

А. В. БЕЛЯЕВ

**ВЫБОР АППАРАТУРЫ,
ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ
В СЕТЯХ 0,4 кВ**

Федеральное агентство по энергетике
Федеральное государственное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования

ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
(ФГОУ ДПО «ПЭИПК»)

Кафедра релейной защиты и автоматики
электрических станций, сетей и энергосистем

А.В. БЕЛЯЕВ

ВЫБОР АППАРАТУРЫ, ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ
В СЕТЯХ 0,4 кВ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2008

УДК 621.316.9
ББК 31.232.3
Б 44

Одобрены и рекомендованы к опубликованию Ученым советом института
Протокол № 4 от 20 декабря 2006 г.

Научный редактор М.А. Шабад, профессор кафедры РЗА.

БЕЛЯЕВ А. В.

Б 44 **Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ.** – СПб.: ПЭИПК, 2008 г. – 230 с.

В книге рассмотрены расчеты токов коротких замыканий, выбор аппаратуры, защит и кабелей в электрических сетях 0,4 кВ электростанций и подстанций энергосистем, промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Приведены справочные материалы, необходимые для расчетов. Рассмотрены вопросы аварийного электроснабжения, дальнего резервирования отказов защит и выключателей и применения цифровой техники в сетях этого напряжения.

Предназначена для работников проектных организаций и для персонала, обслуживающего электрические сети.

УДК 621.316.9
ББК 31.232.3

ISBN 978-5-88718-009-9

© ПЭИПК, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети 0,4 кВ являются наиболее распространенными, они применяются на всех промышленных и сельскохозяйственных предприятиях, электростанциях и подстанциях. От этих сетей во многом зависит надежная работа предприятий.

За последние годы техническая оснащенность сетей 0,4 кВ существенно изменилась. Получили распространение понижающие трансформаторы 6(10)/0,4 кВ большой мощности (1000, 1600, 2500 кВ·А), что привело к значительному увеличению значений токов короткого замыкания (КЗ). Созданы новые типы защитных аппаратов, способных отключать эти токи, а также ограничивать их максимальное значение, уменьшать их термическое и электродинамическое действие на защищаемые сети и аппаратуру. Для получения регулируемых защитных характеристик стали применяться выключатели с полупроводниковыми и цифровыми (микропроцессорными) расцепителями. Наряду с этим совершенствуются расчетные методы выбора аппаратуры и защит.

С применением понижающих трансформаторов большой мощности стало очевидным существенное влияние токоограничивающего действия электрической дуги в месте повреждения на значения токов КЗ. Это потребовало проведения соответствующих исследований и совершенствования расчетных методов определения токов КЗ.

Сопротивление электрической дуги в месте повреждения, особенно вблизи мощных питающих источников, оказалось настолько значительным, что способно поддерживать напряжение в месте КЗ близким к половине номинального. Поэтому применяемые ранее методы блокировки максимальных токовых защит трансформаторов 10(6)/0,4 кВ по напряжению для обеспечения несрабатывания защиты при пуске и самозапуске электродвигателей оказались непригодными. Появились новые разработки в этой области.

В сетях 0,4 кВ всегда остро стояла проблема дальнего резервирования отказов защит и выключателей. Осуществить это резервирование теми же традиционными методами, как в сетях высокого напряжения, не удавалось из-за очень существенного снижения значений токов КЗ по мере удаления точки КЗ от источников питания. Разрешить эту проблему оказалось возможным только в последние годы, когда для защиты электрических сетей стала применяться цифровая техника.

Для повышения надежности электроснабжения на многих предприятиях строят собственные электростанции небольшой мощности напряжением 6(10) кВ. Широкое распространение получает аварийное электроснабжение от собственных маломощных дизель-генераторов напряжением

0,4 кВ. При этом сети 0,4 кВ работают в особо сложных условиях, когда при питании от энергосистемы токи КЗ могут быть весьма значительны, а при питании от собственных электростанций или аварийных источников уменьшаются в несколько раз. Однако требования к защите сети (быстродействие, надежность, селективность, чувствительность) не снижаются. В этих условиях особенно остро встает вопрос комплексного подхода к выбору аппаратуры, защит и кабелей. Наряду с этим применяются специальные решения по обеспечению самозапуска электродвигателей, поскольку мощность аварийного источника питания меньше основного.

Это вносит свои особенности в расчеты токов КЗ и защит – при питании от маломощных генераторов в ряде случаев возникает необходимость учитывать затухание токов КЗ в сетях напряжением 0,4 кВ.

Получают распространение цифровые защиты трансформаторов 6(10)/0,4 кВ, для которых также необходимо учитывать специфику расчетов и выполнения логики защиты.

В этой книге, которая является значительно дополненным изданием моей работы, выпущенной в 1988 г. под таким же названием, сделана попытка осветить накопленный опыт решения указанных выше проблем.

Главы 14 и 15 книги написаны совместно с кандидатом технических наук М.А. Эдлиным.

Цель данной книги – оказать читателю практическую помощь при выборе аппаратуры, защит, кабелей, а также построении схем сетей 0,4 кВ, поскольку все эти вопросы для сетей данного напряжения неразрывно связаны и при рациональном проектировании должны решаться совместно.

В книге показано, как рассчитать токи КЗ, учесть токоограничивающее действие электрической дуги в месте повреждения, какие значения токов принять для выбора аппаратуры и какие – для проверки чувствительности защит, как оценить возможность самозапуска электродвигателей и рассчитать возникающие в этом режиме токи. Дана информация об автоматических выключателях и предохранителях и их защитных характеристиках. Рассмотрены вопросы выбора кабелей, аппаратуры, рабочих уставок защит электродвигателей, сборок, питающих трансформаторов и аварийных генераторов. Указано на недостатки защитных характеристик некоторых типов существующих автоматических выключателей. Описаны выносные релейные защиты и области их применения. Изложены принципы выполнения аварийного электроснабжения и обеспечения группового и поочередного самозапуска электродвигателей. Рассмотрены особенности защит аварийных генераторов 0,4 кВ и трансформаторов 6(10)/0,4 кВ, выполнение блокировки максимальных токовых защит трансформаторов и генераторов при пуске и самозапуске электродвигателей, а также дальнего резервирования отказов защит и выключателей на основе применения цифровых реле. Даны примеры решения задач.

В приложении приведены справочные материалы для расчетов токов КЗ.

Сеть напряжением 0,4 кВ может хорошо функционировать только тогда, когда заранее предусмотрены и рассчитаны все возможные режимы ее работы, правильно выбраны первичные схемы, кабели, защиты, противоаварийная автоматика, схемы управления каждого присоединения. Только в условиях такого комплексного подхода ее правильное функционирование подобно хорошо настроенному роялю (по выражению М.А. Шабада). В этом самое главное отличие этих сетей от сетей более высоких напряжений, самая большая трудность и большое поле деятельности для будущих поколений релейщиков. К сожалению, на практике это очень редко встречается. Поэтому задача всех релейщиков – совершенствовать эти сети, добиваясь приближения к идеалу. Автор надеется, что данная книга поможет его приближению.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность за ценные советы и помощь в работе над книгой профессору М.А. Шабаду.

Замечания и отзывы просьба направлять по адресу: 196135, г. Санкт-Петербург, Авиационная ул., 23, Петербургский энергетический институт повышения квалификации, кафедра РЗА.

1. СХЕМЫ СЕТЕЙ 0,4 кВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

Построение первичных схем сетей 0,4 кВ определяется технологией производства, требованиями надежности электроснабжения электроприемников в соответствии с ПУЭ [1, 2], удобством обслуживания, технико-экономическими показателями, а также требованиями защиты и автоматизации. Схемы могут выполняться радиальными, магистральными и смешанными.

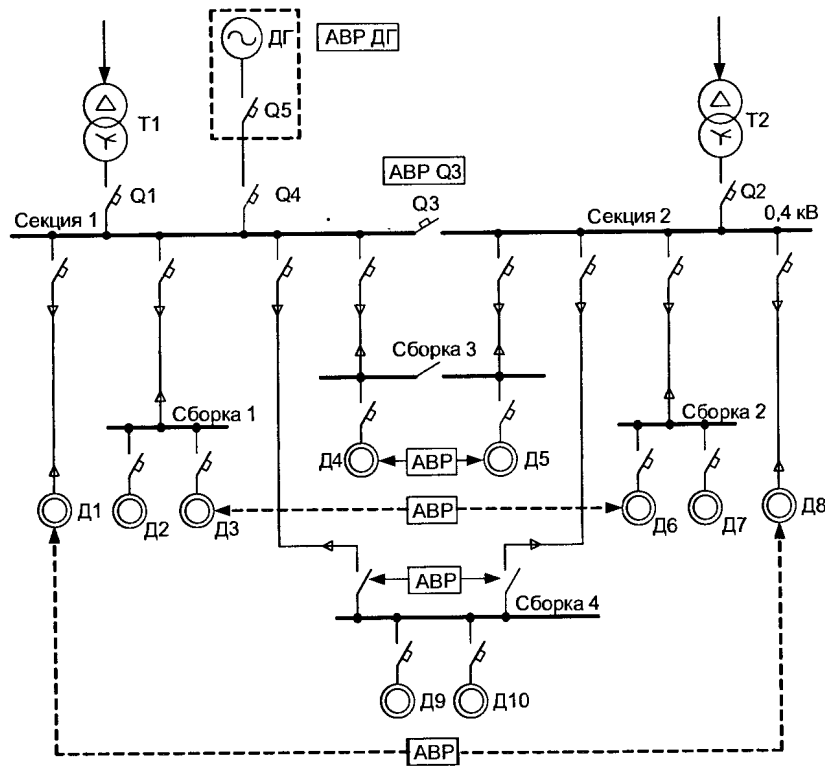


Рис. 1-1. Радиальная схема:

T – питающие трансформаторы; $ДГ$ – аварийный дизель-генератор; Q – вводные и секционный автоматические выключатели; $Д$ – электродвигатели

Радиальные схемы (рис. 1-1). От главного распределительного щита или комплектной трансформаторной подстанции (КТП) отходят линии питания электродвигателей $Д1$ и $Д8$ и других электроприемников большой мощности, а также *сборок 1–4* (распределительных пунктов). К главному

щиту нецелесообразно подключать большое количество электроприемников малой и средней мощности, так как они снижают его надежность. Для питания таких электроприемников (например, электродвигателей $Д2$ – $Д7$, $Д9$ – $Д10$) образуют вторичные сборки, питающиеся непосредственно от главного щита, и третичные сборки, питающиеся от вторичныхборок. Третичные сборки обладают наименьшей надежностью, их селективную защиту выполнить трудно, и поэтому их применяют лишь в отдельных случаях, для питания мелких и неотвественных электроприемников. Токи КЗ на сборках значительно меньше, чем на главном щите 0,4 кВ, что позволяет применять более дешевую и менее стойкую аппаратуру с меньшими значениями номинальных токов. При образованииборок учитывается территориальное расположение электроприемников, удобство обслуживания, возможность экономии кабелей, поскольку сечение питающей сборки кабеля принимают меньше суммы сечений кабелей индивидуальных электроприемников ввиду их одновременного включения.

Распределение электродвигателей по сборкам зависит от их мощности и возможности выполнения защиты сети. Техничко-экономические расчеты показывают, что к главному щиту целесообразно, как правило, подключать электродвигатели большой мощности (более 55 кВт). Электродвигатели малой (до 10 кВт) и средней (10–55 кВт) мощности целесообразно подключать к вторичным сборкам. Однако в зависимости от конкретных особенностей данной электроустановки одиночные электродвигатели большой мощности (но не более 100 кВт) иногда могут подключаться к вторичным сборкам, а средней – к основному щиту 0,4 кВ.

В ответственных электроустановках с целью обеспечения надежности всю схему делят на две независимые части (подсистемы). Каждая из подсистем состоит из своего понижающего трансформатора $T1$ ($T2$), питающегося от независимого источника, соответствующей секции главного щита 0,4 кВ и питающихся от нее вторичныхборок. Подсистемы взаимно резервируются на разных ступенях напряжения с помощью устройств автоматического включения резерва (АВР). Электродвигатели и приводимые ими ответственные механизмы одного назначения обычно дублируют и снабжают технологическим АВР ($Д1$ и $Д8$, $Д3$ и $Д6$, $Д4$ и $Д5$). Такие электродвигатели также разделяют на две независимые группы, которые подключают к разным подсистемам (к разным секциям главного щита 0,4 кВ, к *сборкам 1* и *2*, имеющим вводы от разных секций, к разным секциям *сборки 3*). Ответственные электродвигатели, не имеющие технологического резервирования, подключают либо к секциям главного щита 0,4 кВ, либо к *сборке 4*, имеющей АВР со стороны питания.

При таком построении схемы надежность работы обеспечивается тем, что в случае погашения одной из подсистем и отказа или неуспешной работы АВР между подсистемами (КЗ на шинах) напряжение в другой подсистеме сохраняется и нарушения технологического процесса не произой-

дет, так как сработает АВР электродвигателей и других ответственных электроприемников (в современных схемах АВР секций запрещается при КЗ на одной из них).

Для особо ответственных электроприемников (от которых зависит безаварийный останов производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров, повреждений дорогостоящего оборудования) предусматривают третий, аварийный источник питания, например аварийный дизель-генератор ДГ. Один из вариантов его подключения – развилкой на обе секции 0,4 кВ, в этом случае он резервирует каждую из подсистем независимо от состояния другой подсистемы. Однако расчеты надежности электроснабжения показали нецелесообразность этого варианта, поскольку вероятность потери питания от основных источников на порядок больше вероятности повреждения секции. Кроме того, осуществление этого варианта связано с неоправданным усложнением первичной и вторичной коммутации. Поэтому в настоящее время аварийный дизель-генератор подключают на одну из секций, а при его недостаточной мощности – по одному на каждую секцию. Чтобы не перегрузить генератор, все электроприемники, кроме особо ответственных, отключаются при потере основных источников питания защитой минимального напряжения (с выдержкой времени), а затем устройство АВР ДГ отключает выключатели $Q1$ и $Q2$ и включает питание от генератора и секционный выключатель $Q3$ [3]. Подробнее об аварийном электроснабжении см. главу 13.

Магистральные схемы (рис. 1-2). Распределение энергии от трансформаторов $T1$ и $T2$ до сборок 1, 2 и электродвигателей $D1$, $D2$ выполняется с помощью шинопроводов магистральных (ШМ) и распределительных (ШР), к которым подсоединяют электроприемники.

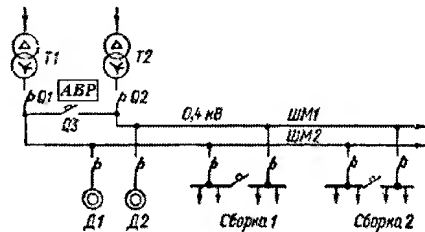


Рис. 1-2. Магистральная схема

Смешанные схемы. Представляют собой комбинации из радиальных и магистральных схем. На рис. 1-3 показана одна из таких схем, применяемая для питания собственных нужд тепловых электростанций. К главным секциям щитов 0,4 кВ подключены электродвигатели большой мощности $D1$, $D2$, $D3$, к сборкам 1, 2, 3 – двигатели средней мощности $D4$ – $D9$. Сборки

4, 5, 6, подключенные по магистральной схеме и имеющие АВР на вводах, предназначены для питания электродвигателей малой мощности (в основном задвижек). На вводах в сборки 4 и 6 установлены реакторы для снижения токов КЗ и обеспечения стойкости автоматических выключателей АП-50 отходящих линий. Для резервного питания используется специальный резервный трансформатор $TCHp$, от которого проложен шинопровод, имеющий ввод на каждый из главных щитов 0,4 кВ.

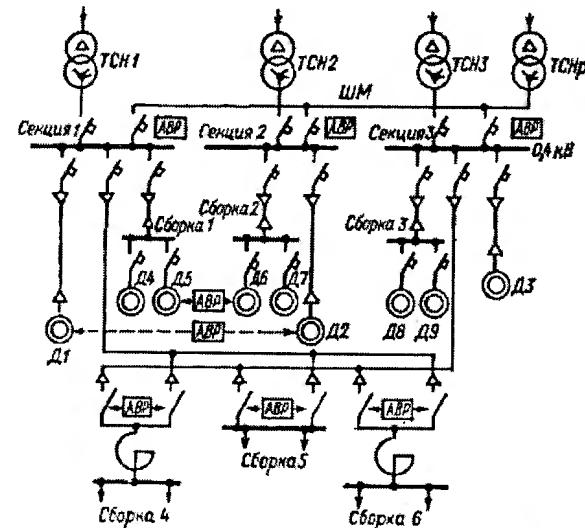


Рис. 1-3. Смешанная схема:

TCH – рабочий трансформатор; $TCHp$ – резервный трансформатор

Построение схемы сети 0,4 кВ в большой степени определяется значениями токов коротких замыканий (КЗ) для выбора аппаратуры и защит, а также ограниченными возможностями применяемых защитных аппаратов (автоматических выключателей и плавких предохранителей).

Для этих сетей характерно весьма значительное (в десятки раз больше, чем в сетях напряжением выше 1000 В) влияние сопротивлений элементов питающей схемы на значения токов КЗ, быстрое снижение значений токов КЗ по мере удаления места повреждения от шин главного щита 0,4 кВ. Например, если при расчетах токов КЗ в сетях 6(10) кВ сопротивление кабеля с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 150 \text{ мм}^2$ длиной 200 м можно не учитывать, то в сети 0,4 кВ такой же кабель, подключенный к шинам главного щита за трансформатором мощностью 1600 кВ·А, снижает значение тока трехфазного металлического КЗ в 8,7 раза по сравнению с аналогичным значением тока КЗ до кабеля.

В сетях 0,4 кВ, в отличие от сетей напряжением выше 1000 В, применяются в основном только встроенные в автоматические выключатели весьма неточные максимальные токовые защиты или предохранители. Поэтому требования защиты сети накладывают определенные ограничения на типы и характеристики применяемых защитных аппаратов, длины и сечения кабелей и, следовательно, на построение схемы сети.

Например, при питании от главного щита 0,4 кВ кабельными линиями (магистральями) последовательно нескольких сборок с двигателями большой и средней мощности обычно не удается обеспечить необходимую чувствительность защиты этих линий из-за необходимости ее отстройки от токов пуска или самозапуска электродвигателей. Поэтому такая магистральная схема питания применяется только для электродвигателей малой мощности (сборки 4, 5, 6 на рис. 1-3). Для питания электродвигателей средней мощности используются сборки, имеющие один или два самостоятельных ввода от щита 0,4 кВ (сборки 1, 2, 3, 4 на рис. 1-1). Однако и для одиночных сильно нагруженных сборок с большим количеством электродвигателей средней мощности также часто не удается обеспечить достаточную чувствительность защит питающих линий. В этих случаях вместо одной такой сборки устанавливают несколько с самостоятельными линиями питания, или питание части двигателей осуществляют непосредственно от щита главного 0,4 кВ.

Выбор кабелей также может определяться не только нагрузкой, но и условиями защиты, например в сетях, требующих защиты от перегрузки, или при необходимости обеспечения достаточной чувствительности защиты, когда считается целесообразным увеличить токи КЗ путем увеличения выбранного по нагрузке сечения кабеля (но не более чем на одну – две ступени).

Условие селективности действия защит обуславливает необходимость сокращения количества последовательно включенных аппаратов защиты в сети 0,4 кВ. Обычно селективными удается выполнить лишь одну – две ступени защиты на участках от главного щита 0,4 кВ до электроприемников, включая защитный аппарат отходящей от этого щита линии.

Из изложенного следует, что для сетей 0,4 кВ характерно единство процесса построения схемы сети, выбора кабелей, коммутационных аппаратов и защит.

2. РАСЧЕТЫ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТЯХ 0,4 кВ

2.1. Цель и особенности расчетов

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

Особенности расчета токов КЗ в сетях 0,4 кВ: необходимо учитывать активные и индуктивные сопротивления всех элементов цепи КЗ; при питании от энергосистемы не учитывается затухание периодической составляющей тока КЗ из-за большой электрической удаленности генераторов; при питании от маломощных местных электростанций или автономных генераторов напряжением выше 1000 В затухание периодической составляющей тока КЗ не учитывается, если мощность генератора превышает мощность понижающего трансформатора в пять и более раз; при питании от автономных или аварийных генераторов напряжением 0,4 кВ затухание учитывается независимо от мощности генератора.

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

Подавляющее большинство КЗ в сетях 0,4 кВ происходит через электрическую дугу в месте повреждения, сопротивление которой существенно снижает значения токов КЗ. По данным исследований в 85% случаев КЗ возникают вследствие дугового перекрытия по изоляции [4, 5]. В 13% случаев КЗ возникают вследствие металлического контакта, однако электродинамические силы, пропорциональные квадрату тока КЗ, отбрасывают незакрепленные металлические перемычки, разрывают закоротки небольшого сечения и КЗ переходит в дуговое. При больших токах электродинамические силы достигают нескольких тонн и так быстро разрывают металлический контакт в месте КЗ, что ток КЗ не достигает максимального значения, а сразу же ограничивается сопротивлением электрической дуги (как в токоограничивающих выключателях). Лишь в 2% случаев КЗ остается металлическим, при условии надежно закрепленной металлической закоротки большого сечения.

Опыт эксплуатации, данные экспериментов и практика расчетов указывают на весьма существенное токоограничивающее действие электрической дуги в месте КЗ, особенно при близких КЗ в сетях, питающихся от трансформаторов большой мощности. Последнее объясняется тем, что

введение сопротивления дуги в цепь КЗ тем больше ограничивает ток, чем меньше относительные значения сопротивлений питающих элементов цепи (то есть, чем больше мощность источника питания).

Необходимость учитывать токоограничивающее действие электрической дуги при расчетах токов КЗ для выбора аппаратуры была особенно острой, когда не было коммутационных аппаратов, способных отключать большие токи металлического КЗ. В настоящее время такие аппараты созданы, и необходимость учета токоограничивающего действия электрической дуги при выборе аппаратуры возникает в редких случаях.

В то же время при расчетах защит и проверке их чувствительности учет токоограничивающего действия электрической дуги остается актуальным. Например, сопротивление электрической дуги может снизить ток КЗ за трансформаторами мощностью 1000 кВ·А и более в несколько раз, что, как показал опыт эксплуатации, приводило к отказу защит трансформаторов.

