм			Расчетное сопротивление при однофазном к. з., мОм, $\frac{1}{3} Z_T^{(1)}$
		R_T	X_T	Z_T	
25	Y/Y	154	244	228	1040
25	Y/Y	184	245	307	222
40	Y/Y	88	157	180	650
40	Y/Y	100	159	188	137
63	Y/Y	53	101	114	411
63	Y/Y	61	103	119	88
100	Y/Y	32	70,6	72	260
100	Y/Y	37	74	75	55
160	Y/Y	16,7	42	45	162
160	Y/Y	19,5	42,7	47	47
250	Y/Y	9,5	26,8	28,9	104
250	Y/Y	10,8	28,2	30	30
400	Y/Y	5,5	17,1	18	65
400	Δ/Y	5,9	16,9	18	18,7
630	Y/Y	3,1	13,7	14	43
630	Δ/Y	3,4	13,6	14	14

Приложение 2. Сопротивления 1 м фазных проводов воздушных линий напряжением 380/220 В, мОм (Ом/км)

Марка и номинальная площадь поперечного сечения провода, мм ²	Сопротивления			Марка и номинальная площадь поперечного сечения провода, мм ²	Сопротивления		
	активное r_0	индуктивное x_0	полное z_0		активное r_0	индуктивное x_0	полное z_0
A16	1,77	0,389	1,81	A50	0,59	0,353	0,69
A25	1,15	0,376	1,21	AC50/8			
АН25	1,49	0,376	1,54	АН50	0,74	0,353	0,82
АЖ25				АЖ50			
A35	0,83	0,362	0,909	A70	0,42	0,341	0,54
AC35/6.2				A70/11			
АН35	1,06	0,362	1,12	A95	0,3	0,331	0,45
АЖ35				AC95/15			

Приложение 3. Сопротивления 1 м кабелей и проводов, выполненных в трубах изолированными проводами с алюминиевыми жилами

Площадь поперечного сечения жилы, мм ²		Активное сопротивление фазной жилы, мОм/м	Индуктивное сопротивление, мОм/м	
фазной	нулевой		трехжильного кабеля (провода)	четырёхжильного кабеля (провода)
6	4	6,41	0,087	0,094
10	6	3,84	0,082	0,088
16	10	2,40	0,078	0,084
25	16	1,54	0,062	0,072
35	16	1,10	0,061	0,065
50	25	0,77	0,060	0,068
70	35	0,55	0,059	0,066
95	50	0,41	0,057	0,064

Приложение 4. Полное сопротивление $Z_{\text{по}}$ 1 м петли фазный — нулевой провод воздушной четырехпроводной линии с неизолированными алюминиевыми проводами, мОм/м (Ом/км)

Марка и сечение фазного провода	Погонное сопротивление петли с маркой и сечением нулевого провода, мОм/м						
	A16	A25	A35	A50	A70	A95	A120
A16	4,87	—	—	—	—	—	—
A25	4,04	3,21	2,79	2,46	—	—	—
A35	3,62	2,79	2,57	2,05	1,82	—	—
A50	3,28	2,46	2,05	1,73	1,53	1,40	—
A70	—	2,25	1,82	1,53	1,34	1,21	1,14
A95	—	2,11	1,71	1,4	1,21	1,09	1,03
A120	—	—	1,63	1,33	1,14	1,03	0,93

Приложение 5. Полное сопротивление $Z_{\text{по}}$ 1 м петли фазный — нулевой провод кабельных четырехпроводных линий и проводов, выполненных изолированными проводами, мОм/м (Ом/км)

Площадь поперечного сечения провода, мм ²		$Z_{\text{по}}$			
		кабелей и проводов в трубах		проводов на роликах или изоляторах	
фазного	нулевого	медных	алюминиевых	медных	алюминиевых
1,5	1	31,5	—	—	—
1,5	1,5	25,2	—	25,2	—
2,5	1,5	20,2	—	20,2	—
2,5	2,5	15,1	25,2	15,1	25,2
4	1,5	17,3	—	17,3	—
4	2,5	12,2	20,5	12,2	20,5
4	4	9,3	15,8	9,3	15,8
6	2,5	10,6	17,9	10,6	17,9
6	4	7,71	13,2	7,71	13,2
6	6	6,12	10,5	6,14	10,5
10	4	6,50	11,1	6,52	11,1
10	6	4,90	8,42	4,92	8,42
10	10	3,68	6,32	3,71	6,32
16	6	4,26	7,24	4,28	7,24
16	10	3,04	5,14	3,08	5,15
16	16	2,40	3,96	2,45	3,99
25	10	2,58	4,44	2,62	4,46
25	16	1,94	3,26	1,98	3,30
25	25	1,49	2,56	1,55	2,60
35	10	2,38	4,08	2,42	4,11
35	16	1,74	2,90	1,79	2,94
35	35	1,09	1,84	1,16	1,90
50	16	1,60	2,62	1,65	2,66
50	25	1,14	1,92	1,21	1,97
50	50	0,793	1,29	0,890	1,36
70	25	1,03	1,74	1,11	1,80
70	35	0,833	1,39	0,927	1,45
70	70	0,58	0,93	0,706	1,03
95	35	0,755	1,27	0,856	1,34
95	50	0,608	0,99	0,712	1,08
95	95	0,428	0,80	0,566	0,815