Эксперименты показывают, что в зависимости от условий возникновения КЗ в сети 0,4 кВ значение тока может находиться в некоторой зоне [4–9, 10, 11]. Верхней границей зоны является ток металлического КЗ, нижней – ток КЗ с учетом наибольшего возможного токоограничивающего действия электрической дуги. Наиболее вероятные значения токов КЗ концентрируются в средней части этой зоны (рис. 2-1).

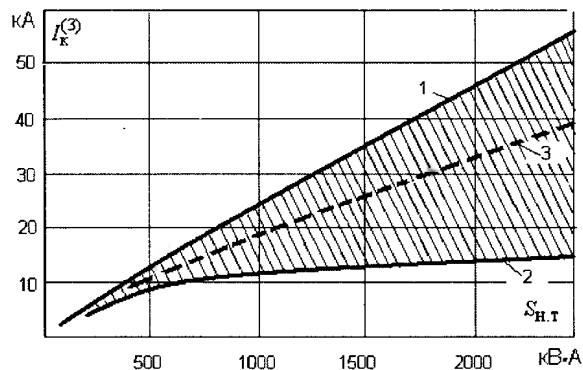


Рис. 2-1. Зона возможных токов при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ трансформатора в зависимости от его мощности $S_{н.т}$: 1 – граница максимальных токов при металлическом КЗ $I_{к, макс}^{(3)}$; 2 – граница минимальных значений токов КЗ через переходные сопротивления $I_{кР}^{(3)}$; 3 – значения наиболее вероятных токов КЗ

Исходя из этого, для выбора аппаратуры и защит необходимо определить следующие значения токов и напряжений:

$I_{к, макс}^{(3)}$ – максимальный ток трехфазного металлического КЗ при максимальном режиме работы питающей энергосистемы, используется для выбора аппаратуры и защит, проверки селективности их действия;

$I_{к, макс}^{(1)}$ – максимальный ток однофазного металлического КЗ при максимальном режиме работы питающей энергосистемы, используется для проверки селективности действия защит;

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

$I_{кР}^{(3)}, I_{кР}^{(2)}, I_{кР}^{(1)}$ – минимальные токи трехфазного, двухфазного и однофазного КЗ, вычисленные с учетом наибольшего токоограничивающего действия электрической дуги в месте повреждения, используются для проверки чувствительности защит при дуговых КЗ и селективности их действия;

$U_{к, ост}$ – остаточное напряжение при КЗ через электрическую дугу, используется для проверки чувствительности максимальных токовых защит с пуском по напряжению.

В ряде случаев, особенно при проверке чувствительности защит трансформаторов 6(10)/0,4 кВ (см. главу 2.2), необходимо определить чувствительность защит не только при дуговых, но и при металлических КЗ. Поэтому вычисляют также значения минимального тока двухфазного металлического КЗ при минимальном режиме работы энергосистемы $I_{к, мин}^{(2)}$ и минимальный ток однофазного металлического КЗ $I_{к, мин}^{(1)}$.

Определяются также значения ударного тока КЗ и его тепловой импульс, их используют для выбора аппаратуры (автоматических выключателей, рубильников), шинпроводов и другого электрооборудования.

Для быстрой оценки возможности разворота электродвигателя вычисляют значения токов трехфазного металлического КЗ на его зажимах при минимальном режиме работы питающей системы $I_{к, мин}^{(3)}$. О возможности разворота судят по отношению этого тока к пусковому току электродвигателя (см. главу 4).

2.2. Учет токоограничивающего действия электрической дуги

Расчетный метод учета токоограничивающего действия электрической дуги в сетях 0,4 кВ должен позволять определить перечисленные в

главе 2.1 значения токов и напряжений при питании от трансформаторов и аварийных генераторов; обеспечивать приемлемую точность расчетов; быть простым и удобным для широкого использования, поскольку сети 0,4 кВ применяются повсеместно.

Практический метод учета токоограничивающего действия электрической дуги при выборе аппаратуры и защит предложен в работах [6-9].

Значения токов металлического КЗ $I_{к.макс}^{(3)}$, $I_{к.мин}^{(2)}$ в любой точке сети могут быть найдены по выражениям, вывод которых общеизвестен [12-14].

Ток трехфазного металлического КЗ (в килоамперах) определяется по выражению:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} \sqrt{x_\Sigma^2 + r_\Sigma^2}} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} z_\Sigma}, \quad (2-1)$$

где $U_{ср.н}$ – среднее номинальное линейное напряжение сети НН, В (для сети 0,4 кВ равно 400 В); r_Σ и x_Σ – результирующее активное и индуктивное сопротивление (прямой последовательности) цепи КЗ, мОм; z_Σ – результирующее полное сопротивление цепи КЗ, мОм.

При определении $I_{к.макс}^{(3)}$ значения x_Σ и r_Σ входят сопротивления питающей энергосистемы в максимальном режиме, а при определении $I_{к.мин}^{(3)}$ – в минимальном.

Минимальный ток металлического двухфазного КЗ:

$$I_{к.мин}^{(2)} = 0,867 I_{к.мин}^{(3)} \quad (2-2)$$

Токоограничивающее действие электрической дуги при трехфазных КЗ может быть учтено введением в каждую фазу переходного сопротивления $R_{п}$. Такая же интерпретация принята в работе [15]. Схемы замещения при трехфазном КЗ, а также при других видах КЗ для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей с учетом переходных сопротивлений приведены на рис. 2-2.

Минимальный ток трехфазного КЗ с учетом наибольшего токоограничивающего действия дуги в месте повреждения $I_{кR}^{(3)}$ определяется по выражению:

$$I_{кR}^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} \sqrt{x_\Sigma^2 + (r_\Sigma + R_{п})^2}}, \quad (2-3)$$

где x_Σ и r_Σ – индуктивное и активное результирующие сопротивления (прямой последовательности) цепи КЗ без учета сопротивлений рубильников, выключателей, вставных контактов, болтовых соединений, мОм; $R_{п}$ – переходные сопротивления, совокупно учитывающие сопротивление электрической дуги в месте КЗ, а также сопротивление рубильников, выключа-

телей, вставных контактов, болтовых соединений, рекомендуется принимать равным 15 мОм.

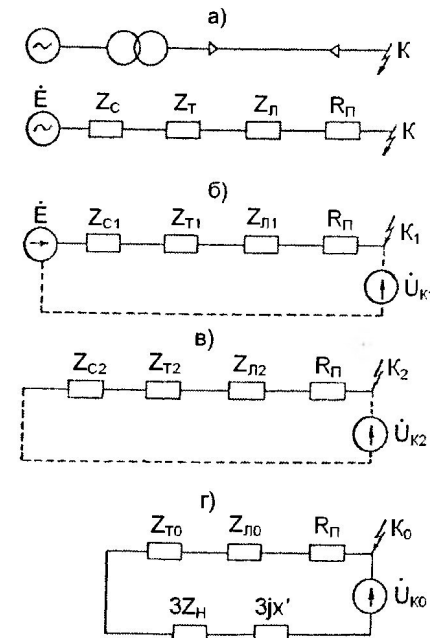


Рис. 2-2. Схемы замещения при трехфазном КЗ (а), а также при других видах КЗ для токов прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей с учетом переходных сопротивлений

Значение $R_{п} = 15$ мОм соответствует минимальному возможному току КЗ, полученному по опытным данным на одной из установок 0,5 кВ [12, 16, 17]. Максимальное расчетное значение тока КЗ, равное 58 кА, удавалось получить только при наличии толстой медной перемычки, надежно привинченной к шинам. При КЗ, полученном с помощью привинченной медной закоротки сечением 6–25 мм², значение тока оказалось равным соответственно 60–87% максимального, при свободно лежащем медном бруссе – 56%, при стальном свободно лежащем бруссе – 68%, а при перекрытиях по изоляции – 32–56%. Таким образом, минимальное значение тока КЗ было равно $0,32 \times 58 = 18,6$ кА. Из первого опыта металлического КЗ со значением тока 58 кА легко найти сопротивление цепи, которое приблизительно можно считать индуктивным: $x = 500 / (\sqrt{3} \cdot 58) = 5$ мОм. Из опыта КЗ через наибольшее переходное сопротивление можно найти значение этого сопротивления $R_{п}$. Поскольку минимальное значение тока КЗ равно $I_{кR}^{(3)} = U / (\sqrt{3} \cdot \sqrt{x^2 + R_{п}^2}) = 500 / (\sqrt{3} \cdot \sqrt{5^2 + R_{п}^2}) = 18,6$ кА, то $R_{п} = 15$ мОм. Это значение $R_{п}$ рекомендуется вводить в расчетную цепь также инструкцией СН-357-77 [18].

Значение переходных сопротивлений $R_{\Pi} = 15$ мОм можно принимать одинаковым для любой точки сети, независимо от ее удаленности. Допустимость этого основана на том, что определяющим в величине R_{Π} является сопротивление дуги, а по мере удаления точки КЗ от трансформатора существенно увеличиваются сопротивления остальных элементов цепи КЗ, поэтому влияние переходных сопротивлений на ток КЗ быстро уменьшается и их точный учет уже не имеет практического значения.

В соответствии со схемой замещения рис. 2-2 ток двухфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги находится по выражению:

$$I_{\text{KR}}^{(2)} = 0,867 I_{\text{KR}}^{(3)} \quad (2-4)$$

Отметим, что значения минимальных токов КЗ с учетом наибольшего токоограничивающего действия дуги в месте повреждения $I_{\text{KR}}^{(3)}$ и $I_{\text{KR}}^{(2)}$ обычно почти не зависят от режима работы питающей системы.

Наиболее вероятное (среднее) значение тока трехфазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения для любого расчетного случая (любой мощности питающей системы, трансформатора, удаленности точки КЗ) определяется по выражению:

$$I_{\text{к.ср}}^{(3)} = k_{\text{н}} \frac{I_{\text{к.макс}}^{(3)} + I_{\text{KR}}^{(3)}}{2}, \quad (2-5)$$

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

Выражение (2-5) косвенно учитывает меняющуюся в зависимости от тока сопротивление электрической дуги, что соответствует физическим процессам, происходящим при КЗ через дугу. Например, значения наиболее вероятного тока $I_{\text{к.ср}}^{(3)}$ за трансформаторами мощностью 1000 и 1600 кВ·А ($x_{\text{с}} = 0,1 x_{\text{т}}$), равным 18 и 25,9 кА, соответствуют $R_{\Pi} = 6,8$ мОм и $R_{\Pi} = 5,55$ мОм.

Значения токов, получаемые по выражению (2-5), практически совпадают с результатами экспериментальных исследований наиболее вероятных токов КЗ в электроустановках 0,4 кВ.

Например, рассмотрим зависимость расчетных и экспериментальных значений токов КЗ от мощности (сопротивления) трансформаторов. Принимаем, что трансформатор питается от мощной энергосистемы с сопротивлением, равным 0,1 сопротивления трансформатора $x_{\text{с}} = 0,1 x_{\text{т}}$. Для этого случая по выражениям (2-1) и (2-3) рассчитана зона возможных токов КЗ от $I_{\text{к.макс}}^{(3)}$ до $I_{\text{к.оп}}^{(3)}$, расчетные значения наиболее вероятных токов КЗ $I_{\text{к.ср}}^{(3)}$ по выражению (2-5) и опытные значения $I_{\text{к.оп}}^{(3)}$ по экспериментальному методу [4, 5], а также расхождение между этими методами ΔI % (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Значения токов при трехфазном КЗ на стороне 0,4 кВ трансформаторов в зависимости от их мощности

Обозначение величины	Численное значение при мощности трансформатора, кВ·А						
	160	250	400	630	1000	1600	2500
$I_{\text{к.макс}}^{(3)}$, кА	4,74	7,37	11,8	15	24	38,2	54,7
$I_{\text{KR}}^{(3)}$, кА	4,15	6,0	8,2	9,8	12	13,5	14,3
$I_{\text{к.ср}}^{(3)}$, кА	4,45	6,69	10	12,4	18	25,9	38
$I_{\text{к.оп}}^{(3)}$, кА	4,27	6,63	9,44	12	16,8	26,7	38,3
ΔI , %	+4,2	+0,9	+5,9	+3,3	+7,1	-3,0	-0,8

Из этой таблицы видно, что значения наиболее вероятных токов по обоим методам практически одинаковы, небольшая положительная погрешность идет в запас расчетов.

Рассмотрим зависимость расчетных и экспериментальных значений токов КЗ от удаленности точки КЗ в сети 0,4 кВ. В табл. 2.2 приведены соответствующие значения токов при КЗ за кабелями с алюминиевыми жилами в зависимости от их длины при питании от трансформатора мощностью 1000 кВ·А ($x_{\text{с}}/x_{\text{т}} = 0,1 x_{\text{т}}$).

Таблица 2.2

Значения токов при трехфазном КЗ за кабелями с алюминиевыми жилами в зависимости от их длины при питании от трансформатора мощностью 1000 кВ·А

Обозначение величины	Численное значение при длине кабеля, м						
	0	50	100	150	200	250	300
Кабель 3 x 150 с алюминиевыми жилами							
$I_{\text{к.макс}}^{(3)}$, кА	24	12,2	7,4	5,2	4,1	3,3	2,8
$I_{\text{KR}}^{(3)}$, кА	12	7,1	5	4	3,3	2,8	2,4
$I_{\text{к.ср}}^{(3)}$, кА	18	9,65	6,2	4,6	3,7	3,05	2,6
$I_{\text{к.оп}}^{(3)}$, кА	16,8	9,76	6,66	4,68	3,69	2,97	2,52
ΔI , %	+7,1	-1,1	-6,9	-1,7	+0,3	+2,69	+3,2
Кабель 3 x 50 с алюминиевыми жилами							
$I_{\text{к.макс}}^{(3)}$, кА	24	5,4	2,9	2	1,5	1,2	1
$I_{\text{KR}}^{(3)}$, кА	12	4	2,4	1,7	1,35	1,1	0,92
$I_{\text{к.ср}}^{(3)}$, кА	18	4,7	2,65	1,85	1,425	1,15	0,96
$I_{\text{к.оп}}^{(3)}$, кА	16,8	4,86	2,61	1,8	1,35	1,08	0,9
ΔI , %	+7,1	-3,3	+1,5	+2,77	+5,5	+6,48	+6,6

Из табл. 2.2 видно, что значения наиболее вероятных токов КЗ по обоим методам практически одинаковы, небольшая положительная погрешность идет в запас расчетов.

Рассмотрим зависимость расчетных и экспериментальных значений токов КЗ за трансформаторами от мощности (сопротивления) питающей энергосистемы. Для этого сопротивление системы x_c до вводов 6 или 10 кВ понижающего трансформатора представим в виде x_c/x_T . Результаты расчетов соответствующих значений токов КЗ в зависимости от x_c/x_T представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения токов при трехфазном КЗ за трансформаторами разной мощности в зависимости от сопротивления питающей энергосистемы

Обозначение величины	Численное значение при x_c/x_T					
	0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Трансформатор 1600 кВ·А						
$I_{к.макс}^{(3)}$, кА	38,2	30,5	23,7	19,5	16,2	14,2
$I_{кР}^{(3)}$, кА	13,5	13	12,2	11,6	11	10,2
$I_{к.ср}^{(3)}$, кА	25,85	21,75	17,95	15,6	13,6	12,2
$I_{к.оп}^{(3)}$, кА	26,74	21,35	16,6	15,6	12,96	11,36
ΔI , %	-3,3	+1,8	+8,1	0	+4,9	+7,4
Трансформатор 630 кВ·А						
$I_{к.макс}^{(3)}$, кА	15	11,9	9,3	7,8	6,5	5,7
$I_{кР}^{(3)}$, кА	9,8	8,8	7,5	6,5	5,7	5,2
$I_{к.ср}^{(3)}$, кА	12,4	10,35	8,4	7,15	6,1	5,45
$I_{к.оп}^{(3)}$, кА	12	10,7	8,37	7,02	5,85	5,13
ΔI , %	+3,3	-3,3	+0,4	+1,9	+4,3	+6,2

Из табл. 2.3 видно, что значения наиболее вероятных токов КЗ по обоим методам также практически одинаковы, небольшая положительная погрешность идет в запас расчетов.

Таким образом, рассмотренный метод учета токоограничивающего действия электрической дуги пригоден для любых расчетных случаев, любой мощности трансформатора и питающей сети, при этом значения токов получаются практически такими же, как в экспериментах [4, 5, 16, 10].

Как указывалось выше, реальные возможные значения токов трехфазных КЗ находятся в зоне, верхней границей которой является ток металлического КЗ $I_{к.макс}^{(3)}$, определяемый по формуле (2-1), нижней — $I_{кР}^{(3)}$, вычис-

ленный с учетом наибольшего токоограничивающего действия дуги по формуле (2-3).

Влияние токоограничивающего действия дуги на зону возможных токов КЗ зависит от мощности трансформатора, мощности питающей энергосистемы и удаленности точки КЗ от шин 0,4 кВ.

Влияние мощности трансформатора на величину зоны возможных токов КЗ за трансформатором (на шинах 0,4 кВ) для случая, когда трансформатор питается от мощной энергосистемы ($x_c=0,1 x_T$), показано на рис. 2-1. Из этого рисунка видно, что влияние токоограничивающего действия дуги очень велико, особенно для мощных трансформаторов. Чем меньше мощность трансформатора (т.е. чем больше результирующее сопротивление до точки КЗ), тем меньше зона возможных токов КЗ.

По мере удаления точки КЗ от шин 0,4 кВ зона возможных токов также сужается (рис. 2-3).

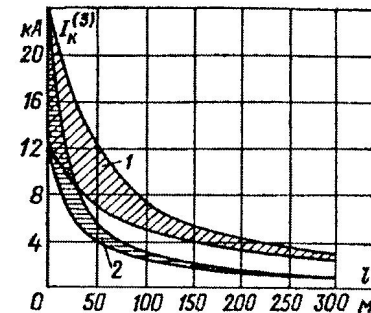


Рис. 2-3. Зоны возможных токов при трехфазном КЗ за кабелями с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 150 \text{ мм}^2$ (зона 1) и $3 \times 50 \text{ мм}^2$ (зона 2) в зависимости от их длины l при питании от трансформатора мощностью 1000 кВ·А ($x_c = 0,1 x_T$)

Аналогично влияет на зону возможных токов КЗ и сопротивление питающей энергосистемы. Зона возможных токов КЗ за трансформаторами в зависимости от x_c/x_T видна из рис. П1-1, а, б, в, из которых видно, что чем больше результирующее сопротивление до точки КЗ, тем меньше зона возможных токов КЗ.

Таким образом, в зависимости от конкретных расчетных условий значения токов $I_{к.макс}^{(3)}$ и $I_{кР}^{(3)}$ могут весьма существенно отличаться друг от друга и это необходимо учитывать при выборе аппаратуры и проверке чувствительности защиты.

Для выбора аппаратуры следует использовать значения тока металлического КЗ. Допустимо выбирать аппаратуру линий, отходящих от шин главного щита 0,4 кВ, по значению среднего (наиболее вероятного) тока КЗ, если невозможно выбрать аппаратуру, стойкую при металлических КЗ (редкий случай). Однако вводные и секционный выключатели этого щита,

как наиболее ответственные, следует выбирать по металлическим КЗ, поскольку при отказе выключателя отходящей линии они должны локализовать КЗ в пределах одной из подсистем электрической схемы.

В то же время при проверке чувствительности защит трансформаторов 6/0,4 и 10/0,4 кВ, а также автоматических выключателей и предохранителей 0,4 кВ, во избежание отказов защиты следует учитывать минимальные токи КЗ $I_{кR}$, рассчитанные с учетом токоограничивающего действия дуги.

По «Правилам устройства электроустановок» чувствительность максимальной токовой защиты трансформатора проверяется к току металлического КЗ за трансформатором в минимальном режиме, причем минимальный коэффициент чувствительности защиты (отношение минимального тока КЗ, протекающего через реле защиты к току его срабатывания) должен быть порядка 1,5.

Однако для трансформаторов средней и большой мощности и при малом сопротивлении питающей системы проверка чувствительности защиты к токам металлического КЗ недостаточно учитывает снижение токов КЗ из-за переходных сопротивлений, что может вызвать отказ защиты. Например, за трансформатором 1600 кВ·А ток металлического КЗ (при $x_c/x_T = 0,1$) составит $I_k^{(3)} = 38$ кА, а ток КЗ через переходные сопротивления $R_{п} = 15$ мОм составит всего $I_{кR}^{(3)} = 13,5$ кА, то есть в 2,8 раза меньше, чем при металлическом КЗ. В связи с этим необходимо в дополнение к проверке чувствительности при металлическом КЗ производить такую же проверку при КЗ через переходные сопротивления, при этом коэффициент чувствительности защиты должен быть не менее 1,2 [19].

Расчеты показывают, что для трансформаторов малой мощности или при относительно большом сопротивлении питающей системы, когда влияние $R_{п}$ на токи КЗ со стороны 0,4 кВ незначительно, определяющим при проверке чувствительности защиты является ток металлического КЗ, при малом сопротивлении питающей системы и большой мощности трансформаторов определяющим является ток КЗ через переходные сопротивления.

Если чувствительность максимальной токовой защиты трансформатора оказывается недостаточной к токам КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги, то следует уменьшить ток срабатывания защиты, а для обеспечения ее несрабатывания при токах самозапуска электродвигателей уменьшить количество двигателей, участвующих в самозапуске, либо применить их поочередный автоматический самозапуск, либо выполнить защиту с применением блока БМРЗ-0,4, в котором имеется специальная функция блокировки МТЗ при пуске и самозапуске электродвигателей (глава 15). Возможна также замена электромеханической защиты трансформатора на цифровую, при этом расчетный ток срабатывания защиты

трансформатора уменьшится за счет меньшего по сравнению с электромеханической защитой коэффициента надежности и большего коэффициента возврата защиты.

При дуговом КЗ остаточное напряжение в месте КЗ может быть очень высоким. Это накладывает ограничения на применение МТЗ с пусковым органом напряжения из-за его низкой чувствительности (см. главу 11, пример 11-1). Расчеты показывают, что применение пускового органа напряжения для трансформаторов мощностью 630 кВ·А и более при малом сопротивлении питающей энергосистемы невозможно, однако может быть оправдано при большом сопротивлении питающей энергосистемы, а также при небольшой мощности трансформаторов или для защиты генераторов напряжением 0,4 кВ.

Проверка чувствительности отсечек автоматов, а также предохранителей при междуфазных или однофазных КЗ, очевидно, должна производиться при токах КЗ, вычисленных с учетом переходных сопротивлений.

При проверке селективности защит в сети 0,4 кВ также в некоторых случаях целесообразно учитывать влияние переходных сопротивлений, особенно для потребителей II и III категорий, и обеспечивать селективное действие защит не во всем диапазоне возможных значений токов КЗ вплоть до тока металлического КЗ $I_{к,макс}^{(3)}$, а только в диапазоне до наиболее вероятных токов $I_{к,ср}^{(3)}$, не учитывая редкие случаи неселективного действия защит при металлических КЗ. Например, если проверку селективности между защищаемыми понижающий трансформатор предохранителями ПК-6 и ПК-10 и автоматами 0,4 кВ производить при максимальном токе $I_{к,макс}^{(3)}$, то может потребоваться завышение номинальных токов вставок ПК, что не рекомендуется директивными материалами [20], или замена предохранителей выключателями, в то время как при токах $I_{к,ср}^{(3)}$, которые могут быть значительно меньше $I_{к,макс}^{(3)}$, селективность будет обеспечена.

Влияние токоограничивающего действия дуги в месте КЗ можно не учитывать в следующих случаях: при выборе аппаратуры – если мощность трансформатора менее 400 кВ·А; при проверке чувствительности защит – если мощность трансформатора менее 250 кВ·А. При мощности понижающих трансформаторов, равной или большей указанной, влиянием токоограничивающего действия дуги в месте КЗ можно пренебречь при достаточно большом сопротивлении питающей энергосистемы, при выборе аппаратуры, если отношение x_c/x_T находится в области А или Б, а при проверке чувствительности защит – если это отношение находится в области А, рис. 2-4. Например, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А влиянием токоограничивающего действия дуги можно пренебречь при выборе аппаратуры, если $x_c/x_T \geq 1,2$, при оценке чувствительности защит – если $x_c/x_T \geq 2,5$.

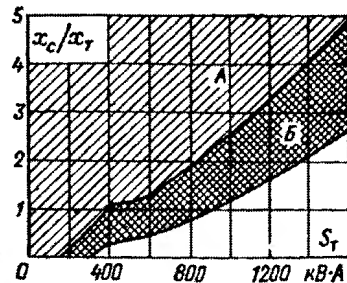


Рис. 2-4. Области, в которых можно не учитывать токоограничивающее действие электрической дуги

При выборе аппаратуры можно не считаться с токоограничивающим действием дуги, если разница между током металлического КЗ $I_{к.макс}^{(3)}$ и током $I_{к.ср}^{(3)}$ не превышает 15%, т.е. если $(I_{к.макс}^{(3)} - I_{к.ср}^{(3)}) / I_{к.ср}^{(3)} \leq 0,15$. Подставляя в это уравнение значение $I_{к.ср}^{(3)}$ из выражения (2-5), получаем условие $I_{к.макс}^{(3)} \leq 1,35 I_{к.р}^{(3)}$, при выполнении которого, выбирая аппаратуру, можно не учитывать токоограничивающее действие дуги.

Аналогично при оценке чувствительности защит можно не учитывать токоограничивающее действие дуги, если $(I_{к.макс}^{(3)} - I_{к.р}^{(3)}) / I_{к.р}^{(3)} \leq 0,15$, или если $I_{к.макс}^{(3)} \leq 1,15 I_{к.р}^{(3)}$.

Выражая токи $I_{к.макс}^{(3)}$ и $I_{к.р}^{(3)}$ в полученных неравенствах через активное и индуктивное сопротивления трансформатора и индуктивное сопротивление энергосистемы, получаем уравнение, характеризующее отношение x_c/x_T , при котором также можно не считаться с токоограничивающим действием дуги при выборе аппаратуры и проверке чувствительности защиты:

$$\frac{x_c}{x_T} \geq \frac{\sqrt{(r_T + R_n)^2 - K_1 I_T^2}}{K_2 x_T} - 1,$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты, которые при выборе аппаратуры равны 1,82 и 0,82 соответственно; при оценке чувствительности защит 1,32 и 0,32 соответственно. Кривые на рис.2-4 соответствуют этому уравнению.

Другие методы учета токоограничивающего действия электрической дуги.

Рассматриваемые далее способы учета токоограничивающего влияния электрической дуги не решают главной задачи, которая заключается в том, чтобы создать простую и удобную для широкого использования модель КЗ, позволяющую получить приемлемые результаты и для выбора аппаратуры, и для выбора защит.

Методы введения в цепь КЗ активного сопротивления. В работе [18] предлагается учитывать сопротивление электрической дуги и контактов до точки КЗ (переходные сопротивления) совокупно, введением в расчетную цепь активного сопротивления R_n , значения которого зависят от места КЗ, а выбор аппаратуры производить по токам КЗ, рассчитанным с учетом этого сопротивления. Для КЗ на главных шинах 0,4 кВ (за трансформаторами 6(10)/0,4 кВ) рекомендовано значение $R_n = 15$ мОм. Выше показано, что это значение соответствует минимальному возможному току дугового КЗ. Поэтому

учет этого сопротивления часто настолько значительно снижает расчетные значения этих токов (особенно за трансформаторами мощностью 1000–2500 кВ·А – в два – четыре раза соответственно), что можно опасаться за стойкость выбираемой по ним аппаратуры. Таким образом, данный метод не позволяет определить реальные значения токов КЗ для выбора аппаратуры. В то же время встроенные защиты выбранных по этим токам автоматических выключателей обладают хорошей чувствительностью к минимальным токам КЗ через переходные сопротивления.

В связи с тем, что выбирать аппаратуру по минимальным токам КЗ опасно, ведущие проектные организации не придерживались рекомендаций работы [18]. Например, в Атомэнергопроект выбор аппаратуры производят по токам металлического КЗ, вычисленным без учета сопротивления дуги в месте КЗ, а переходные сопротивления контактов учитывают значением 1 мОм. Чувствительность защит автоматических выключателей и трансформаторов 6(10)/0,4 кВ оценивалась по металлическому КЗ. Поэтому выбранная аппаратура оказывалась стойкой при металлических КЗ, но защита – недостаточно чувствительной при КЗ через переходные сопротивления. Поэтому директивным указанием [19] было предписано проверять чувствительность защит при дуговых КЗ с учетом $R_n = 15$ мОм.

В работах [21, 22] сделана попытка учета переходных сопротивлений аналогично [18], однако используются иные значения сопротивлений R_n . Результаты вычислений токов КЗ с учетом этих значений R_n существенно меньше экспериментальных значений токов КЗ, приведенных в работах [4, 5, 16, 10]. Кроме того, при такой модели не делается различия между значениями токов, применяемых для выбора аппаратуры, и значениями токов, применяемых для проверки чувствительности защит, что, как показано в работах [5–9, 19], недопустимо.

Метод дугового напряжения. Влияние дуги учитывается введением в расчетную цепь КЗ противо-ЭДС, соответствующей падению напряжения на дуге. Значение падения напряжения в работах [23, 24] принимается 60–80 В, что соответствует снижению тока КЗ до 75–85% от максимального металлического КЗ. Практически это равнозначно введению в цепь КЗ активного сопротивления, поскольку сопротивление дуги, по исследованиям в работе [25]:

$$R_d = E_d I_d / I_k,$$

где E_d – напряженность электрического поля, В/мм; I_d – длина дуги, мм (равна удвоенному расстоянию между электродами); I_k – значение тока КЗ.

Для дуг, горящих в свободном пространстве, $E_d = 1,5$ В/мм [25]. Длина же дуги является труднопредсказуемой величиной, которая с учетом разнообразия конструкций электротехнических устройств и причин возникновения КЗ, практически не поддается унификации. Для дуг, горящих в стесненных условиях, удельное падение напряжения на дуге существенно повышается из-за повышения давления [5]. Это вносит существенную ошибку в расчеты токов КЗ. Поэтому решением комитета № 73 МЭК отклонена концепция "постоянного дугового сопротивления", которая, как и концепция постоянного значения дугового напряжения, не учитывает истинных условий КЗ. Кроме того, этот метод также не делает различия между значениями токов, применяемых для выбора аппаратуры и применяемых для выбора защит.

Метод снижающих коэффициентов. Заключается во введении некоторых снижающих коэффициентов, с помощью которых уменьшается расчетное значение тока металлического КЗ. В работе [26] приведены значения коэффициентов для трехфазного (0,89), двухфазного (0,74) и однофазного (0,38) КЗ. В работе [10] приведены рекомендуемые значения снижающего коэффициента в зависимости от тока металлического КЗ. В работах [4, 5] опытные значения токов КЗ были разбиты на три диапазона, соот-

ветствующих значениям ударных токов металлического КЗ до 20, от 20 до 40 и более 40 кА. Для каждого из них найдены кривые распределения плотности вероятностей снижающего коэффициента и интегральные кривые функций распределения снижающего коэффициента. Из этих кривых видно, что наиболее часто значения снижающего коэффициента лежат в пределах 0,6–0,9. Исходя из вероятности 0,95, приняты следующие значения снижающего коэффициента: для ударных токов в диапазоне 0–20 кА равное 0,9; 20–40 кА равное 0,8 и свыше 40 кА равное 0,7 (для действующего значения токов эти диапазоны примерно соответствуют до 10 кА, 10–20 кА и более 20 кА). Эти значения снижающего коэффициента рекомендовано учитывать при выборе аппаратуры, уменьшая соответственно расчетное значение тока металлического КЗ. Из этих же кривых видно, что минимальные значения снижающего коэффициента находятся в пределах 0,2–0,3. Поскольку, по опытным данным, КЗ, которым соответствует снижающий коэффициент 0,2, самоликвидируются, сделан вывод, что для расчета защит следует вводить снижающий коэффициент 0,3. Отметим, что в работах [4, 5] впервые указано, что для выбора аппаратуры и проверки чувствительности защит необходимо использовать разные значения токов дугового КЗ, причем эти значения существенно отличаются друг от друга.

Однако вызывает сомнения рекомендация применять одинаковый коэффициент 0,3 при проверке чувствительности защит во всех случаях, независимо от вида КЗ, мощности питающей сети, трансформатора и схемы соединения его обмоток. Действительно, в тех же опытах обнаружено, что при малых токах КЗ вероятность перехода КЗ в дуговое незначительна. Наблюдается процесс сваривания жил пробитых кабелей и закорачивающих металлических предметов с токоведущими частями. Это же подтверждается исследованиями работы [15], где указано, что при КЗ в удаленных точках сети, которым соответствует коэффициент мощности около единицы (из-за подавляющего влияния активных сопротивлений сети), дуговое КЗ маловероятно, так как дуга горит неустойчиво. Однако при больших токах КЗ оно сразу же переходит в дуговое со значительным снижением тока. Очевидно, что чем меньше ток металлического КЗ, тем меньше влияние дуги. Это видно даже из самих снижающих коэффициентов – 0,7; 0,8; 0,9. По этой же причине применение коэффициента 0,9 при выборе аппаратуры в случае небольших токов металлического КЗ неоправданно. Поэтому данный метод учета переходных сопротивлений пригоден лишь в частных случаях, при питании от мощной энергосистемы, большой мощности понижающих трансформаторов и близких КЗ.

В работе [11] приведены кривые зависимости рекомендуемых значений снижающего коэффициента от сопротивления цепи КЗ (они были использованы при подготовке ГОСТ 28249-93). Расчет по этим снижающим коэффициентам дает примерно тот же результат, что и при введении в расчетную цепь сопротивления $R_{\text{п}} = 15$ мОм, за исключением близких КЗ (см. далее, пример 2-1). При близких КЗ расчетные значения токов при использовании снижающих коэффициентов получаются больше, чем при введении в расчетную цепь сопротивления $R_{\text{п}} = 15$ мОм. Однако в той же работе [11] отмечается, что определение снижающего коэффициента по этим кривым дает правильный результат только в 68% случаев, для степени доверия 95% следует принимать более низкие их значения. Учитывая, что расчетные значения токов близких дуговых КЗ очень важны для оценки чувствительности защит трансформаторов и зоны резервирования этих защит, предпочтительнее пользоваться рекомендациями настоящей работы.

Кроме того, метод снижающих коэффициентов не дает возможности определить напряжение в месте КЗ.

Методы введения в цепь КЗ реального (переменного) активного сопротивления электрической дуги. В работе [15] экспериментально показано, что наиболее вероятное

значение сопротивления низковольтной дуги $R_{\text{д}}$ (Ом) в сетях напряжением от 120 до 600 В частотой 60 Гц можно определить по эмпирическому выражению:

$$R_{\text{д}} = 15,5 \sqrt{I_{\text{д}}} / I^{0,85},$$

где I – дуговой ток, А; $I_{\text{д}}$ – длина дуги в сантиметрах.

Поскольку $R_{\text{д}}$ изменяется в зависимости от тока, вычисление представляет собой процесс итерации, начиная с тока металлического КЗ. Вычисляемый дуговой ток определяется по выражению:

$$I_{\text{д}} = U_{\text{ф}} / \sqrt{x_{\Sigma}^2 + (r_{\Sigma} + R_{\text{д}})^2}$$

и быстро уменьшается с каждой вычислительной операцией, так что требуется лишь несколько операций для получения конечного устойчивого значения. Установлено также, что при коэффициенте мощности (отношении r_{Σ}/x_{Σ}), близком к единице, дуга горит неустойчиво.

Недостатком данного метода является то обстоятельство, что он позволяет найти лишь расчетное сопротивление электрической дуги, горящей в определенных условиях, и соответствующее значение тока КЗ, но не дает ответа на вопрос, какое значение тока следует принять для выбора аппаратуры, а какое для проверки чувствительности защит. Действительно, длина дуги является случайной величиной, практически непредсказуемой из-за неопределенности параметров, так как зависит от конструкции распределительного устройства, причины и места возникновения КЗ (кабель, шины распределительного устройства, клеммная коробка электродвигателя). Например, в работе [15] отмечается, что при дуговых КЗ в распределительных устройствах напряжением до 1000 В длина электрической дуги может составлять от 6,35 до 23 см, а при обгорании шин – больше 23 см.

Метод, рекомендуемый ГОСТ 28249-93 [27]. Представляет собой соединение метода введения в цепь КЗ реального (переменного) активного сопротивления электрической дуги и метода снижающих коэффициентов, поэтому он обладает недостатками, характерными для этих методов. При этом игнорируется то обстоятельство, что токи дуговых КЗ в одной и той же точке могут существенно отличаться друг от друга, образуя некоторую зону, и что нельзя принимать одно и то же значение и для выбора аппаратуры, и для проверки чувствительности защит. Таким образом, не учитывается опыт исследований, о которых указано выше. Наряду с этим рекомендации ГОСТ противоречивы и их использование дает сомнительные, а иногда и разные результаты для одних и тех же условий в зависимости от того, какие из этих рекомендаций используются для расчетов.

Например, в рекомендуемом Приложении II этого метода в примере № 1 приводится расчет токов КЗ за трансформатором мощностью 1000 кВ·А, Y/Y , $u_{\text{к}} = 5,5\%$, $x_{\Sigma} \approx 0,1x_{\Sigma}$. Вычисленный в примере максимальный ток металлического трехфазного КЗ составляет $I_{\text{к,макс}}^{(3)} = 23,3$ кА. С учетом рекомендуемого для этого случая сопротивления электрической дуги (5,6 мОм) определены токи трехфазного и двухфазного дугового КЗ, соответственно $I_{\text{кР}}^{(3)} = 18,6$ кА и $I_{\text{кР}}^{(2)} = 18,39$ кА. Результаты сомнительны. Ток двухфазного КЗ получился практически равным трехфазному, что не соответствует исследованиям [26], согласно которым ток двухфазного дугового КЗ составляет примерно 0,83 тока трехфазного дугового КЗ.

Применение результатов этого расчета для проверки чувствительности защит весьма рискованно. Например, в примере № 1 активное сопротивление дуги принято 5,6 мОм, соответственно остаточное напряжение составит при трехфазном КЗ $18,6 \cdot 5,6 \cdot \sqrt{3} = 180$ В, т.е. $0,45 U_{\text{н}}$. Коэффициент чувствительности комбинированного

пуска максимальной токовой защиты трансформатора по напряжению при уставке $0,5 \div 0,7 U_n$ составит $1,2 \cdot (0,5 \div 0,7) / 0,45 = 1,33 \div 1,86$, что больше требуемого по ПУЭ значения 1,2. Защита должна работать. На практике наблюдались случаи отказа защиты, в связи с чем Атомэнергопроект выпустил директивное указание [19], в котором предписано отказаться от применения пуска максимальных токовых защит по напряжению в сетях 0,4 кВ.

Как показано далее, для проверки чувствительности защит следовало бы принять $R_n = 15$ мОм, тогда $I_{KR}^{(3)} = 11,7$ кА, остаточное напряжение $11,7 \cdot 15 \cdot \sqrt{3} = 303$ В, или $0,75 U_n$, а чувствительность комбинированного пуска $1,2 \cdot (0,5 \div 0,7) / 0,75 = (0,8 \div 1,12)$, что меньше нормируемого значения 1,2. Защита должна отказать, что соответствует действительности.

На рис. 2-3 этой методики приведена зависимость снижающего коэффициента от сопротивления цепи КЗ, полученная по исследованиям работы [11]. Дуговой ток можно найти умножением тока металлического КЗ на этот коэффициент. Применим этот способ для рассмотренного выше примера № 1. Суммарное сопротивление цепи КЗ $\sqrt{2,24^2 + 9,64^2} = 9,9$, по кривым рис. 2-3 снижающий коэффициент равен 0,6 – 0,65; ток дугового КЗ $23,33 \cdot (0,6 \div 0,65) = 14 \div 15,1$ кА, что не соответствует расчетному 18,6 кА. Таким образом, применяя рекомендации этого метода, можно получить разные результаты для одного и того же расчетного случая (см. также пример 2-1).

Пример 2-1. Сравнить расчетные значения токов трехфазного дугового КЗ для расчетов защит, получаемые по рекомендациям ГОСТ 28249-93 и настоящей работы, для случая повреждения за кабелем сечением 3×120 мм² с алюминиевыми жилами в зависимости от его длины. Кабель подключен после трансформатора мощностью 1000 кВ·А ($u_k = 5,5\%$), сопротивление питающей энергосистемы равно 0,1 τ_r .

Р е ш е н и е. Находим сопротивления элементов схемы замещения. Сопротивление трансформатора по справочным данным $x_T = 8,6$ мОм, $r_T = 2$ мОм. Сопротивление питающей энергосистемы $x_c = 0,86$ мОм. Сопротивление кабеля $x_k = 0,057 \cdot l$; $r_k = 0,32 \cdot l$, где 0,057 и 0,32 – соответственно индуктивное и активное удельное сопротивление кабеля, приняты по справочным данным, мОм/м; l – длина кабеля, м.

Рассчитаем значения токов КЗ при длине кабеля, например 25 м, тогда $x_k = 0,057 \cdot 25 = 1,43$ мОм, $r_k = 0,32 \cdot 25 = 8$ мОм.

Ток металлического КЗ по формуле (2-1):

$$I_K^{(3)} = 400 / (\sqrt{3} \cdot \sqrt{(8,6 + 0,86 + 1,43)^2 + (2 + 8)^2}) = 15,6 \text{ кА.}$$

По рис. 23 ГОСТ находим, что снижающий коэффициент для дугового КЗ составляет 0,68–0,62, соответственно ток дугового КЗ равен $15,6 \cdot (0,68 \div 0,62) = 10,6 \div 9,7$ кА. Последнее значение соответствует установившемуся току, его и принимаем для построения кривых.

Определяем ток дугового КЗ в той же точке, используя приведенную на рис. 14 ГОСТ зависимость сопротивления дуги от сечения и длины кабеля. Для рассматриваемого случая сопротивление дуги 8 мОм:

$$I_{KR}^{(3)} = 400 / (\sqrt{3} \cdot \sqrt{(8,6 + 0,86 + 1,43)^2 + (2 + 8 + 8)^2}) = 11 \text{ кА.}$$

Определяем ток дугового КЗ в той же точке, приняв $R_n = 15$ мОм:

$$I_{KR}^{(3)} = 400 / (\sqrt{3} \cdot \sqrt{(8,6 + 0,86 + 1,43)^2 + (2 + 8 + 15)^2}) = 8,47 \text{ кА.}$$

Аналогичным образом находим токи КЗ при других длинах кабеля. Полученные разными способами расчетные значения токов КЗ представлены в графическом виде на рис. 2-5.

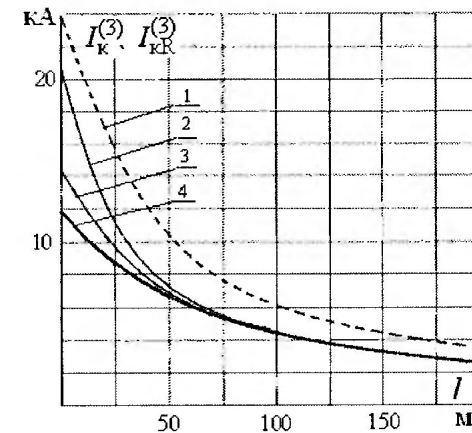


Рис. 2-5. Сравнение расчетных значений тока трехфазного КЗ в зависимости от длины кабеля сечением 3×120 с алюминиевыми жилами, подключенного за трансформатором мощностью 1000 кВ·А при $x_c = 0,1\tau_r$: 1 — металлическое КЗ, 2 — с учетом R_n , определенного по рис. 14 ГОСТ 28249-93, 3 — с учетом снижающего коэффициента, определенного по рис. 23 ГОСТ 28249-93, 4 — с учетом $R_n = 15$ мОм

Из рис. 2-5 можно сделать следующие выводы:

1. Значения токов дуговых КЗ, определяемые с помощью рекомендуемых ГОСТ способов, получаются примерно такими же, как и по формулам или расчетным кривым (рис. П1-2–П1-10) данной работы, за исключением близких КЗ (в данном случае при длине кабеля менее 50 м). При близких дуговых КЗ значения токов, определяемых способами ГОСТ, получаются больше, чем по рекомендациям данной работы. Однако для проверки чувствительности защит следует учитывать как раз минимально возможные токи КЗ, определяемые кривой 4, что отмечается в работах [4, 5] и в главе 2.2 настоящей работы;

2. Значения токов близких дуговых КЗ, определяемые с учетом рекомендованных ГОСТ зависимостей сопротивления дуги от сечения и длины кабеля, существенно больше, чем при использовании способа снижающих коэффициентов. Таким образом, применяя рекомендации ГОСТ, можно получить разные результаты для одних и тех же расчетных случаев.