Приложение 6. Длительные допустимые токовые нагрузки на неизолированные провода при температуре нагрева проводов $+70^{\circ}\text{C}$ и температуре окружающего воздуха $+25^{\circ}\text{C}$

Медные провода			Алюминиевые провода			Сталеалюминиевые провода		Стальные провода	
площадь поперечного сечения, мм ²	нагрузка током, А		площадь поперечного сечения, мм ²	нагрузка током, А		площадь поперечного сечения, мм ²	нагрузка током вне помещения, А	марка	нагрузка током вне помещения, А
	вне помещения	внутри помещения		вне помещения	внутри помещения				
4	50	25	10	75	55	10	80	ПС03	23
6	70	35	16	105	75	16	105	ПС03,5	26
10	95	60	25	135	105	25	130	ПС04	30
16	130	100	35	170	130	35	175	ПС05	35
25	180	135	50	215	165	50	210	ПС25	70
35	220	170	70	265	210	70	265	ПС35	80
50	270	220	95	320	255	95	330	ПС50	90
			120	375	300	120	380	ПС70	125
70	340	270	150	440	355	150	445		
95	415	335	185	500	410	185	510		
120	485	395	240	590	490	240	610		
						300	690		

Приложение 7. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода и шнуры с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией с медными жилами

Площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм ²	Токовые нагрузки на провода, А					
	проложенные открыто	проложенные в одной трубе				
		два одно-жилных	три одно-жилных	четыре одно-жилных	один двух-жилный	один трех-жилный
0,5	11	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—
1	17	16	15	14	15	14
1,5	23	19	17	16	18	15
2,5	30	27	25	25	25	21
4	41	38	35	30	32	27
6	50	46	42	40	40	34
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215

Приложение 8. Длительно допустимые токовые нагрузки на провода с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией с алюминиевыми жилами

Площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм ²	Токовые нагрузки на провода, А					
	проложенные открыто	проложенные в одной трубе				
		два одно-жилных	три одно-жилных	четыре одно-жилных	один двух-жилный	один трех-жилный
2,5	24	20	19	19	19	16
4	32	28	28	23	25	21
6	39	36	32	30	31	26
10	55	50	47	39	42	38
16	80	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	265	215	200	175	190	165

Приложение 9. Поправочные коэффициенты k_T на температуру земли и воздуха для токовых нагрузок на кабели, изолированные и неизолированные провода

Расчетная температура среды, °С	Нормированная температура жил, °С	Поправочные коэффициенты при фактической температуре, °С					
		-5	0	+5	+10	+15	+20
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05
15	65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06

Продолжение

Расчетная температура среды, °С	Нормированная температура жил, °С	Поправочные коэффициенты при фактической температуре, °С					
		+25	+30	+35	+40	+45	+50
25	70	1,0	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15	65	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
25	65	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61

Введение	3
1. Особенности сельских электрических сетей напряжением 380/220 В, причины и следствия коротких замыканий и перегрузок	5
1.1. Особенности электрических сетей сельскохозяйственного назначения	5
1.2. Причины и следствия коротких замыканий	6
1.3. Причины и следствия перегрузок электрических сетей напряжением 380/220 В	12
1.4. Мероприятия по предотвращению коротких замыканий	15
2. Основные типы защитных аппаратов	18
2.1. Конструкции основных типов предохранителей	18
2.1.1. Принцип действия предохранителей	18
2.1.2. Конструкция предохранителей типа ПР2	21
2.1.3. Конструкция предохранителей типа ПН2	23
2.1.4. Конструкция предохранителей типа НПН2-60	26
2.2. Конструкции основных типов автоматических воздушных выключателей	27
2.2.1. Назначение и принцип действия автоматических выключателей	27
2.2.2. Конструкция автоматических выключателей серии АП50Б	30
2.2.3. Конструкция автоматических выключателей серии АЕ20	33
2.2.4. Конструкция автоматических выключателей серии А3700	38
2.3. Другие виды аппаратов, используемых для защиты от коротких замыканий	45
3. Расчеты токов коротких замыканий	48
3.1. Основные задачи расчета токов коротких замыканий	48
3.2. Составление расчетных схем и схем замещения	50
3.3. Расчеты токов к. з. для воздушных сетей напряжением 380/220 В	55
3.4. Особенности расчетов токов к. з. для кабельных сетей напряжением 380/220 В, внутренних проводок сельскохозяйственных помещений и сетей со стальными проводниками	57
3.5. Проверка проводов и кабелей на термическую устойчивость	62
3.6. Расчет токов к. з. для сети, питаемой от резервных дизельных электростанций	64

4. Защита электрических сетей напряжением 380/220 В от коротких замыканий и перегрузки	70
4.1. Общие требования к защите сети от коротких замыканий и перегрузки	70
4.2. Учет асинхронных двигателей при расчетах защит от к. з. и перегрузки. Проверка сети напряжением 380 В по условиям успешного пуска электродвигателей	72
4.3. Защита внутренних проводок сельскохозяйственных производственных помещений	78
4.3.1. Защита предохранителями	78
4.3.2. Защита автоматическими выключателями	83
4.4. Защита наружных электрических сетей	87
4.4.1. Защита наружных сетей предохранителями	87
4.4.2. Защита наружных сетей автоматическими выключателями	90
4.5. Особенности расчетов защиты сетей, питаемых от ДЭС	93
4.3 Новые разработки устройств защиты и автоматизации сетей напряжением 380/220 В	97
Приложения	101
Указатель литературы	107