3. Для удаленных КЗ (в данном случае при длине кабеля более 50 м) разница значений токов дуговых КЗ, определяемых разными методами, незначительна.

Рекомендуемые ГОСТ способы нельзя применить для расчетов КЗ от аварийных генераторов, поскольку в ряде случаев (например, при расчетах установившихся КЗ) сопротивление электрической дуги может не влиять на значения токов КЗ из-за подавляющего сопротивления генераторов.

Очевидно, что принятую в методе [27] модель дугового КЗ нельзя считать оптимальной.

2.3. Сопротивления элементов схемы замещения

Для расчетов токов КЗ составляют схему замещения, в которую входят все сопротивления цепи КЗ. Значения этих сопротивлений выражают в миллиомах (мОм). Далее рассмотрено, как определяются сопротивления отдельных элементов схемы замещения.

Питающая энергосистема. Активное и индуктивное сопротивления питающей энергосистемы до зажимов высшего напряжения ВН понижающего трансформатора находят из расчета токов КЗ на стороне ВН и приводят к стороне низшего напряжения НН по выражениям:

$$x_c = 10^3 x_{c,ВН} \left(\frac{U_{н.т.НН}}{U_{н.т.ВН}} \right)^2; \quad r_c = 10^3 r_{c,ВН} \left(\frac{U_{н.т.НН}}{U_{н.т.ВН}} \right)^2, \quad (2-6)$$

где $x_{c,ВН}$ и $r_{c,ВН}$ – соответственно индуктивное и активное сопротивления энергосистемы, приведенные к стороне ВН, Ом; x_c и r_c – то же, приведенные к стороне НН понижающего трансформатора, мОм; $U_{н.т.НН}$ и $U_{н.т.ВН}$ – соответственно номинальные напряжения обмоток НН и ВН понижающего трансформатора.

Для практических расчетов токов КЗ допустимо не учитывать активное сопротивление энергосистемы, а индуктивное принимать равным полному сопротивлению энергосистемы (это не влияет на точность расчетов токов КЗ в сети 0,4 кВ), определяя его значение (в Омах) по известному току $I_{к.ВН}^{(3)}$ (в килоамперах) или мощности $S_{к.ВН}^{(3)}$ (в мегавольт-амперах) трехфазного КЗ на зажимах ВН понижающего трансформатора 6(10)/0,4 кВ:

$$x_{c,ВН} \approx \frac{U_{c,ВН}}{\sqrt{3} I_{к.ВН}^{(3)}} = \frac{U_{c,ВН}^2}{S_{к.ВН}^{(3)}}, \quad (2-7)$$

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

Трансформаторы. Активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора (в миллиомах), приведенные к стороне НН:

$$z_T = 10^4 \frac{u_k U_{н.т.}^2}{S_{н.т.}}, \quad (2-8)$$

$$r_T = 10^6 \frac{P_k U_{н.т.}^2}{S_{н.т.}^2}, \quad (2-9)$$

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}, \quad (2-10)$$

где $S_{н.т.}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $U_{н.т.}$ – номинальное линейное напряжение обмотки НН, кВ; P_k – мощность потерь КЗ в трансформаторе, кВт; u_k – напряжение КЗ трансформатора, %.

Параметры стандартных трансформаторов 6(10)/0,4 кВ приведены в табл. 2.4. Из таблицы видно большое различие сопротивлений x_{0T} и $z_T^{(1)}/3$ трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y и Δ/Y , причем для последних характерно равенство $x_{0T} = x_{1T} = x_{2T}$ и близкие к ним значения $z_T^{(1)}/3$. Соответственно значения токов однофазного КЗ после трансформаторов Δ/Y в несколько раз больше, чем после трансформаторов Y/Y , а при близких однофазных КЗ они практически равны токам трехфазного КЗ. Поэтому для обеспечения чувствительности защит от однофазных КЗ применение трансформаторов Δ/Y предпочтительнее.

Таблица 2.4

Активные и индуктивные сопротивления трансформаторов 6(10)/0,4 кВ [28], мОм

Мощность трансформатора, кВ·А	$u_k, \%$	$x_{1T} = x_{2T}$	x_{0T}	$r_{1T} = r_{2T}$	r_{0T}	$\frac{z_T^{(1)}}{3}$
Соединение обмоток Y/Y						
100	4,5	64,7	581,8	31,5	253,9	260
160	4,5	41,7	367	16,6	150,8	162
250	4,5	27,2	234,9	9,4	96,5	104
400	4,5	17,1	148,7	5,5	55,6	65
630	5,5	13,6	96,2	3,1	30,3	43
1000	5,5	8,5	60,6	2,0	19,1	27
1000	8	12,6	72,8	2,0	19,1	33,6
1600	5,5	4,9	37,8	1,3	11,9	16,6
Соединение обмоток Δ/Y						
100	4,5	66	66	36,3	36,3	75,3
160	4,5	43	43	19,3	19,3	47
250	4,5	27	27	10,7	10,7	30
400	4,5	17	17	5,9	5,9	18,7
630	5,5	13,5	13,5	3,4	3,4	14
1000	5,5	8,6	8,6	2,0	2,0	9
1000	8	12,65	12,65	1,9	1,9	12,8
1600	5,5	5,4	5,4	1,1	1,1	5,7
2500	6	3,8	3,8	0,6	0,6	3,85

Кабели. Активное и индуктивное сопротивления кабелей определяют по выражениям:

$$x_k = x_{уд} l; \quad r_k = r_{уд} l, \quad (2-11)$$

где $x_{уд}$ и $r_{уд}$ – соответственно индуктивное и активное удельные сопротивления кабелей, принимаются по табл. 2.5, мОм/м; l – длина кабеля, м.

Таблица 2.5

Удельное сопротивление (прямой последовательности) кабелей с алюминиевыми жилами при температуре проводника 65°C, мОм/м [12]

Сечение жил, мм ²		r _{уд}	x _{уд}	
фазных	нулевой		Трехжильный кабель	Четырехжильный кабель
3×4	2,5	9,610	0,092	0,098
3×6	4	6,410	0,087	0,094
3×10	6	3,840	0,082	0,088
3×16	10	2,400	0,078	0,084
3×25	16	1,540	0,062	0,072
3×35	16	1,100	0,061	0,068
3×50	25	0,769	0,06	0,066
3×70	35	0,549	0,059	0,065
3×95	50	0,405	0,057	0,064
3×120	50	0,320	0,057	0,064
3×150	70	0,256	0,056	0,063
3×185	70	0,208	0,056	0,063
3×240	-	0,160	0,055	-

Примечание. Для кабелей с медными жилами приведенные в таблице значения активного сопротивления следует уменьшить в 1,7 раза.

Шины и шинопроводы. Сопротивление шин и шинопроводов находят аналогично. Их удельные сопротивления принимают по заводским данным или по табл. 2.6, 2.7. Сопротивление шин и шинопроводов длиной 5 м и менее можно не учитывать, так как их влияние на ток КЗ невелико.

При известных расстояниях между прямоугольными шинами индуктивное сопротивление (в миллиомах на метр) можно определить приближенно по выражению:

$$x_{уд} = 0,1445 \times \lg \frac{4a_{ср}}{h}, \quad (2-12)$$

где $a_{ср} = \sqrt[3]{a_{12}a_{13}a_{23}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазами 1, 2 и 3, мм; h – высота шины, мм.

Воздушные линии. Активное и индуктивное сопротивления линий определяются по формуле (2-11). Для линий 0,4 кВ с проводами из цветных металлов значение удельного индуктивного сопротивления приближенно принимается равным 0,3 мОм/м, активного – по табл. 2.8. Линии со стальными проводами применяют редко. Их активное и индуктивное сопротивления зависят от конструкции провода, значения тока и могут быть найдены из работ [14, 29].

Таблица 2.6

Удельные сопротивления шин при 65°C мОм/м [13]

Сечение, мм ²	r _{уд}		x _{уд} при среднем геометрическом расстоянии между фазами, мм, равно			
	медь	алюминий	100	150	200	250
25×3	0,2680	0,475	0,1790	0,2000	0,225	0,244
30×3	0,2230	0,394	0,1630	0,1890	0,206	0,235
30×4	0,1670	0,296	0,1630	0,1890	0,206	0,235
40×4	0,1250	0,222	0,1450	0,1700	0,189	0,214
40×5	0,1000	0,177	0,1450	0,1700	0,189	0,214
50×5	0,0800	0,142	0,1370	0,1565	0,180	0,200
50×6	0,0670	0,118	0,1370	0,1565	0,180	0,200
60×6	0,0558	0,099	0,1195	0,1450	0,163	0,189
60×8	0,0418	0,074	0,1195	0,1450	0,163	0,189
80×8	0,0313	0,055	0,1020	0,1260	0,145	0,170
80×10	0,0250	0,0445	0,1020	0,1260	0,145	0,170
100×10	0,0200	0,0355	0,0900	0,1127	0,133	0,157
2(60×8)	0,0209	0,0370	0,1200	0,1450	0,163	0,189
2(80×8)	0,0157	0,0277	-	0,1260	0,145	0,170
2(80×10)	0,0125	0,0222	-	0,1260	0,145	0,170
2(100×10)	0,0100	0,0178	-	-	0,133	0,157

Таблица 2.7

Удельные сопротивления шинопроводов до 1000 В, мОм/м [30]

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Размеры сечения, мм ²		Сопротивление фазы		Сопротивление петли фаза-нуль		
		Фазных шин	Нулевого провода	r _{уд}	x _{уд}	z _{п.уд}	x _{п.уд}	r _{п.уд}
ШМА73	1600	2(90×8)	2×710	0,031	0,017	0,123	0,072	0,098
ШМА68Н	2500	2(120×10)	2×640	0,027	0,023	-	-	-
ШМА68Н	4000	2(160×12)	2×640	0,013	0,02	-	-	-
ШЗМ16	1600	2(100×8)	1500	0,017	0,014	0,067	0,052	0,043
ШРА73	250	35×5	-	0,200	0,100	-	-	-
ШРА73	400	50×5	-	0,130	0,100	-	-	-
ШРА73	630	80×5	-	0,085	0,075	-	-	-
КЗШ-0,4				0,0242	0,117			

Таблица 2.8

Конструктивные и расчетные данные неизолированных медных, алюминиевых и сталеалюминиевых проводов при 20°C (ГОСТ 839-74)

Номинальное сечение, мм ²	Медные провода (М)		Алюминиевые провода (А)		Сталеалюминиевые провода (АС)	
	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, МОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, МОм/м	расчетный диаметр, мм	$r_{уд}$, МОм/м
4	2,2	4,52	-	-	-	-
6	2,7	3,03	-	-	-	-
10	3,6	1,79	-	-	-	-
16	5,1	1,13	5,1	1,8	4,5	2,695
25	6,4	0,72	6,4	1,14	5,6	1,772
35	7,5	0,515	7,5	0,83	6,9	1,146
50	9,0	0,361	9,0	0,576	8,4	0,773
70	10,7	0,267	10,7	0,412	9,6	0,593
95	12,6	0,191	12,3	0,308	11,4	0,42
120	14,0	0,154	14,0	0,246	13,5	0,314
150	15,8	0,122	15,8	0,194	15,5	0,249
185	17,6	0,099	17,5	0,157	18,8	0,159

Реактор напряжением 0,4 кВ типа РТТ-0,38-50-0,14. Номинальные параметры реактора: напряжение 380 В, ток 50 А, индуктивное сопротивление при частоте 50 Гц составляет 140 МОм, активное – для исполнения УЗ (алюминиевая обмотка) 17 МОм, для исполнения ТЗ (медная обмотка) 16 МОм. До 1982 г. реактор обозначался ТРТС-0,5-50-0,14.

Трансформаторы тока. Сопротивление трансформаторов тока ввиду почти незаметного влияния на ток КЗ для упрощения расчетов не учитывается.

Автоматические выключатели, рубильники, переходные сопротивления. Сопротивления автоматических выключателей, рубильников, а также переходные сопротивления (вставных контактов, болтовых соединений шин и др.) принимают по справочникам и каталогам. Эти сопротивления часто не учитывают, поскольку их влияние на значение тока КЗ не превышает 5% вблизи трансформатора и снижается при удалении точки КЗ. Сопротивление автоматического выключателя, отключающего КЗ, не учитывают, так как при экспериментальном определении его предельной коммутационной способности исходят из токов, которые были в цепи при отсутствии этого выключателя (ГОСТ 2933-83).

Переходные сопротивления (сопротивление электрической дуги в месте КЗ, рубильников, выключателей, вставных контактов, болтовых соединений) рекомендуется учитывать, как показано в главе 2.2.

2.4. Расчет токов междуфазного КЗ при питании от энергосистемы

Определение токов металлического КЗ. Переходное сопротивление в месте повреждения не учитывается, расчет выполняется по выражениям (2-1) и (2-2).

Определение токов КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения. Расчет рекомендуется выполнять по выражениям (2-3), (2-4) и (2-5).

Определение ударных токов КЗ. Ударный ток КЗ определяется по выражению:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{к.р}^{(3)}, \quad (2-13)$$

где k_y – ударный коэффициент; $I_{к.р}^{(3)}$ – расчетный ток трехфазного КЗ, при расчетах по металлическим КЗ, равен $I_{к.макс}^{(3)}$, при расчетах с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения равен $I_{к.ср}^{(3)}$.

При точных расчетах ударных токов металлического КЗ значение k_y определяется в зависимости от отношения результирующих сопротивлений цепи КЗ x_{Σ}/r_{Σ} :

x_{Σ}/r_{Σ}	0,5	0,8	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9
k_y	1,0	1,02	1,05	1,12	1,2	1,35	1,46	1,53	1,59	1,63	1,67	1,71

При приближенном определении ударных токов КЗ на шинах КТП за трансформаторами мощностью 400 кВ·А и более принимают [17, 18]:

для металлического КЗ – наибольшее возможное значение ударного коэффициента $k_y = 1,5$, при этом $i_y = 2,12 I_{к.макс}^{(3)}$;

для КЗ через переходные сопротивления $k_y = 1,3$, при этом $i_y = 1,83 I_{к.ср}^{(3)}$;

для КЗ на вторичных сборках, где имеется большое влияние кабелей, $k_y = 1,1$; $i_y = 1,55 I_{к.ср}^{(3)}$.

Учет подпитки места КЗ электродвигателями напряжением до 1000 В. Согласно ПУЭ [1] влияние асинхронных двигателей на ток КЗ не учитывается, если ток от них поступает к месту КЗ через те элементы, через которые протекает основной ток КЗ от сети и которые имеют существенное сопротивление. Для сети 0,4 кВ такими элементами являются кабели и переходные сопротивления в месте КЗ. Поэтому подпитку от электродвигателей следует учитывать только при выборе аппаратуры на основном щите КТП и не следует учитывать при выборе аппаратуры на сборках 0,4 кВ.

При проектировании часто неизвестен состав нагрузки и ее приходится рассматривать как обобщенную нагрузку трансформатора, состоящую из электродвигателей и других электроприемников [12]. В этом случае периодическую составляющую тока подпитки места КЗ от электродвигателей можно приближенно определить по выражению (2-14), приняв в нем $E_s^* = 0,8$ и $x_s^* = 0,35$:

$$I_{дв}^* = \frac{E_s^*}{x_s^*} I_{н.т} = 2,29 I_{н.т} \quad (2-14)$$

Суммарный ток в месте КЗ с учетом подпитки от электродвигателей:

$$I_{кз}^{(3)} = I_{к.р}^{(3)} + 2,29 I_{н.т}, \quad (2-15)$$

где $I_{к.р}^{(3)}$ – расчетный ток КЗ от трансформатора, для металлического КЗ равен $I_{к.макс}^{(3)}$; для КЗ через переходные сопротивления равен $I_{к.ср}^{(3)}$.

Ударный ток КЗ от электродвигателей:

$$i_{у.дв} = k_{у.дв} \sqrt{2} I_{дв}^* = 3,22 I_{н.т}, \quad (2-16)$$

где $k_{у.дв}$ – ударный коэффициент тока КЗ от электродвигателей, принимается равным единице ввиду быстрого затухания аperiodической составляющей.

Суммарный ударный ток КЗ с учетом подпитки от электродвигателей:

$$i_{у\sum} = i_y + 3,22 I_{н.т} \quad (2-17)$$

Тепловой импульс тока КЗ ($\text{кА}^2 \cdot \text{с}$). Значение теплового импульса зависит от расположения точки КЗ в электрической схеме. При выборе аппаратов на главном щите 0,4 кВ тепловой импульс определяется по выражению:

$$B_k = (I_{к.р}^{(3)})^2 (t_{откл} + T_{а.ср}) + 1,5 (I_{дв}^*)^2 T_{а.ср} + 4 I_{дв}^* I_{к.р}^{(3)} T_{а.ср}, \quad (2-18)$$

где $t_{откл} = t_{с.о} + t_a$ – время отключения КЗ, с; $t_{с.о}$ – выдержка времени срабатывания отсечки селективного автомата, с, для автоматов отходящих линий обычно принимают минимальные уставки по времени, так как в подавляющем большинстве случаев этого достаточно; t_a – время гашения дуги, для автоматических выключателей серии АВМ и «Электрон» равно 0,06 с, для АЗ700 – 0,01 с; $T_{а.ср}$ – усредненное значение времени затухания свободных токов КЗ, принимается 0,03 с; $I_{к.р}^{(3)}$ – расчетный ток КЗ, кА, для металлических КЗ равен $I_{к.макс}^{(3)}$, для КЗ через переходные сопротивления равен $I_{к.ср}^{(3)}$.

Пример 2-2. КТП с трансформатором мощностью 1000 кВ·А, напряжением 6,3/0,4 кВ, $U_k = 5,5\%$ питается от энергосистемы. Ток КЗ со стороны энергосистемы на зажимах ВН трансформатора составляет в максимальном режиме 17 кА, в минималь-

ном – 10 кА. Определить параметры для выбора автоматических выключателей отходящих от КТП линий, а также минимальный ток двухфазного КЗ на шинах 0,4 кВ КТП и в конце отходящей кабельной линии с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 120 \text{ мм}^2$ длиной 100 м.

Решение. Расчет при металлическом КЗ в максимальном режиме работы питающей энергосистемы. Сопротивление питающей энергосистемы, приведенное к напряжению 0,4 кВ, по формулам (2-6) и (2-7) составляет $x_c = 10^3 \cdot (0,4/6,3)^2 \cdot 6,3 / (\sqrt{3} \cdot 17) = 0,85 \text{ мОм}$. Сопротивление трансформатора (см. табл. 2.4) $x_T = 8,5 \text{ мОм}$; $r_T = 2 \text{ мОм}$. Максимальный ток металлического трехфазного КЗ на шинах 0,4 кВ определяем по формуле (2-1):

$$I_{к.макс}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(0,85 + 8,5)^2 + 2^2}} = 24 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока подпитки от электродвигателей по формуле (2-14) $I_{дв}^* = 2,29 \cdot 1,445 = 3,3 \text{ кА}$, где 1,445 – номинальный ток силового трансформатора, кА.

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры (с учетом подпитки от двигателей) по формуле (2-15) $I_{кз}^{(3)} = 24 + 3,3 = 27,3 \text{ кА}$.

Отношение результирующих сопротивлений до шин 0,4 кВ $x_{\sum}/r_{\sum} = (0,85 + 8,5)/2 = 4,67$. С учетом этого находим $k_y = 1,5$, а значение ударного тока от системы по формуле (2-13) $i_y = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 24 = 50,9 \text{ кА}$. Суммарный ударный ток с учетом подпитки от двигателей по формуле (2-17) $i_{у\sum} = 50,9 + 3,22 \cdot 1,445 = 55,5 \text{ кА}$.

Тепловой импульс тока КЗ для автоматических выключателей серии АВМ и «Электрон» при выдержке времени срабатывания отсечки $t_{с.о} = 0,25 \text{ с}$ по формуле (2-18) $B_k = 24^2 \cdot (0,25 + 0,06 + 0,03) + 1,5 \cdot 3,3^2 \cdot 0,03 + 4 \cdot 3,3 \cdot 24 \cdot 0,03 = 206 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$. Аналогично для выключателей АЗ700 при $t_{с.о} = 0,1 \text{ с}$ имеем $B_k = 90,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

Значения токов при двухфазном металлическом КЗ в минимальном режиме питающей энергосистемы. Сопротивление питающей энергосистемы:

$$x_c = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 10} \left(\frac{0,4}{6,3} \right)^2 10^3 = 1,47 \text{ мОм}. \quad \text{При КЗ на шинах 0,4 кВ:}$$

$$I_{к.мин}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(1,47 + 8,5)^2 + 2^2}} = 22,7 \text{ кА}, \quad I_{к.мин}^{(2)} = 0,867 \cdot 22,7 = 19,7 \text{ кА}.$$

Сопротивление кабеля по формуле (2-11): $x_k = 0,057 \cdot 100 = 5,7 \text{ мОм}$; $r_k = 0,32 \cdot 100 = 32 \text{ мОм}$. При КЗ в конце кабеля:

$$I_{к.мин}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(1,47 + 8,5 + 5,7)^2 + (2 + 32)^2}} = 6,2 \text{ кА}, \quad I_{к.мин}^{(2)} = 0,867 \cdot 6,2 = 5,38 \text{ кА}.$$

Выполним тот же расчет, но с учетом токоограничивающего действия дуги в месте КЗ. Значение тока КЗ на шинах с учетом $R_{п} = 15 \text{ мОм}$ в максимальном режиме работы питающей системы по формуле (2-3): $I_{кР}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(0,85 + 8,5)^2 + (2 + 15)^2}} = 12 \text{ кА}$.

Наиболее вероятное значение тока КЗ по формуле (2-5): $I_{к.ср}^{(3)} = \frac{(24 + 12)}{2} = 18 \text{ кА}$.

Суммарное значение тока для выбора аппаратуры с учетом токоограничивающего действия электрической дуги и подпитки от двигателей по формуле (2-15):
 $I_{\Sigma}^{(3)} = 18 + 3,3 = 21,3 \text{ кА}$.

Ударный ток с учетом подпитки от двигателей по формулам (2-13) и (2-17):
 $I_{\Sigma} = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 18 + 3,22 \cdot 1,44 = 37,6 \text{ кА}$.

Тепловой импульс тока КЗ для автоматов серии АВМ и «Электрон» ($t_{c.0} = 0,25 \text{ с}$):
 $B_k = 18^2 \cdot (0,25 + 0,06 + 0,03) + 1,5 \cdot 3,3^2 \cdot 0,03 + 4 \cdot 3,3 \cdot 18 \cdot 0,03 = 117,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$. Аналогично для автоматов АЗ700 ($t_{c.0} = 0,1 \text{ с}$) $B_k = 53 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$.

Значения токов при двухфазном КЗ через переходные сопротивления в минимальном режиме. При КЗ на шинах:

$$I_{\text{KR}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(1,47 + 8,5)^2 + (2 + 15)^2}} = 11,7 \text{ кА}, \quad I_{\text{KR}}^{(2)} = 0,867 \cdot 11,7 = 10,1 \text{ кА}.$$

При КЗ за кабелем:

$$I_{\text{KR}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(1,47 + 8,5 + 5,7)^2 + (2 + 32 + 15)^2}} = 4,5 \text{ кА}, \quad I_{\text{KR}}^{(2)} = 0,867 \cdot 4,5 = 3,9 \text{ кА}.$$

Расчет токов КЗ по кривым приложения П1-1÷П1-10 дает тот же результат. Не все из рассчитанных параметров нужны для выбора конкретных типов выключателей, это зависит от их каталожных данных. Здесь лишь дан пример их вычисления.

Тепловой спад тока КЗ. При КЗ за кабелем он нагревается и его активное сопротивление увеличивается. Вследствие этого ток КЗ уменьшается. Это явление называется тепловым спадом тока КЗ. Если сеть 0,4 кВ оснащена быстродействующими токовыми отсечками, то тепловой спад обычно не учитывают из-за незначительного влияния на значения токов КЗ. Однако если защита имеет выдержку времени (например, резервная защита), то важно оценить, не приведет ли тепловой спад тока КЗ к ее отказу. Значение активного удельного сопротивления кабеля $r_{\text{уд}}$ с учетом его нагрева при КЗ до температуры ϑ можно определить по выражению:

$$r_{\text{уд } \vartheta} = r_{\text{уд } 20} [1 + \alpha(\vartheta - 20)], \quad (2-19)$$

где $r_{\text{уд } 20}$ — активное удельное сопротивление кабеля при температуре 20°C , мОм/м; α — температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$, принимается для медных и алюминиевых жил равным 0,004.

Если известно активное удельное сопротивление кабеля $r_{\text{уд } \vartheta_1}$ при температуре ϑ_1 , отличной от 20°C , то значение активного удельного сопротивления кабеля с учетом его нагрева при КЗ до температуры ϑ можно определить по выражению:

$$r_{\text{уд } \vartheta} = \frac{r_{\text{уд } \vartheta_1} [1 + \alpha(\vartheta_1 - 20)]}{1 + \alpha(\vartheta - 20)}. \quad (2-20)$$

Значения активного удельного сопротивления кабелей до КЗ можно принимать по табл. 2.5, в которой они указаны при температуре $\vartheta_1 = 65^\circ\text{C}$

(для достаточно напряженного режима работы сети). Температуру ϑ_k , до которой нагреется кабель в процессе КЗ, можно найти по кривым рис. 2-6, взятым из работ [31, 32], причем в работе [32] указано, что эти кривые построены с учетом теплового спада тока КЗ.

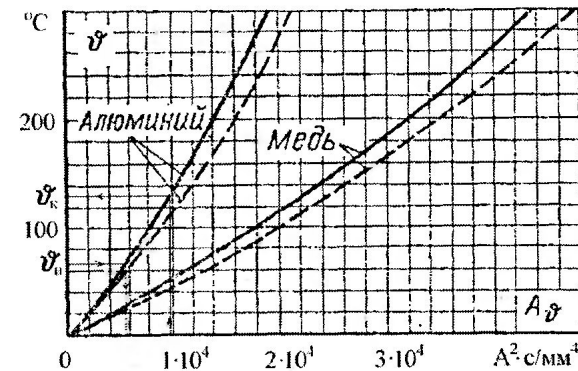


Рис. 2-6. Кривые для определения температуры проводников при КЗ

Сплошные кривые относятся к шинам и кабелям со сплошными жилами, штриховые — к кабелям с многопроволочными жилами и вязкой пропиткой, которая увеличивает теплоемкость жилы и снижает ее температуру. Для определения конечной температуры ϑ_k следует вычислить значение конечной тепловой функции $A_\vartheta = A_k$ по формуле:

$$A_k = A_n + \frac{B_k}{S^2}, \quad (2-21)$$

где A_n определяется по кривым рис. 2-6 для начальной температуры проводника ϑ_n до КЗ; B_k — тепловой импульс, характеризующий количество тепла, выделенное током за время КЗ, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$; S — сечение проводника, мм^2 .

Пример 2-3. Проверить, насколько влияет тепловой спад тока на чувствительность резервной максимальной токовой защиты при КЗ в конце кабельной линии питания сборки. Кабель с алюминиевыми жилами сечением $3 \times 120 \text{ мм}^2$ длиной 50 м, подключен за трансформатором мощностью 1000 кВ·А, $u_k = 5,5\%$, сопротивление питающей системы $x_\Sigma = 0,1 \text{ х}_T$. Резервная защита выполнена с помощью реле тока РТ-40 и времени типа РВ, ток срабатывания защиты $I_{c.з} = 3,8 \text{ кА}$, время срабатывания $t_{c.з} = 0,8 \text{ с}$.

Решение. Вычисляем значения токов КЗ на сборке. Значения сопротивлений трансформатора по табл. 2.4 $x_T = 8,6 \text{ мОм}$, $r_T = 2 \text{ мОм}$, системы $x_\Sigma = 0,86 \text{ мОм}$, кабеля по формуле (2-11) $x_k = 0,057 \cdot 50 = 2,85 \text{ мОм}$, $r_k = 0,32 \cdot 50 = 16 \text{ мОм}$. Ток металлического КЗ по выражению (2-1): $I_k^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(8,6 + 0,86 + 2,85)^2 + (2 + 16)^2}} = 10,6 \text{ кА}$, дугового КЗ

по (2-3): $I_{кR}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(8,6 + 0,86 + 2,85)^2 + (2 + 16 + 15)^2}} = 6,56$ кА. Коэффициент чувствительности резервной защиты при КЗ в конце кабеля составляет $0,87 \cdot 6,56 / 3,8 = 1,5$. Определим, насколько он снижается при нагреве кабеля током КЗ.

Считаем, что кабель нагревается наиболее вероятным током КЗ, значение которого составляет по (2-5) $I_{к.ср}^{(3)} = (10,6 + 6,56) / 2 = 8,6$ кА, и что начальная температура кабеля из-за напряженного режима работы и высокой температуры окружающей среды составляла $\theta_{н} = 65^\circ\text{C}$. По кривым рис. 2-6 находим, что температуре 65°C соответствует значение начальной тепловой функции $A_{н} = 0,55 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$. Значение конечной тепловой функции по выражению (2-21) составляет $A_{к} = 0,55 \cdot 10^4 + 8600^2 \cdot (0,8 + 0,03) / 120^2 = 0,98 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$. Этому значению по кривым рис. 2-6 соответствует конечная температура $\theta_{к} = 130^\circ\text{C}$. Активное удельное сопротивление кабеля при этой температуре составит по (2-20): $r_{уд \theta} = \frac{0,32 [1 + 0,004(130 - 20)]}{1 + 0,004(65 - 20)} = 0,39$ мОм/м, активное сопротивление кабеля составит $0,39 \cdot 50 = 19,5$ мОм. Поскольку поведение дуги непредсказуемо, то в конце КЗ ток может снизиться до минимального значения:

$$I_{кR}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{(8,6 + 0,86 + 2,85)^2 + (2 + 19,5 + 15)^2}} = 6 \text{ кА, коэффициент чувствительности}$$

защиты при этом составит $0,87 \cdot 6 / 3,8 = 1,37$. Можно сделать вывод, что тепловой спад тока в данном случае не повлияет на работу защиты, тем более, что ток возврата защиты составит примерно $3,8 \cdot 0,8 = 3$ кА, где 0,8 – коэффициент возврата реле РТ-40. Значительно опаснее прерывистый характер горения дуги, из-за чего защита, имеющая выдержку времени, может периодически возвращаться в процессе КЗ. Для предотвращения этого явления необходимо обеспечить задержку возврата защиты, о чем подробно указано в разделе «Особенности выполнения логики МТЗ» главы 17.

2.5. Расчет токов однофазного КЗ при питании от энергосистемы

Расчет токов однофазного металлического КЗ. Переходное сопротивление в месте повреждения не учитывается. Для однофазных КЗ возможны два метода расчета – точный и приближенный. Точный расчет производится по [12, 28]:

$$I_{к}^{(1)} = \frac{3U_{\phi}}{\sqrt{(r_{1\Sigma} + r_{2\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}, \quad (2-22)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В; $r_{1\Sigma}$, $r_{2\Sigma}$ и $r_{0\Sigma}$ – результирующее активное сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности до точки КЗ, Ом; $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$ – результирующее индуктивное сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательностей, Ом.

Формула (2-22) неудобна для расчетов, так как не дает возможности пользоваться замеренными на практике значениями сопротивлений петли

фаза-нуль. Поэтому чаще используют приближенное выражение, рекомендованное «Инструктивными материалами Главгосэнергонадзора» [33]:

$$I_{к}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{\Sigma}^{(1)}}{3} + z_{пт}}, \quad (2-23)$$

где $z_{пт}$ – полное сопротивление петли фаза-нуль от трансформатора до точки КЗ, измеренное при испытаниях или найденное из расчета, мОм; $z_{\Sigma}^{(1)}$ – полное сопротивление понижающего трансформатора токам однофазного КЗ, принимается по данным табл. 2.4 или находится по выражению:

$$z_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{(x_{1T} + x_{2T} + x_{0T})^2 + (r_{1T} + r_{2T} + r_{0T})^2}, \quad (2-24)$$

где x_{1T} и r_{1T} – индуктивное и активное сопротивления трансформатора токам прямой последовательности, мОм; x_{2T} и r_{2T} – то же обратной последовательности, мОм; x_{0T} и r_{0T} – то же нулевой последовательности, мОм.

Выражение (2-23) справедливо при большой мощности питающей энергосистемы ($x_c < 0,1x_T$). Если питающая энергосистема имеет ограниченную мощность, то значения $z_{\Sigma}^{(1)}$ увеличиваются с учетом сопротивления энергосистемы:

$$z_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{(x_{1T} + x_{2T} + x_{0T} + 2x_c)^2 + (r_{1T} + r_{2T} + r_{0T} + 2r_c)^2}, \quad (2-25)$$

а расчет тока однофазного КЗ выполняется по выражению:

$$I_{к}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{\Sigma}^{(1)}}{3} + z_{пт}}, \quad (2-26)$$

значения $z_{\Sigma}^{(1)}$ учетом можно принимать по табл. 2.9.

Из табл. 2.9 видно большое различие сопротивлений $z_{\Sigma}^{(1)}/3$ трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y и Δ/Y . При небольшом сопротивлении питающей энергосистемы и близких однофазных КЗ значения токов однофазного КЗ после трансформаторов Δ/Y в примерно в три раза больше, чем после трансформаторов Y/Y , при этом они практически равны токам трехфазного КЗ. Поэтому для обеспечения чувствительности защит от однофазных КЗ применение трансформаторов Δ/Y предпочтительнее.

Полезно запомнить, что для всех трансформаторов с одинаковыми схемой соединения обмоток и напряжением u_k произведение $S_{н.т.} (z_{\Sigma}^{(1)}/3) = \beta \approx \text{const}$ (с учетом сопротивления питающей энергосистемы – при сопоставимом отношении сопротивлений x_c/x_T). Отсюда можно найти значение $z_{\Sigma}^{(1)}/3$ для трансформатора другой мощности, в том числе старого ти-

па. Например, для трансформаторов, имеющих $u_k = 5,5\%$ и схему соединения обмоток Y/Y при $x_c / x_T = 0,1$, $\beta \approx 27000$. Следовательно, для трансформатора мощностью 750 кВ·А (при прочих равных условиях) $z_{\Sigma}^{(1)} / 3 \approx 27000 / 750 = 36$ мОм.

Таблица 2.9

Значения $z_{\Sigma}^{(1)} / 3$ для расчета металлических однофазных КЗ при различной электрической удаленности трансформаторов от источников питания

Схема соединения обмоток	Трансформатор		Значения $z_{\Sigma}^{(1)} / 3$, мОм		
	$S_{н.т.}$, кВ·А	U_k , %	$x_c = 0,1x_T$	$x_c = x_T$	$x_c = 2x_T$
Y/Y	400	4,5	65,96	75,7	86,66
	630	5,5	43,77	51,65	60,5
	1000	5,5	27,53	32,46	38
	1600	5,5	16,9	19,73	22,92
	400	4,5	19,07	28,94	40,1
Δ/Y	630	5,5	14,8	22,76	31,68
	1000	5,5	9,39	14,47	20,17
	1600	5,5	5,86	9,07	12,65

Примечание. Активное сопротивление энергосистемы не учитывалось.

Сопротивление петли фаза-нуль находят по выражению:

$$z_{пт} = z_{пт.уд1} \cdot l_1 + z_{пт.уд2} \cdot l_2 + \dots \quad (2-27)$$

где $z_{пт.уд}$ – удельное сопротивление петли фаза-нуль каждого из последовательно включенных участков цепи от трансформатора до точки КЗ, принимается по данным табл. 2.10–2.14 или работы [29], мОм/м; l – длина этого участка, м.

Значения удельного сопротивления петли фаза-нуль шинпроводов принимают по заводским данным или по табл. 2.15.

Сопротивление контактов шин, аппаратов, трансформаторов тока не учитывается, поскольку расчет по выражениям (2-23) или (2-26) дает некоторый запас по току вследствие арифметического сложения $z_T^{(1)} / 3$ и $z_{пт}$.

При расчетах однофазных КЗ во взрывоопасных помещениях вспомогательные проводники зануления (алюминиевые оболочки кабелей, стальные полосы) в расчетную схему не включаются. Свинцовые оболочки кабелей не включаются в расчетную схему в любом случае, так как их не разрешается использовать в качестве заземляющих проводников.

Таблица 2.10

Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза-нуль для кабеля или пучка проводов с алюминиевыми жилами при температуре жилы 65°C, мОм/м [29]

Сечение фазного провода, мм ²	Значение $z_{пт.уд}$ мОм/м при сечении нулевого провода, мм ² , равном										
	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
2,5	29,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	24,08	18,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	15,43	12,34	9,88	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	9,88	7,41	5,92	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	5,92	4,43	3,7	3,35	-	-	-	-
25	-	-	-	5,19	3,7	2,96	2,54	2,22	-	-	-
35	-	-	-	4,77	3,35	2,54	2,12	1,8	1,59	-	-
50	-	-	-	-	3,06	2,22	1,8	1,48	1,27	1,13	-
70	-	-	-	-	-	2,01	1,59	1,27	1,06	0,92	-
95	-	-	-	-	-	-	1,45	1,13	0,92	0,78	-
120	-	-	-	-	-	-	1,37	1,05	0,84	0,7	0,62
150	-	-	-	-	-	-	-	0,99	0,82	0,67	0,52
185	-	-	-	-	-	-	-	0,95	0,73	0,59	0,51

Примечание. При применении кабелей с медными жилами табличные значения $z_{пт.уд}$ уменьшить в 1,7 раза.

Таблица 2.11

Полное удельное сопротивление $z_{пт.уд}$ петли фаза-алюминиевая оболочка трехжильных кабелей с бумажной изоляцией (без нулевой жилы), мОм/м [29]

Число и сечение жил, мм ²	Значение $z_{пт.уд}$ для кабелей			
	Медных АГ, АБ	Алюминиевых ААГ, ААБ	Медных АШв	Алюминиевых ААШв
3x6	5,02	7,71	4,98	7,67
3x10	3,33	4,95	3,31	4,92
2x16	2,35	3,36	2,31	3,33
3x25	1,81	2,46	1,79	2,44
3x35	1,39	1,85	1,37	1,83
3x50	1,09	1,42	1,07	1,4
3x70	0,84	1,07	0,83	1,06
3x95	0,67	0,84	0,66	0,83
3x120	0,57	0,71	0,56	0,7
3x150	0,42	0,53	0,44	0,54
3x185	0,36	0,45	0,36	0,45
3x240	0,31	0,37	0,29	0,36

Таблица 2.12

Полное удельное сопротивление $Z_{пт.уд}$ петли фаза-нуль с учетом проводимости алюминиевой оболочки четырехжильного кабеля с бумажной изоляцией, мОм/м [29]

Число и сечение жил, мм ²	Значение $Z_{пт.уд}$ для кабелей		Число и сечение жил, мм ²	Значение $Z_{пт.уд}$ для кабелей	
	Медных АГ, АБ	Алюминиевых ААГ, ААБ		Медных АГ, АБ	Алюминиевых ААГ, ААБ
3×6+1×4	4,74	7,49	3×70+1×25	0,61	0,87
3×10+1×6	3,06	4,73	3×95+1×25	0,48	0,69
2×16+1×10	2,01	3,08	3×120+1×35	0,41	0,58
3×25+1×16	1,38	2,1	3×150+1×50	0,31	0,45
3×35+1×16	1,06	1,57	3×185+1×50	0,27	0,37
3×50+1×25	0,78	1,16			

Таблица 2.13

Полное удельное сопротивление $Z_{пт.уд}$ петли фаза трехжильного кабеля с алюминиевыми жилами - стальная полоса 40×4, уложенная на расстоянии 0,8 м от кабеля, мОм/м [29]

Число и сечение жил, мм ²	Значение $Z_{пт.уд}$ мОм/м, при токе однофазного КЗ, А			Число и сечение жил, мм ²	Значение $Z_{пт.уд}$ мОм/м, при токе однофазного КЗ, А		
	200	400	2500		200	400	2500
3×6	8,8	8,37	—	3×70	3,25	2,79	2,34
3×10	6,29	5,87	—	3×95	3,12	2,67	2,22
2×16	4,92	4,47	4,02	3×120	3,05	2,6	2,15
3×25	4,12	3,66	3,21	3×150	2,99	2,54	2,09
3×35	3,73	3,27	2,81	3×185	2,95	2,5	2,05
3×50	3,44	2,98	2,52	3×240	2,91	2,45	2,01

Таблица 2.14

Полное удельное сопротивление $Z_{пт.уд}$ цепи фаза-нуль четырехпроводной воздушной линии с алюминиевыми проводами, мОм/м [29]

Фазный провод	Расстояние фаза-нуль, м	Значение $Z_{пт.уд}$ мОм/м, при нулевом проводе						
		А-16	А-25	А-35	А-50	А-70	А-95	А-120
А-16	0,4	4,86						
	1	4,87						
	2	4,88						
А-25	0,4	4,01	3,18	2,76	2,43			
	1	4,04	3,21	2,79	2,46			
	2	4,05	3,23	2,81	2,49			
А-35	0,4	3,59	2,76	2,53	2,01	1,78		
	1	3,62	2,79	2,57	2,05	1,82		
	2	3,63	2,81	2,59	2,08	1,86		

Продолжение таблицы 2.14

Фазный провод	Расстояние фаза-нуль, м	Значение $Z_{пт.уд}$ мОм/м, при нулевом проводе						
		А-16	А-25	А-35	А-50	А-70	А-95	А-120
А-50	0,4	3,25	2,43	2,01	1,69	1,47	1,35	
	1	3,28	2,46	2,05	1,73	1,53	1,40	
	2	3,30	2,49	2,08	1,77	1,58	1,45	
А-70	0,4		2,21	1,78	1,47	1,28	1,15	1,08
	1		2,25	1,82	1,53	1,34	1,21	1,14
	2		2,28	1,86	1,58	1,39	1,27	1,20
А-95	0,4		2,07	1,66	1,35	1,15	1,02	0,95
	1		2,11	1,71	1,40	1,21	1,09	1,03
	2		2,14	1,75	1,45	1,27	1,15	1,09
А-120	0,4			1,58	1,27	1,08	0,95	0,85
	1			1,63	1,33	1,14	1,03	0,93
	2			1,67	1,38	1,20	1,09	1,00

Таблица 2.15

Полное удельное сопротивление $Z_{пт.уд}$ цепи фаза-нуль закрытых шинпроводов в стальном кожухе, мОм/м [29]

Тип шинпровода	Номинальный ток, А	Размер алюминиевых жил в одной фазе, мм	Значение $Z_{пт.уд}$ мОм/м, при токе однофазного КЗ, А, равном					
			300	400	500	600	800	1000, 3000
Шинпровод с нулевой шиной (четырёхпроводный)								
ШМАХ-65	600	80×8	0,3	0,33	—	0,3	0,28	—
ШРА-64-250	250	30×4	0,9	0,91	—	0,93	1,05	
ШРА-64-400	400	40×5	0,65	0,66	—	0,67	0,76	
ШРА-64-600	600	60×6	0,6	0,61	—	0,62	0,7	
ШОС-67	25	см. примеч.	7,22					
Шинпровод без нулевой шины (трехпроводный)								
ШМА-59С	4000	2(160×12)						0,45
ШМА-59С	2500	2(120×10)						0,5
ШМА-1Х-1600	1600	120×10						0,5
ШМА-65	1600	2(100×10)	—					0,49
ШМА-58	1500	2(80×8)						0,51
ШМА-1Х-1000	1000	80×8				0,6	0,6	0,55
ШМАХ-65	1000	120×10				0,58	0,58	0,53
ШРА-2-Ф	250	30×5	1,43			1,38	1,38	1,28
ШРА-4Ф	400	50×5	1,25			1,2	1,2	1,15
ШРА-6Ф	600	60×6	1,1			1,05	1,06	1,0

Примечание. Шинпровод ШОС-67 выполнен медным проводом сечением 6 мм².

Расчет токов однофазного КЗ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения и сопротивления питающей энергосистемы. С помощью метода симметричных составляющих можно вывести удобное выражение для определения тока однофазного КЗ, учитывающее и сопротивление питающей системы, и переходные сопротивления. Известно, что ток однофазного КЗ равен:

$$I_{\text{KR}}^{(1)} = \frac{3\dot{U}_{\phi}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2-28)$$

Сопротивления прямой Z_1 , обратной Z_2 и нулевой Z_0 последовательностей с учетом сопротивления внешней сети и переходных сопротивлений составляют:

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1c} + Z_{1T} + Z_{1л} + R_{\text{п}}, \\ Z_2 &= Z_{2c} + Z_{2T} + Z_{2л} + R_{\text{п}} = Z_{1c} + Z_{2T} + Z_{1л} + R_{\text{п}}, \\ Z_0 &= Z_{0T} + Z_{0л} + R_{\text{п}} + 3Z_{\text{н}} + 3jx' = Z_{0T} + Z_{1л} + R_{\text{п}} + 3Z_{\text{н}} + 3jx', \end{aligned} \quad (2-29)$$

где Z_{1c}, Z_{2c} – комплексы сопротивлений прямой и обратной последовательностей системы; Z_{1T}, Z_{2T}, Z_{0T} – комплексы сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора; $Z_{1л}, Z_{2л}, Z_{0л}$ – комплексы сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей линии от трансформатора до места КЗ; $Z_{\text{н}}, 3jx'$ – комплекс сопротивления нулевого провода линии и составляющая индуктивного сопротивления цепи фаза-нуль от трансформатора до места КЗ; $R_{\text{п}}$ – переходные сопротивления, принимаются равными 15 мОм.

Подставляя эти выражения в (2-28) и учитывая, что $Z_{1T} + Z_{2T} + Z_{0T} = Z_{\text{T}}^{(1)}$ есть комплекс полного сопротивления трансформатора, а $Z_{1л} + Z_{\text{н}} + jx' = Z_{\text{пт}}$ есть комплекс сопротивления петли фаза-нуль, получим:

$$I_{\text{KR}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{T}}^{(1)} + 2Z_{\text{с}} + 3R_{\text{п}}}{3} + Z_{\text{пт}}} \quad (2-30)$$

Обозначив $|Z_{\text{T}}^{(1)} + 2Z_{\text{с}} + 3R_{\text{п}}| / 3 = z_{\Sigma R}^{(1)} / 3$, и перейдя к арифметическому сложению $z_{\Sigma R}^{(1)} / 3$ и $Z_{\text{пт}}$, получим:

$$I_{\text{KR}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{\Sigma R}^{(1)}}{3} + z_{\text{пт}}}, \quad (2-31)$$

$$z_{\Sigma R}^{(1)} = |Z_{\text{T}}^{(1)} + 2Z_{\text{с}} + 3R_{\text{п}}| = \sqrt{(2r_{1T} + r_{0T} + 2r_{\text{с}} + 3R_{\text{п}})^2 + (2x_{1T} + x_{0T} + 2x_{\text{с}})^2}, \quad (2-32)$$

где $z_{\Sigma R}^{(1)}$ – модуль полного комплекса сопротивления сети, трансформатора и переходных сопротивлений; r_{1T}, x_{1T} – активное и индуктивное сопротив-

ление трансформатора токам прямой последовательности; r_{0T}, x_{0T} – то же токам нулевой последовательности; $r_{\text{с}}, x_{\text{с}}$ – активное и индуктивное сопротивление питающей системы токам прямой последовательности; $R_{\text{п}}$ – переходные сопротивления; $z_{\text{пт}}$ – сопротивление петли фаза-нуль от трансформатора до места КЗ.

Значения $z_{\Sigma R}^{(1)} / 3$ с учетом $R_{\text{п}} = 15$ мОм и в зависимости от соотношения сопротивлений питающей энергосистемы $x_{\text{с}}$ и трансформатора x_{T} (прямой последовательности) приведены в табл. 2.16.

Выражение (2-31) удобно для практических расчетов, позволяет учесть сопротивление питающей системы до трансформатора, переходные сопротивления, а также использовать данные относительно сопротивлений петли фаза-нуль, приведенные в работе [29] и практические замеры, с помощью которых можно рассчитать токи $I_{\text{KR}}^{(1)}$ для всех встречающихся на практике случаев.

Таблица 2.16

Значения $z_{\Sigma R}^{(1)} / 3$ с учетом токоограничивающего действия дуги в месте повреждения при различной электрической удаленности трансформаторов от источников питания

Схема соединений обмоток	Трансформатор		Значения $z_{\Sigma R}^{(1)} / 3$, мОм		
	$S_{\text{н.Т}}$, кВ·А	$u_{\text{к}}$, %	$x_{\text{с}} = 0,1x_{\text{T}}$	$x_{\text{с}} = x_{\text{T}}$	$x_{\text{с}} = 2x_{\text{T}}$
Y/Y	400	4,5	72,4	81,37	91,66
	630	5,5	50	57,08	65,2
	1000	5,5	34,84	38,85	43,58
	1600	5,5	25,6	27,56	29,92
Δ/Y	400	4,5	27,67	35,21	44,84
	630	5,5	23,36	29,07	36,48
	1000	5,5	19,32	22,24	26,3
	1600	5,5	17,1	18,44	20,44

Заметим, что выражения (2-23), (2-26) и (2-31) из-за арифметического сложения сопротивлений, указанных в знаменателе, дают некоторую погрешность в сторону увеличения общего сопротивления цепи фаза-нуль, то есть в сторону запаса. Этот запас компенсирует сопротивление мелких участков сети, которые часто не учитывают в приближенных расчетах (небольшие участки шин от трансформатора до главного щита 0,4 кВ и автоматов отходящих линий, участки между автоматом, пускателем и тепловыми реле на вторичных сборках и т.п.).

Пример 2-4. Вычислить ток однофазного КЗ с учетом переходных сопротивлений на зажимах трансформатора мощностью 400 кВА, $u_{\text{к}} = 4,5\%$, соединение обмоток Y/Y, присоединенного к энергосистеме сопротивлением $x_{\text{с}} = 0,1x_{\text{T}}$.

Решение. Значение $z_{\Sigma R}^{(1)}/3$ можно принять по табл. 2.16, однако в учебных целях покажем ход его вычисления. По табл. 2.4 для данного трансформатора $x_{1T} = x_{2T} = 17,1$ мОм; $r_{1T} = r_{2T} = 5,5$ мОм; $x_{0T} = 148,7$ мОм; $r_{0T} = 55,6$ мОм. Сопротивление системы $x_c = 1,71$ мОм; $r_c \approx 0$, $R_{\Sigma} = 15$ мОм. С учетом (2-32) имеем:

$$\frac{z_{\Sigma R}^{(1)}}{3} = \frac{\sqrt{(2 \cdot 17,1 + 148,7 + 2 \cdot 1,71)^2 + (2 \cdot 5,5 + 55,6 + 3 \cdot 15)^2}}{3} = 72,4 \text{ мОм.}$$

По формуле (2-31), приняв $z_{\text{ит}} = 0$, имеем $I_{\text{KR}}^{(1)} = 231 / 72,4 = 3,2$ кА.

Для сравнения найдем этот ток по кривым приложения (рис. П1-1, в). Вначале вычисляем отношение сопротивлений (прямой последовательности) системы и трансформатора: $x_c/x_T = 1,71/17,1 = 0,1$. По сплошной кривой на рис. П1-1, в находим, что при этом отношении для трансформатора Y/Υ мощностью 400 кВ·А. $I_{\text{KR}}^{(1)} = 3,2$ кА, т.е. получаем тот же результат.

2.6. Определение токов КЗ по расчетным кривым

В приложении приведены расчетные кривые, по которым можно найти значения токов КЗ на шинах КТП (рис. П1-1) и в сети 0,4 кВ (рис. П1-2÷П1-10) после трансформаторов напряжением 6(10)/0,4 кВ, мощностью 1600 кВ·А ($u_k = 5,5\%$), 1000 кВ·А ($u_k = 5,5\%$), 630 кВ·А ($u_k = 5,5\%$) и 400 кВ·А ($u_k = 4,5\%$) в зависимости от соотношения сопротивлений питающей системы и трансформатора, длины, конструкции и сечения кабелей 0,4 кВ с учетом и без учета токоограничивающего действия дуги в месте повреждения. Кривые рис. П1-1÷П1-10 построены по приведенным выше выражениям с использованием данных, приведенных в таблицах. Штриховыми линиями показаны токи металлического КЗ, сплошными – с учетом переходных сопротивлений, равных 15 мОм. Активное сопротивление энергосистемы и сопротивление шин 0,4 кВ не учитывалось. Все кривые даны для кабелей с алюминиевыми жилами. Для нахождения тока КЗ за кабелем с медными жилами по этим кривым необходимо уменьшить его расчетную длину в 1,7 раза.

Для пользования кривыми предварительно необходимо определить соотношение сопротивлений питающей системы и трансформатора: индуктивных x_c/x_T или полных z_c/z_T , последнее – при значительном активном сопротивлении системы (например, наличии протяженных воздушных или кабельных линий 6 или 10 кВ).

Если кабель питает сборку, а от сборки питается двигатель через кабель другого сечения, то ток КЗ на зажимах двигателя можно определить, пользуясь этими же кривыми по условной расчетной длине кабеля, имеющего такое же сечение, как кабель питания двигателя:

$$I_p = I_{\text{к.дв}} + I_{\text{к.сб}} \frac{S_{\text{к.дв}}}{S_{\text{к.сб}}}, \quad (2-33)$$

где $I_{\text{к.дв}}$ – длина кабеля, питающего двигатель; $I_{\text{к.сб}}$ – длина кабеля, питающего сборку; $S_{\text{к.дв}}$ и $S_{\text{к.сб}}$ – соответствующие сечения кабелей.

Можно найти ток КЗ без вычисления I_p непосредственно по графику, как показано на рис. П1-2, а. Сначала находится ток КЗ в конце кабеля, питающего сборку (точка А). Через точку А проводится горизонтальная прямая до пересечения с кривой, соответствующей сечению питающего двигателя кабеля (точка Б). Прибавив к координате I_B длину питающего двигателя кабеля $l_{\text{к.дв}}$, по кривой, соответствующей сечению этого кабеля, находим ток КЗ на зажимах двигателя (точка С).

Если напряжение КЗ или мощность установленного трансформатора отличается от принятых при построении кривых, то следует подобрать ближайший трансформатор, исходя из равенства их сопротивлений. Например, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А, $u_k = 8\%$, $z_T = 0,013$ Ом (0,4 кВ). Следовательно, можно пользоваться графиками для трансформатора 630 кВ·А, $u_k = 5,5\%$, имеющего $z_T = 0,014$ Ом.

Кривые токов однофазных КЗ построены для соотношения сопротивлений (прямой последовательности) системы и трансформатора $x_c/x_T = 0,1$. Стрелками обозначена область, в которой можно по этим кривым находить токи при $x_c \leq 2x_T$, при этом погрешность в определении тока КЗ не превосходит 15% при малых длинах и больших сечениях кабелей и 5% – для больших длин или малых сечений кабелей.

Приближенные значения токов однофазных КЗ для трехжильных кабелей с алюминиевой оболочкой можно находить по кривым для четырехжильных кабелей с алюминиевой оболочкой, при этом полученное по кривым значение тока следует уменьшить на 15% для больших и на 5% для малых сечений кабелей.

Если при определении токов однофазных КЗ при совпадении сечений фазных жил сечение нулевой жилы кабеля меньше приведенного на графиках, то ток КЗ следует находить для кабеля, имеющего меньшее сечение нулевой жилы, независимо от сечений фазных жил. При этом погрешность в нахождении тока будет наименьшей и идет в запас расчета чувствительности защиты.

2.7. Расчет токов КЗ при питании от генераторов собственных электростанций

Собственные электростанции предназначены для электроснабжения при потере основных источников питания и обычно имеют небольшую мощность. Они подключаются либо непосредственно к шинам 0,4 кВ (аварийные генераторы), либо через понижающие трансформаторы 6/0,4 кВ. Расчет токов КЗ выполняется только с целью выбора уставок и проверки чувствительности и селективности действия защит, так как по отключаю-

щей способности аппаратура рассчитана на работу от более мощных основных источников питания.

В зависимости от расчетных условий максимальным может оказаться ток однофазного или трехфазного КЗ, минимальным – ток трех-, двух- или однофазного КЗ. Например, ток однофазного КЗ может оказаться максимальным (по сравнению с другими видами КЗ) на зажимах генератора и минимальным – в удаленных точках сети.

Расчет токов междуфазных КЗ. При близких КЗ в генераторе возникает переходный процесс, сопровождающийся изменением во времени периодической составляющей тока. С удалением точки КЗ от генератора это явление становится незаметным (как при питании от энергосистемы). Электрическую удаленность однозначно характеризует расчетное результирующее сопротивление до точки КЗ в относительных единицах z_{*p} , приведенное к суммарной мощности параллельно работающих генераторов:

$$z_{*p} = z_{\Sigma} \frac{S_{н.г\Sigma}}{U_{cp}^2}, \quad (2-34)$$

где z_{Σ} – суммарное сопротивление всех элементов цепи КЗ, включая генераторы, мОм; $S_{н.г\Sigma}$ – суммарная мощность параллельно работающих генераторов, кВ·А; U_{cp} – среднее напряжение той ступени, к которой отнесено z_{Σ} , В.

Обобщенные кривые зависимости периодической составляющей тока КЗ, отнесенной к номинальному току генератора $I_{к*т} = I_{кт} / I_{н.г.}$, от расчетного сопротивления z_{*p} (x_{*p}) и времени от начала КЗ t для маломощных генераторов приведены на рис. 2-7. Кривые учитывают действие при КЗ устройств автоматического регулирования (АРВ) и форсировки возбуждения (ФВ) генераторов. Эти устройства должны быть постоянно в работе.

Сопротивление $z_{*p} = 0,65$ называется критическим.

Если $z_{*p} < 0,65$, то электрическая удаленность КЗ считается небольшой. При применении аварийных генераторов напряжением 0,4 кВ такое соотношение характерно для КЗ на зажимах генераторов, шинах КТП и основных сборках 0,4 кВ.

Упрощенную картину процессов, происходящих при КЗ в этих точках, рассмотрим на примере внезапного трехфазного КЗ. В начальный момент КЗ индуктивное сопротивление генератора резко уменьшается до сверхпереходного (начального) значения x_d'' , а затем постепенно увеличивается до переходного x_d' и, наконец, до установившегося x_d . Это вызвано соответствующим изменением магнитных потоков в генераторе. Магнитное поле статора генератора, созданное током КЗ и ранее не существовавшее в машине, вызывает по закону Ленца появление встречных полей в обмотке возбуждения и в успокоительной обмотке, вытесняющих магнитное поле

статора на пути рассеяния. По мере затухания встречных полей магнитное поле статора постепенно проникает сначала в зону успокоительной обмотки, затем в зону обмотки возбуждения. Этот процесс сопровождается увеличением сопротивления обмотки статора от x_d'' до x_d' и x_d и соответствующим уменьшением тока КЗ от сверхпереходного до переходного и, наконец, установившегося. Наряду с этим при снижении напряжения (вследствие КЗ) вступают в действие устройства АРВ и ФВ генератора, которые стремятся восстановить напряжение на его зажимах увеличением тока возбуждения и, следовательно, ЭДС.

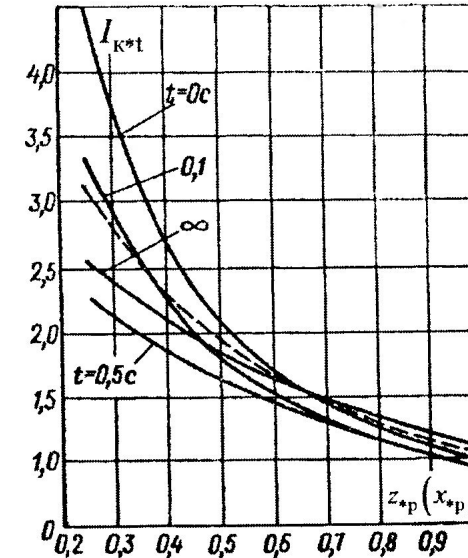


Рис. 2-7. Расчетные кривые изменения токов КЗ для генераторов малой мощности с АРВ (сплошные линии – трехфазное КЗ, штриховая – двухфазное при $t = \infty$, время t – в секундах)

Однако вследствие небольшой электрической удаленности КЗ устройства АРВ и ФВ не могут восстановить напряжение на зажимах генератора до номинального, несмотря на увеличение тока возбуждения до предельного. На изменение тока КЗ во времени больше влияет увеличение сопротивления генератора, чем увеличение его ЭДС. Происходит снижение (затухание) тока КЗ с течением времени от сверхпереходного (начального) $I_{к0}$ ($t = 0$) до установившегося $I_{к\infty}$ ($t = \infty$).

Например, при КЗ в точке, соответствующей $z_{*p} = 0,3$, ток КЗ $I_{к*0}^{(3)} = 3,7$; $I_{к*0,5}^{(3)} = 2,12$, $I_{к*\infty}^{(3)} = 2,35$ (рис. 2-7). Заметим, что вследствие инерционности

устройств АРВ и ФВ они не влияют на начальное значение тока, их действие будет заметно спустя примерно 0,2 с после начала КЗ и особенно – в установившемся режиме КЗ. Поэтому при КЗ в рассмотренной точке значение тока при $t = \infty$ несколько больше, чем при $t = 0,5$ с.

Минимальным значением тока оказывается установившийся ток трехфазного КЗ – его значение всегда меньше установившегося тока двухфазного КЗ, а при КЗ на зажимах генератора – меньше тока однофазного КЗ [34]. Это объясняется тем, что индуктивные сопротивления генератора обратной x_2 и нулевой x_0 последовательностей, которые учитывают при расчете несимметричных КЗ, не изменяются в процессе КЗ, а по значению они значительно меньше индуктивного сопротивления генератора прямой последовательности в установившемся режиме x_d .

Кривые изменения токов при трехфазных КЗ на рис. 2-7 взяты из работы [35]. Кривая токов при двухфазном КЗ при $t = \infty$ и всех значениях z_{*p} располагается между кривыми токов трехфазных КЗ $I_{к*0}^{(3)}$ и $I_{к*к}^{(3)}$. Ее можно получить, воспользовавшись кривыми для трехфазных КЗ, правилом эквивалентности прямой последовательности [12] и известным выражением:

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{kl}^{(n)},$$

где $I_k^{(n)}$ – ток любого (n) несимметричного КЗ; $m^{(n)}$ – коэффициент, соответствующий этому виду КЗ, для двухфазного КЗ $m^{(2)} = m^{(2)} = \sqrt{3}$; $I_{kl}^{(n)}$ – соответствующий ток прямой последовательности.

Например, в точке сети, для которой $z_{*p} = 0,3$, относительные значения токов трехфазного КЗ $I_{к*0}^{(3)} = 3,7$; $I_{к*к}^{(3)} = 2,35$. При двухфазном КЗ в той же точке расчетное сопротивление складывается из суммы сопротивлений прямой и обратной последовательности, и составит $z_{*p} = 0,3 + 0,3 = 0,6$. По кривым трехфазных КЗ для $t = \infty$ $z_{*p} = 0,6$ соответствует относительное значение тока прямой последовательности $I_{к*1z}^{(2)} = 1,65$, таким образом, относительное значение установившегося тока двухфазного КЗ составляет $I_{к*к}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 1,65 = 2,85$.

В точке сети, для которой $z_{*p} = 0,65$, имеем $I_{к*0}^{(3)} \approx I_{к*к}^{(3)} \approx I_{к*к}^{(2)}$, если же $z_{*p} > 0,65$, то $I_{к*0}^{(3)} < I_{к*к}^{(2)} < I_{к*к}^{(3)}$.

Установившийся режим для маломощных генераторов может наступить менее чем за 0,5 с. Например, для генераторов STAMFORD напряжением 0,4 кВ он наступает примерно через 0,1–0,2 с. Это время соизмеримо с временем действия максимальных токовых защит генератора и прилегающей сети 0,4 кВ, к моменту срабатывания выходных реле которых ток КЗ становится равным установившемуся. Поэтому для предотвращения отказов чувствительность действующих с выдержкой времени защит, в зоне действия которых расчетное сопротивление до места повреждения

$z_{*p} < 0,65$, должна проверяться по установившемуся току трехфазного КЗ $I_{к*к}^{(3)}$.

Если $z_{*p} \geq 0,65$, то КЗ считается удаленным. Обычно это соотношение соответствует КЗ на зажимах отдаленных электроприемников при питании длинными кабелями с большим сопротивлением. В этих случаях АРВ и ФВ способны восстановить напряжение на зажимах генератора до номинального (при очень удаленных КЗ вообще не вступают в работу), а изменение сопротивления генератора в процессе КЗ почти не влияет на значение тока КЗ. Установившийся ток трехфазного КЗ оказывается равным или несколько большим сверхпереходного (см. рис. 2-7). Ввиду небольшого различия этих токов можно находить только ток $I_{к*0}^{(3)}$, принимая с целью упрощения $I_{к*0}^{(3)} \approx I_{к*к}^{(3)}$ и $I_{к*0}^{(2)} \approx I_{к*к}^{(2)} \approx 0,867 \cdot I_{к*0}^{(3)}$. Таким образом, при КЗ в этих точках чувствительность защит от междуфазных КЗ, действующих с выдержкой времени, можно проверять при начальном токе двухфазного КЗ $I_{к*0}^{(2)} = 0,867 \cdot I_{к*0}^{(3)}$.

Для защит, действующих без выдержки времени, чувствительность при междуфазных КЗ проверяется при токе $I_{к*0}^{(2)} = 0,867 \cdot I_{к*0}^{(3)}$ независимо от электрической удаленности точки КЗ.

Таким образом, для расчетов защит следует определить значения токов $I_{к*0}^{(3)}$ и $I_{к*0}^{(2)}$ (при $t = 0$), а для защит, имеющих выдержку времени и действующих в зоне $z_{*p} < 0,65$, – дополнительно и значение тока $I_{к*к}^{(3)}$ (при $t = \infty$). Для других моментов времени токи КЗ определять не требуется.

Ток КЗ $I_{к*т}^{(3)}$ (в килоамперах) для любого момента времени t определяется по выражению:

$$I_{к*т}^{(3)} = \frac{E_t}{\sqrt{3}z_{\Sigma}} = \frac{E_t}{\sqrt{3}\sqrt{x_{\Sigma}^2 + (r_{\Sigma} + R_{II})^2}}, \quad (2-35)$$

где E_t – линейная ЭДС генератора для момента времени t , В; x_{Σ} и r_{Σ} – результирующее индуктивное и активное сопротивление цепи КЗ соответственно, включая сопротивление генератора, мОм; R_{II} – переходное сопротивление в месте КЗ, учитывается только при расчетах в сети 0,4 кВ, мОм.

Для момента времени $t = 0$ ЭДС нагруженного генератора $E_0 = U_{н.г} (1 + x_d^* \sin \varphi_{н.г})$; при $\cos \varphi_{н.г} = 0,8$ имеем $\varphi_{н.г} = 37^\circ$ и $\sin \varphi_{н.г} = 0,6$, тогда $E_0 = U_{н.г} (1 + x_d^* \cdot 0,6)$. Учитывая, что номинальное напряжение генератора на 5% выше номинального напряжения сети, а также, что КЗ может возникнуть и при ненагруженном генераторе, обычно можно принять $E_0 \approx (1 + 1,05) U_{н.г}$.

Индуктивное сопротивление генератора (в миллиомах) для момента $t = 0$ определяется по выражению:

$$x_r = x_d'' U_{н.г}^2 / S_{н.г}, \quad (2-36)$$

где $S_{н.г} = P_{н.г} / \cos \varphi_{н.г}$ – номинальная полная мощность генератора, кВт·А; x_d'' – сверхпереходная реактивность генератора в относительных единицах; $U_{н.г}$ – номинальное напряжение генератора, В.

Параметры генераторов приведены в табл. 2.17. Сопротивление понижающего трансформатора и кабелей 0,4 кВ вычисляют по выражениям

Таблица 2.17

Параметры мало мощных генераторов

Параметры	Для генератора типа							
	ГСД-17-08-8	СГД-16-69	СГД-15-41-16	СГД-14-100-6	СГДМ-11-46-4 Электросила	СГДМ-12-42-4 Электросила	HC 634 G STAMFORD	HC 634 K STAMFORD
$P_{н.г}$, кВт	1000	3500	630	2500	500	630	640	888
$S_{н.г}$, кВА	1250	4375	787.5	3125	625	787.5	800	1110
$U_{н.г}$, кВ	6,3	6,3	6,3	6,3	0,4	0,4	0,4	0,4
$I_{н.г}$, А	115	404	72	287	903	1138	1156	1604
$n_{н.г}$, об/мин	750	1000	375	1000	1500	1500	1500	1500
$\cos \varphi_{н.г}$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ОКЗ	1,15*	—	1,1	0,8	0,6*	0,63*	0,35**	0,4**
КПД, %	94,56	96	93	95	94	—	94,1	-
x_d'' , о.е.	0,192*	0,17	0,18	0,16	0,14*	0,167*	0,17	0,14
x_d' , о.е.	0,282	0,21	0,281	—	0,191*	0,214*	0,23	0,2
x_d , о.е.	1,018	0,82	1,172	—	1,92*	1,9*	2,91	2,51
x_2 , о.е.	0,171*	—	—	—	0,15*	0,174*	0,2	0,2
x_0 , о.е.	0,0763*	—	—	—	0,047*	0,054	0,026	0,023
$r_{ст}$, мОм	—	—	—	—	2,8	2,18	3,7	1,9
$I_{*в.пред}$ о.е.	—	—	—	—	9*	10*	6,92**	6,56**

$r_{ст}$ – активное сопротивление фазы статора при температуре 15°C.

* – опытные данные, $I_{*в.пред}$ генераторов СДГМ указано для системы самовозбуждения.

** – расчетные данные.

(2-8) и (2-11). При наличии трансформатора в цепи КЗ все сопротивления приводят к одному базисному напряжению по выражению (2-6). В данном случае за базисное принимается напряжение 0,4 кВ, где находится большинство расчетных точек КЗ. Переходные сопротивления принимают $R_{п} = 15$ мОм.

Далее вычисляют результирующие сопротивления x_{Σ} и r_{Σ} , находят полное результирующее сопротивление цепи КЗ z_{Σ} , а по формуле (2-35) – начальный ток трехфазного КЗ $I_{к0}^{(3)}$.

Для момента времени $t = \infty$ ЭДС и сопротивление генератора будут уже другими, они зависят от удаленности КЗ. Для расчетов используют так называемый метод спрямленных характеристик [12, 34].

Вначале определяют уточненное значение критического сопротивления:

$$z_{кр} \approx \frac{x_{г\infty} U_{г.н}}{E_{г\infty} - U_{г.н}}. \quad (2-37)$$

В этом выражении сопротивление генератора $x_{г\infty}$ принимают равным величине, обратной отношению короткого замыкания ОКЗ (ОКЗ – отношение установившегося тока КЗ на зажимах генератора при токе возбуждения холостого хода к номинальному току генератора). Аналогично формуле (2-36) $x_{г\infty}$ (в миллиомах) равно:

$$x_{г\infty} = \frac{U_{н.г}^2}{ОКЗ \cdot S_{н.г}}. \quad (2-38)$$

ЭДС генератора $E_{г\infty}$ (в вольтах) принимают увеличенной пропорционально относительному предельному току возбуждения $I_{*в.пред}$ (отношение тока возбуждения при форсировке к току возбуждения холостого хода генератора):

$$E_{г\infty} = U_{г.н} \cdot I_{*в.пред}. \quad (2-39)$$

Если внешнее сопротивление участка от зажимов генератора до точки КЗ $z_{вн} < z_{кр}$ (близкое КЗ), то имеет место режим предельного возбуждения, и значение тока КЗ $I_{к0}^{(3)}$ определяют по формуле (2-35), где принимают $E_t = E_{г\infty}$ и $x_t = x_{г\infty}$.

В частности, значение установившегося тока трехфазного КЗ на зажимах генератора можно определить по выражению (2-40), которое трудно получить из (2-35), подставив в него (2-38) и (2-39), при этом активным сопротивлением генератора можно пренебречь:

$$I_{к0}^{(3)} = ОКЗ \cdot I_{*в.пред} \cdot I_{н.г}. \quad (2-40)$$

Если внешнее сопротивление до точки КЗ $z_{вн} \geq z_{кр}$ (удаленное КЗ), то имеет место режим нормального напряжения и значение тока КЗ опреде-

ляют по формуле (2-35), где принимают $E_t = U_{н.г}$, $x_t = 0$. Обычно при КЗ в этих точках значение $I_{к0}^{(3)}$ не рассчитывают, принимая $I_{к0}^{(3)} \approx I_{к0}^{(3)}$ (кроме особых случаев, например проверки чувствительности пусковых органов напряжения). При этом учитывают, что возможное увеличение тока $I_{к0}^{(3)}$ по сравнению с $I_{к0}^{(3)}$ (оно не превышает 10–20%) идет в запас чувствительности максимальных токовых защит, а также компенсирует влияние другой подключенной к генератору нагрузки, сопротивление которой шунтирует КЗ, несколько уменьшая ток в месте повреждения и увеличивая ток генератора [12, 34].

При отсутствии паспортных значений $I_{*в.пред}$ и ОКЗ их рекомендуется определить опытным путем [34].

Для приближенных расчетов можно использовать метод расчетных кривых [12, 35], позволяющий определить относительное значение тока КЗ для любого момента времени в зависимости от расчетного сопротивления $z_{*р}$. Для этого по приведенным выше выражениям определяют z_{Σ} , а затем по выражению (2-34) – расчетное сопротивление до точки КЗ $z_{*р}$ в относительных единицах. По расчетным кривым на рис. 2-7 и значению $z_{*р}$ находят относительные значения тока КЗ $I_{к*т}$ для соответствующего момента времени. Значение тока трехфазного КЗ для этого момента времени определяют по выражению:

$$I_{к*т}^{(3)} = I_{к*т} I_{н\Sigma}, \quad (2-41)$$

где $I_{н\Sigma} = S_{н.г\Sigma} / (\sqrt{3} U_{ср})$ – суммарный номинальный ток работающих генераторов, приведенный к напряжению $U_{ср}$ ступени, где рассматривается КЗ, т.е. к напряжению 0,4 кВ.

Расчетные кривые на рис. 2-7 учитывают шунтирующее влияние нагрузки, подключенной к генераторным шинам. Следует иметь в виду, что этот метод можно использовать, если относительный предельный ток возбуждения не превышает 3–4, при больших значениях он может дать существенную погрешность вычислений установившихся токов КЗ (см. далее пример 2-5).

При расчетах токов КЗ в сети 0,4 кВ, питающейся от генераторов мощностью менее 400 кВт, переходные сопротивления $R_{п}$ можно не учитывать, в этом случае они почти не влияют на значения токов КЗ.

При питании от генераторов напряжением 6(10) кВ через понижающие трансформаторы 6(10)/0,4 кВ расчетные кривые на рис. П1-1, а, П1-2÷П1-4 для определения токов трехфазных КЗ можно использовать лишь при $z_{*р} \geq 0,65$. Отношение x_c / x_t определяют, как указано ранее, но

при этом x_c заменяют на x_t , вычисленное по формуле (2-36) и приведенное к напряжению 0,4 кВ.

Пример 2-5. Определить сверхпереходный и установившийся токи КЗ с учетом переходных сопротивлений $R_{п} = 15$ мОм за кабелем 3 x 95 + 1 x 50 длиной 100 м с алюминиевыми жилами при питании от генератора типа СДГМ-12-42-4, имеющего следующие данные: $P_{н.г} = 630$ кВт; $S_{н.г} = 787$ кВ·А; $U_{н.г} = 0,4$ кВ; $I_{н.г} = 1138$ А; $x_d'' = 0,16$ о.е.; ОКЗ = 0,63; $I_{*в.пред} = 10$; $r_t \approx 0$.

Решение. Индуктивное сопротивление генератора по формуле (2-36) $x_t = 0,16 \cdot 400^2 / 787 = 32,5$ мОм. Сопротивление кабеля по формуле (2-11) $x_k = 0,057 \cdot 100 = 5,7$ мОм; $r_k = 0,405 \cdot 100 = 40,5$ мОм. Результирующее сопротивление до точки КЗ $z_{\Sigma} = \sqrt{(32,5 + 5,7)^2 + (40,5 + 15)^2} = 67,4$ мОм. Ток КЗ при $t = 0$ по формуле (2-35) $I_{к0R}^{(3)} = 1,05 \cdot 400 / (\sqrt{3} \cdot 67,4) = 3,6$ кА.

Ток КЗ при $t = \infty$ определяем методом спрямленных характеристик. Внешнее сопротивление $z_{вн} = \sqrt{5,7^2 + (40,5 + 15)^2} = 55,8$ мОм. Сопротивление и ЭДС генератора по формулам (2-38) и (2-39) $x_{г\infty} = 400^2 / (0,63 \cdot 787) = 322,7$ мОм; $E_{г\infty} = 400 \cdot 10 = 4000$ В. Критическое сопротивление по формуле (2-37) $z_{кр} \approx 322,7 \cdot 400 / (4000 - 400) = 35,9$ мОм.

Поскольку $z_{вн} > z_{кр}$, то имеем режим нормального напряжения. Принимая в формуле (2-35) $E_t = U_{н.г}$, $x_t = 0$, имеем $I_{к\infty R}^{(3)} = 400 / (\sqrt{3} \cdot 55,8) = 4,14$ кА. Однако из-за шунтирующего влияния нагрузки значение тока КЗ будет несколько меньше, поэтому можно принять $I_{к\infty R}^{(3)} \approx I_{к0R}^{(3)} = 3,6$ кА.

Вычислим значения тока КЗ по методу расчетных кривых [35]. Расчетное сопротивление по формуле (2-34) $z_{*р} = 67,4 \cdot 787 / 400^2 = 0,33$. По кривым на рис. 2-7 находим относительные значения тока КЗ $I_{к*0} = 3,2$; $I_{к*\infty} = 2,25$. Токи КЗ по формуле (2-41) $I_{к0R}^{(3)} = 3,2 \cdot 1,138 = 3,6$ кА; $I_{к\infty R}^{(3)} = 2,25 \cdot 1,138 = 2,6$ кА, что значительно меньше рассчитанного ранее.

Очевидно, что для генератора, имеющего $I_{*в.пред} = 10$, определение установившегося тока КЗ по расчетным кривым на рис. 2-7 недопустимо, и ими пользоваться не следует. Если бы генератор имел, например, $I_{*в.пред} = 4$, то $E_{г\infty} = 1600$ В; $z_{кр} = 107,6$ мОм; $z_{вн} < z_{кр}$ (режим предельного возбуждения) и $I_{к\infty R}^{(3)} = \frac{1600}{\sqrt{3} \sqrt{(322,7 + 5,7)^2 + (40,5 + 15)^2}} = 2,77$ кА, что близко к значению, определенному по расчетным кривым рис. 2-7.

Расчет токов однофазных КЗ. При расчетах быстродействующих защит (дифференциальной защиты нулевой последовательности генератора, токовых отсеков) могут потребоваться значения сверхпереходных токов металлических однофазных КЗ. Ток однофазного металлического КЗ

$I_{к0}^{(1)}$ (в килоамперах) при питании от генератора напряжением 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью можно определить по выражениям, аналогичным (2-23) и (2-24):

$$I_{к0}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{г}^{(1)}}{3} + z_{пт}}, \quad (2-42)$$

$$z_{г}^{(1)} = \sqrt{(r_{1г} + r_{2г} + r_{0г})^2 + (x_{1г} + x_{2г} + x_{0г})^2}, \quad (2-43)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, В; $r_{1г}$, $x_{1г}$ – активное и индуктивное сопротивление генератора токам прямой последовательности, мОм; $r_{2г}$, $x_{2г}$ – то же обратной последовательности; $r_{0г}$, $x_{0г}$ – то же нулевой последовательности; $z_{пт}$ – сопротивление петли фаза-нуль от генератора до места КЗ, мОм.

Активное сопротивление фазы статора генератора с глухозаземленной нейтралью $r_{ст} = r_{1г} = r_{2г} = r_{0г}$.

Значение установившегося тока однофазного металлического КЗ непосредственно на зажимах генератора и при близких КЗ в сети 0,4 кВ $I_{к0}^{(1)}$ меньше сверхпереходного, однако эффект затухания токов во времени значительно меньше, чем при трехфазном КЗ. Это объясняется тем, что при однофазном КЗ размагничивающую реакцию якоря (статора) создает ток только одной фазы. Для примера на рис. 2-8 приведены заводские кривые изменения токов КЗ в функции времени на выводах генераторов типов

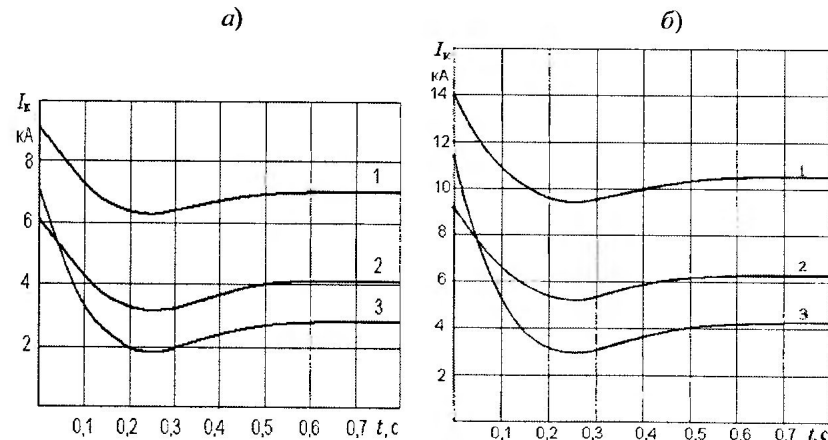


Рис. 2-8. Кривые изменения токов КЗ на выводах генераторов напряжением 400 В типов HC634G мощностью 640 кВт (а) и HC634K мощностью 888 кВт (б), 1 – однофазное, 2 – двухфазное, 3 – трехфазное КЗ

HC634G и HC634K производства фирмы STAMFORD. По кривым видно, что для этих генераторов кратность сверхпереходного тока по отношению к установившемуся для металлического однофазного КЗ составляет всего 1,3, что значительно меньше, чем для трехфазного (2,5) или двухфазного (1,5) КЗ.

Расчет установившихся токов однофазного КЗ можно выполнить, используя известное правило эквивалентности прямой последовательности [12] и кривые затухания токов на рис. 2-7 (см. пример 2-6).

В большинстве случаев для проверки чувствительности защит требуется рассчитать токи однофазных КЗ с учетом переходных сопротивлений $I_{кR}^{(1)}$. Такие КЗ характеризуются большой электрической удаленностью, поэтому при расчете значений этих токов КЗ можно не считаться с изменением тока во времени и принимать $I_{к0R}^{(1)} \approx I_{к0}^{(1)} \approx I_{кR}^{(1)}$. Ток однофазного КЗ (в килоамперах) с учетом переходных сопротивлений можно определить по выражениям, вывод которых аналогичен (2-31) и (2-32):

$$I_{кR}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{гR}^{(1)}}{3} + z_{пт}}, \quad (2-44)$$

$$z_{гR}^{(1)} = \sqrt{(r_{1г} + r_{2г} + r_{0г} + 3R_{п})^2 + (x_{1г} + x_{2г} + x_{0г})^2}. \quad (2-45)$$

Выражения (2-42) и (2-44) удобны тем, что позволяют использовать практические измерения и справочные данные по сопротивлению петли фаза-нуль.

Заметим, что выражения (2-42) и (2-44) из-за арифметического сложения сопротивлений, указанных в знаменателе, дают некоторую погрешность в сторону увеличения общего сопротивления цепи фаза-нуль, то есть в сторону запаса. Этот запас компенсирует сопротивления мелких участков сети, которые часто не учитывают в приближенных расчетах (небольшие участки шин от генератора до главного щита 0,4 кВ и автоматов отходящих линий, участки между автоматом, пускателем и тепловыми реле на вторичных сборках и т.п.).

Ток однофазного КЗ в сети 0,4 кВ при питании от генераторов напряжением 6 (10) кВ можно определить по выражениям (2-31) и (2-32), или по кривым на рис. П1-1, б, в, П1-5÷П1-10 приложения, при этом сопротивление системы заменяется сопротивлением генератора, определенным по формуле (2-36) и приведенным к напряжению 0,4 кВ.

Пример 2-6. Сравнить расчетные и экспериментальные значения токов однофазного КЗ на зажимах генератора типа HC634G производства фирмы STAMFORD, имеющего бесщеточную систему возбуждения.

Решение. Используя данные таблицы 2-17, вычислим индуктивное сопротивление генераторов токам прямой, обратной и нулевой последовательностей.

По формуле (2-36) $x_{1r} = 0,17 \cdot 400^2 / 800 = 34$ мОм; $x_{2r} = 0,2 \cdot 400^2 / 800 = 40$ мОм; $x_{0r} = 0,026 \cdot 400^2 / 800 = 5,2$ мОм; $r_{1r} = r_{2r} = r_{0r} = 3,7$ мОм.

Значение сверхпереходного тока металлического однофазного КЗ на зажимах генератора по формуле (2-42) составляет $I_k^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{z_r^{(1)}}{3} + z_{пт}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \frac{80}{3}} = 8,67$ кА.

$$I_k^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{z_r^{(1)}}{3} + z_{пт}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \frac{80}{3}} = 8,67 \text{ кА.}$$

здесь $z_{пт} = 0$ и $z_r^{(1)} = \sqrt{(3 \cdot 3,7)^2 + (34 + 40 + 5,2)^2} = 80$ мОм.

По заводским кривым (рис. 2-8) $I_k^{(1)} = 9,2$ кА, погрешность расчета – 6%, что вполне приемлемо для расчетов защит, поскольку она компенсируется запасами в коэффициентах чувствительности и возврата защиты. Эта погрешность объясняется тем, что при точных расчетах значение x_{2r} необходимо корректировать в соответствии с видом КЗ [36], для однофазного КЗ $x_2^{(1)} = \sqrt{(x_d'' + 0,5x_0) \cdot (x_q'' + 0,5x_0)} - 0,5x_0$. Для рассматриваемого генератора $x_q'' = 0,2$, $x_2^{(1)} = 0,184$ или 34,8 мОм, и точное значение $I_k^{(1)} = 9$ кА, что практически совпадает с заводскими данными.

Установившийся ток однофазного металлического КЗ определим с помощью расчетных кривых рис. 2-7 и упомянутого выше правила эквивалентности прямой последовательности. Согласно этому правилу расчетное сопротивление для однофазного КЗ определяется как сумма прямой, обратной и нулевой последовательностей цепи КЗ по выражению:

$$z_{*p} = \sqrt{(x_{1r} + x_{2r} + x_{0r})^2 + (r_{1r} + r_{2r} + r_{0r})^2} \cdot \frac{S_{н.г.}}{U_{cp}^2} = \sqrt{(34 + 40 + 5,2)^2 + (3 \cdot 3,7)^2} \cdot \frac{800}{400^2} = 0,4$$

а значение тока однофазного КЗ по выражению $I_{кз}^{(1)} = 3 \cdot I_{к*} \cdot I_{н.г} = 3 \cdot 2,1 \cdot 1156 = 7280$ А = 7,28 кА, где значение $I_{к*} = 2,1$ соответствует $z_{*p} = 0,4$ (см. рис. 2-7). Результат практически совпадает с заводскими данными, согласно которым $I_{кз}^{(1)} = 7,3$ кА (рис. 2-8).

Установившийся ток однофазного КЗ через электрическую дугу определим тем же методом, добавив составляющую переходных сопротивлений $R_{п} = 15$ мОм:

$$z_{*p} = \sqrt{(32 + 40 + 6)^2 + (3 \cdot 3,7 + 3 \cdot 15)^2} \cdot \frac{800}{400^2} = 0,48, \quad I_{кз}^{(1)} = 3 \cdot 1,9 \cdot 1156 = 6600 \text{ А} = 6,6 \text{ кА,}$$

где значение $I_{к*} = 1,9$ соответствует $z_{*p} = 0,48$. При этом имеем в виду, что значение 6,6 кА несколько занижено, поскольку кривые (рис. 2-7) учитывают кратность форсировки возбуждения около 3–4, а в нашем случае она равна 6,9 (см. также пример 2-3). Кроме того, эти расчетные кривые учитывают влияние нагрузки (в нашем случае она отсутствует), что также уменьшает расчетное значение тока КЗ.

Если рассчитывать значение тока однофазного КЗ на зажимах генератора с учетом

$$\text{переходных сопротивлений по формуле (2-44), то } I_{кР}^{(1)} = \frac{U_\phi}{\frac{z_{rR}^{(1)}}{3} + z_{пт}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \frac{97}{3}} = 7,14 \text{ кА.}$$

где $z_{пт} = 0$ и $z_{rR}^{(1)} = \sqrt{(3 \cdot 3,7 + 3 \cdot 15)^2 + (34 + 40 + 5,2)^2} = 97$ мОм. При учете вместо $x_{2r} = 40$ мОм уточненного значения $x_2^{(1)} = 34,8$ мОм получаем $I_{кР}^{(1)} = 7,3$ кА, что соответствует заводским данным. Очевидно, что переходные сопротивления практически не

вливают на значение установившегося тока однофазного КЗ, это объясняется подавляющим влиянием сопротивления генератора в установившемся режиме. При этом значения сверхпереходного и установившегося токов однофазного КЗ практически одинаковы.

Отметим, что расчет значений токов однофазного КЗ на зажимах генератора $I_{к0}^{(1)}$ и $I_{к0R}^{(1)}$ по выражению (2-22) дает тот же результат, поскольку при $z_{пт} = 0$, оно аналогично выражениям (2-42) и (2-44).

Пример 2-7. Определить ток однофазного КЗ на зажимах генератора и за кабелем для условий примера 2-5. Дополнительные параметры генератора: $x_2 = 0,171$ о.е.; $x_0 = 0,054$ о.е. Кабель имеет непроводящую оболочку.

Р е ш е н и е. Индуктивное сопротивление генератора токам прямой, обратной и нулевой последовательностей по формуле (2-36) $x_{1r} = 0,16 \cdot 400^2 / 787 = 32,5$ мОм; $x_{2r} = 0,171 \cdot 400^2 / 787 = 34,8$ мОм; $x_{0r} = 0,054 \cdot 400^2 / 787 = 11$ мОм; $r_{1r} = r_{2r} = r_{0r} = 2,18$ мОм. По формуле (2-45) имеем $z_{rR}^{(1)} = \sqrt{(3 \cdot 2,18 + 3 \cdot 15)^2 + (32,5 + 34,8 + 11)^2} = 93,7$ мОм. Сопротивление петли фаза-нуль кабеля по формуле (2-27) $z_{пт} = 1,13 \cdot 100 = 113$ мОм.

Ток однофазного КЗ на зажимах генератора с учетом переходных сопротивлений по формуле (2-44) $I_{кР}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \frac{93,7}{3}} = 7,4$ кА.

Для металлического КЗ ($R_{п} = 0$) $z_r^{(1)} = 78,6$ мОм и $I_k^{(1)} = 8,8$ кА.

Ток однофазного КЗ за кабелем с учетом переходных сопротивлений $I_{кР}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \left(\frac{93,7}{3} + 113 \right)} = 1,6$ кА и для металлического КЗ $I_{кР}^{(1)} = \frac{400}{\sqrt{3} \left(\frac{78,6}{3} + 113 \right)} = 1,66$ кА

почти одинаковы.

3. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ АППАРАТУРЫ, ЗАЩИТ И КАБЕЛЕЙ

В сети 0,4 кВ выбор коммутационной аппаратуры, защит и кабелей взаимосвязан. Для любого присоединения должны быть обеспечены:

1. Нормальный режим работы. Номинальные напряжения и токи аппаратов и допустимые токи кабелей должны соответствовать номинальному напряжению и длительному расчетному току нагрузки. Исполнение аппаратов и типы кабелей должны соответствовать условиям их эксплуатации.

2. Стойкость при КЗ. Аппараты и кабели должны быть стойкими при КЗ, а аппараты защиты – надежно отключать расчетные токи КЗ.

3. Защита от всех видов КЗ. Параметры аппаратов защиты и кабелей должны обеспечивать достаточную чувствительность защиты ко всем видам КЗ в конце защищаемой зоны. Рекомендуется применять автоматические выключатели с комбинированным расцепителем, элемент с зависимой характеристикой которого является резервной защитой. Должны обеспечиваться селективность (отключение только поврежденного участка), надеж-

10. ВЫБОР ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Предохранители широко применялись для защиты сетей напряжением 0,4 кВ до середины прошлого столетия. Их большое распространение объяснялось простотой и дешевизной этого аппарата защиты. В 60-х годах бурное развитие получает автоматизация технологических процессов, что потребовало более совершенной и надежной защиты, чем предохранители. Началось массовое внедрение автоматических выключателей. Техническое управление по эксплуатации энергосистем выпустило эксплуатационный циркуляр [41], в котором указано на недостатки предохранителей (они приведены в конце главы) и предписано заменить их автоматическими выключателями.

Тем не менее, в электрических сетях напряжением 0,4 кВ промышленных и сельскохозяйственных предприятий попрежнему во многих случаях используются предохранители.

Параметры предохранителей. Основные типы: ПР-2 – разборные, без наполнителя; ПН2 и ПП17 – разборные, с наполнителем (кварцевый песок); НПП – неразборные, с наполнителем (табл. 10.1). Разборные предохранители допускают замену плавких вставок. В зависимости от заказа предохранители ПН2 и ПП17 поставляются: без указателя срабатывания и свободного контакта вспомогательной цепи; с указателем срабатывания и

Таблица 10.1

Технические параметры предохранителей 380 В

Тип	Номинальный ток, А		Предельный отключаемый ток*, кА
	патрона предохранителя	плавкой вставки	
НПП2	60	6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 63	10
ПН2-100	100	31,5; 40; 50; 63; 80; 100	100
ПН2-250	250	80; 100; 125; 160; 200; 250	100
ПН2-400	400	200; 250; 315; 355; 400	40
ПН2-600	630	315; 400; 500; 630	25
ПП17	1000	500; 630; 800; 1000	120
ПР-2	15	6; 10; 15	0,8/8
	60	15; 20; 25; 35; 45; 60	1,8/4,5
	100	60; 80; 100	6/11
	200	100; 125; 160; 200	6/11
	350	200; 235; 260; 300; 350	6/13
	600	350; 430; 500; 600	13/23
	1000	600; 700; 850; 1000	15/20

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

закрывающим (или размыкающим) вспомогательным контактом; с указателем срабатывания. Защитные характеристики приведены на рис. 10-1 и 10-2.

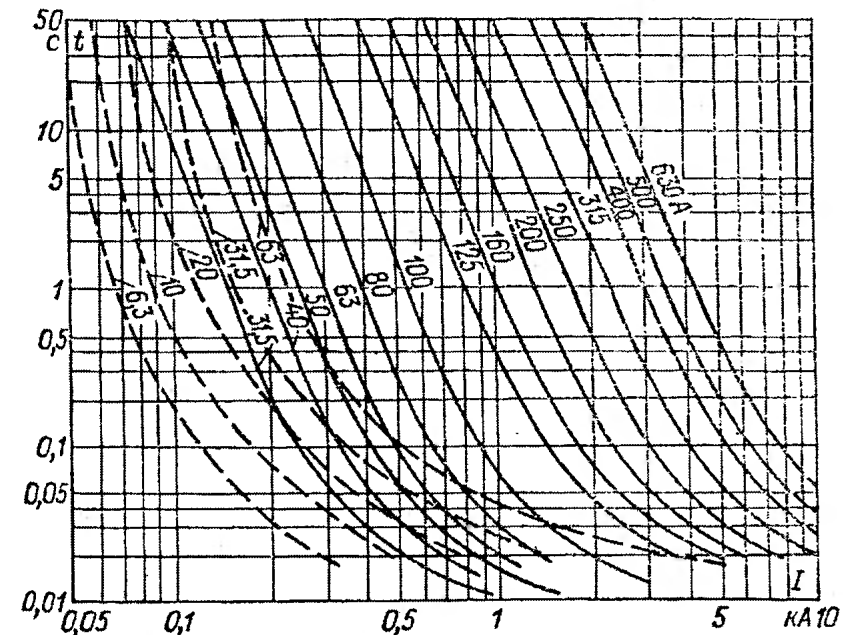


Рис. 10-1. Защитные характеристики предохранителей ПН2 (сплошные линии) и НПП (штриховые линии)

Условия выбора предохранителя. Номинальный ток отключения предохранителя должен быть не менее максимального тока КЗ в месте установки. Номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать номинальному напряжению сети.

Условия выбора плавких вставок. Номинальный ток плавкой вставки $I_{н.вс}$ выбирается наибольшим из следующих условий:

1) несрабатывания при максимальном рабочем токе защищаемого присоединения

$$I_{н.вс} \geq I_{раб.макс}; \quad (10-1)$$

2) при защите одиночного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором – несрабатывание при его пуске

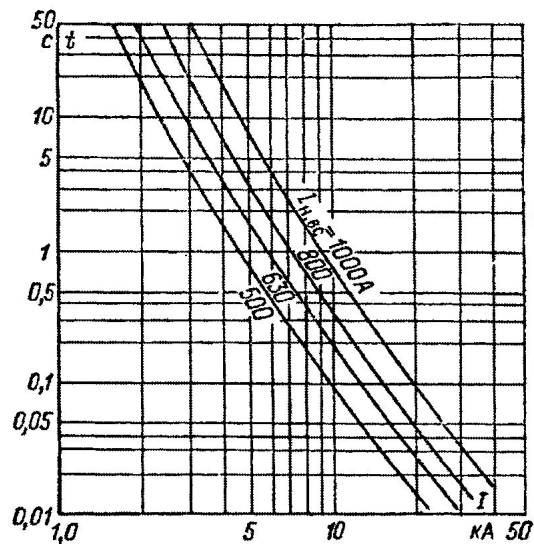


Рис. 10-2. Защитные характеристики предохранителей ПП17 в цепи переменного тока

$$I_{н.вс} \geq \frac{I_{пуск.дв}}{k}, \quad (10-2)$$

где k – коэффициент, при защите электродвигателей с короткозамкнутым ротором и легком пуске (длительностью 2–5 с) принимается равным 2,5; при тяжелом пуске (длительность около 10 с), а также при частых пусках (более 15 в час) или для особо ответственных электродвигателей, ложное отключение которых недопустимо, принимается равным 1,6–2; при защите двигателя с фазным ротором – 0,8–1;

3) при защите сборки дополнительно к условию (10-1) – несрабатывание при полной нагрузке сборки и пуске наиболее мощного двигателя (10-3), а также при самозапуске электродвигателей (10-4)

$$I_{н.вс} \geq \frac{1}{k} \left(\sum_1^{n-1} I_{раб.макс} + I_{пуск.макс} \right), \quad (10-3)$$

$$I_{н.вс} \geq I_{сцп} / k, \quad (10-4)$$

где k – то же, что в формуле (10-2); остальное – как в выражениях (7-1) и (7-2).

Выражения (10-2)–(10-4) пригодны для выбора обычных предохранителей ПР-2, ПН2, НПН, ПП17. Для инерционных предохранителей Е-27, СПО, в настоящее время почти не применяемых, в любом случае номи-

нальный ток плавкой вставки принимается равным $1 \div 1,25$ максимального рабочего тока присоединения.

Для предохранителей, устанавливаемых со стороны НН понижающего трансформатора, номинальный ток плавкой вставки выбирают по номинальному току трансформатора (ближайшее большее по шкале плавких вставок значение).

Если требуется защита кабеля от перегрузки, то учитывают условие (4-14).

Проверка селективности последовательно включенных предохранителей между собой и с автоматическими выключателями. При применении однотипных предохранителей селективными считаются те, которые различаются на две ступени по шкале номинальных токов плавких вставок. Для разнотипных предохранителей селективность проверяется сопоставлением их защитных характеристик с учетом 25%-ного, а в ответственных случаях – 50%-ного разброса по времени срабатывания. Зоны возможных характеристик, построенные с учетом этих разбросов, не должны накладываться или пересекаться в пределах токов от номинального до максимального возможного, или, по крайней мере, до наиболее вероятного тока КЗ $I_{к.ср}^{(3)}$ за нижестоящим предохранителем. На практике зоны не строят, а сопоставляют время плавления большего $t_б$ и меньшего $t_м$ предохранителей при одинаковых токах. Селективность обеспечивается, если выполняются условия: при учете 25%-ного разброса $t_б > 1,7t_м$; при учете 50%-ного разброса $t_б > 3t_м$. Известен также метод проверки селективности сопоставлением сечений плавких вставок [13, 42], он применяется редко и здесь не рассматривается.

Селективность предохранителей и автоматических выключателей проверяется путем сопоставления их защитных характеристик.

Проверка селективности между предохранителями и магнитным пускателем (контактором) данного присоединения. Селективность обеспечивается, если продолжительность перегорания плавкой вставки не превышает 0,15–0,2 с, что соответствует отношению $I_{к.мин}^{(2)} / I_{н.вс} \geq 10 \div 15$, где $I_{к.мин}^{(2)}$ – минимальный ток двухфазного КЗ за пускателем (контактором). Плавкая вставка с номинальным током 200 А является предельной по условиям селективности работы контактора и предохранителя, при большем токе вместо предохранителей рекомендуется устанавливать автоматический выключатель.

Проверка селективности защиты питающего трансформатора со стороны ВН и предохранителей со стороны НН. Выполняется сопоставлением их характеристик на карте селективности защит. Необходимо обеспечить селективность защиты со стороны ВН с предохранителями ввода 0,4 кВ или, по крайней мере, с отходящими линиями 0,4 кВ.

Если трансформатор со стороны ВН защищается предохранителями, то согласно директивным материалам их номинальный ток принимается равным $2I_{н.т.}$. При проверке селективности учитывается возможность 20%-ного разброса вставок ВН по току.

Если со стороны ВН трансформатора установлена релейная защита, то производится ее согласование с предохранителями 0,4 кВ.

Согласование защиты трансформатора, имеющей независимую характеристику, показано на рис. 10-3, а. По заводским данным строится защитная характеристика предохранителя 1, с которым производится согласование. С учетом разброса срабатывания по времени ее перестраивают в предельную характеристику 2. Для этого время срабатывания при каждом данном токе, определенное по заводской характеристике, увеличивают в 1,5 (или 1,25) раза. На график наносят выдержку времени защиты трансформатора $t_{с.з.}$. Находят значение $t_2 = t_{с.з.} - t_p - t_3$, где t_p — разброс реле времени защиты, для реле РВ со шкалами 1,3; 3,5 и 9 с принимают соответственно 0,06; 0,12 и 0,25 с; t_3 — время запаса, принимают равным 0,1–0,2 с. Через точку t_2 проводят горизонтальную прямую до пересечения с характеристикой 2. Точка пересечения определяет значение тока согласования I_2 . Ток срабатывания защиты находят по выражению $I_{с.з.} = 1,1I_2$ где коэффициент 1,1 учитывает разбросы токового реле, неточности его настройки и некоторый запас.

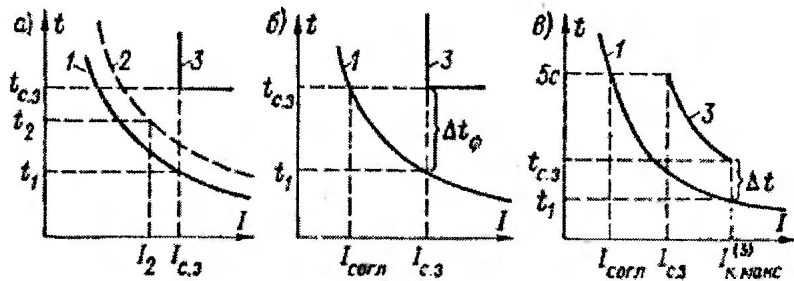


Рис. 10-3. Согласование релейной защиты трансформатора (кривая 3) с предохранителями 0,4 кВ (кривые 1 и 2)

Для приближенных расчетов согласование упрощают. Проводят горизонтальную линию через точку $t_{с.з.}$ до пересечения с заводской характеристикой предохранителя (рис. 10-3, б). Точка пересечения соответствует току согласования $I_{согл.}$. Ток срабатывания защиты трансформатора принимают $I_{с.з.} = (1,3 \div 1,4)I_{согл.}$. Далее проверяют, что фактическая степень селективности Δt_ϕ при токе срабатывания не менее расчетной

$\Delta t_{расч} = (0,25 \div 0,5)t_1 + t_p + t_3$, где t_1 — время срабатывания предохранителя при токе $I_{с.з.}$; $(0,25 \div 0,5)t_1$ — разброс по времени срабатывания предохранителя; t_p и t_3 — см. выше. Если полученная по карте селективности фактическая степень селективности меньше расчетной, то соответственно увеличивают либо ток, либо время срабатывания защиты трансформатора. Обычно для обеспечения селективности по времени достаточно убедиться, что Δt_ϕ не менее 0,4–0,5 с.

Характеристика защиты трансформатора задается параметрами $I_{с.з.}$, $t_{с.з.}$ при токе $2I_{с.з.}$.

Упрощенное согласование защиты трансформатора, имеющей зависимую характеристику (реле РТ-80, РТВ), показано на рис. 10-3, в. Для этих зависимых реле при выдержке времени в независимой части характеристики 0,5–1 с время срабатывания в начале защитной характеристики (при токе срабатывания) составляет около 5 с. Проводя через точку $t = 5$ с горизонтальную прямую до пересечения с заводской защитной характеристикой 1 предохранителя, получают значение тока согласования $I_{согл.}$. Ток срабатывания защиты находят по выражению $I_{с.з.} = (1,3 \div 1,4)I_{согл.}$. Построив из точки с координатами 5 с и полученного $I_{с.з.}$ характеристику защиты трансформатора, проверяют, что во всем диапазоне возможных токов КЗ за предохранителем 0,4 кВ вплоть до $I_{к.макс}^{(3)}$ (или, по крайней мере, до $I_{к.ср}^{(3)}$) между указанными характеристиками имеется степень селективности не менее 1–2 с в зависимой части и не менее 0,4–0,5 с в независимой части характеристики защиты трансформатора. Обычно защитная характеристика зависимых реле и характеристика предохранителей 0,4 кВ сближаются при увеличении тока, поэтому согласование по времени производят при максимальном расчетном токе КЗ за предохранителем. Для этого подбирают такую типовую характеристику реле, чтобы выдержка времени защиты при токе $I_{к.макс}^{(3)}$ была не менее $t_{с.з.} \geq t_1 + \Delta t$, где t_1 — время срабатывания предохранителя при токе $I_{к.макс}^{(3)}$; Δt — степень селективности, принимается не менее 0,4–0,5 с.

Характеристика защиты трансформатора задается параметрами $I_{с.з.}$, $t_{с.з.}$ при токе $I_{к.макс}^{(3)}$; $t_{с.з.} \geq 5$ с при токе $I_{с.з.}$. Все эти точки защитной характеристики проверяют при наладке.

Условие согласования является лишь одним из условий выбора уставок защиты трансформатора. О других условиях (отстройки от максимального рабочего тока с учетом самозапуска электродвигателей, несрабатывания при послеаварийных перегрузках, чувствительности) — см. работу [39].

При построении схемы сети 0,4 кВ полезно определить, какую максимальную вставку можно установить для защиты отходящих линий 0,4 кВ по условию селективности с защитой трансформатора. Если окажется, что

по условиям (10-1) – (10-4) требуется больший номинальный ток плавкой вставки, то следует пересмотреть первичную схему данного присоединения.

Пример 10-1. Для условий примера 5-1 определить предельное значение номинального тока плавкой вставки предохранителя ПН-2, при котором обеспечивается селективность с защитой трансформатора, имеющей независимую характеристику.

Решение. Задасмся временем срабатывания защиты трансформатора 0,5 с. В примере 5-1 определен ток срабатывания защиты трансформатора из условия чувствительности. Для трансформатора мощностью 1000 кВ·А, $u_k = 5,5\%$, Y/Y $I_{с.з.т}$ составит не более 8,45 кА. Поделив это значение на коэффициент надежности согласования 1,4, получим значение тока согласования 6 кА, при котором плавкая вставка должна расплавиться за время, не превышающее 0,5 с. Наносим точку с координатами 0,5 с и 6 кА на сетку характеристик предохранителей ПН-2. Все характеристики, расположенные левее этой точки или проходящие через нее, отвечают условию согласования, а расположенные правее – не отвечают. Таким образом устанавливаем, что условию согласования соответствует плавкая вставка не более 630 А. Проверим ступень селективности по времени при токе 8,45 кА: защита срабатывает за 0,5 с, вставка сгорит за 0,08 с, $\Delta t = 0,5 - 0,08 = 0,42$ – достаточно. Аналогично устанавливаем, что для трансформатора 1000 кВА, Δ/Y , $u_k = 5,5\%$ ток плавления должен составить не более 7 кА при времени плавления 0,5 с, что также соответствует плавкой вставке 630 А.

Проверка чувствительности предохранителей при КЗ. Согласно ПУЭ шестого издания [1] кратность минимального тока $I_{кР}$ при любом виде КЗ по отношению к номинальному току плавкой вставки должна быть:

$$\text{для невзрывоопасной среды: } k_{чР} = I_{кР} / I_{н.вс} \geq 3, \quad (10-5)$$

$$\text{для взрывоопасной среды: } k_{чР} = I_{кР} / I_{н.вс} \geq 4. \quad (10-6)$$

При питании от энергосистемы минимальным током КЗ в установках с глухозаземленной нейтралью в большинстве случаев является ток однофазного КЗ, в установках с изолированной нейтралью – ток двухфазного КЗ. При питании от маломощных генераторов в зависимости от удаленности точки КЗ минимальным может оказаться ток однофазного, двухфазного или установившегося трехфазного КЗ.

Для новых и реконструируемых установок следует учитывать требования недавно изданной главы 1.7 ПУЭ седьмого издания [2], введенной в действие с 1 января 2003 года. Согласно этим требованиям время отключения однофазных КЗ в цепях питания индивидуальных электроприемников не должно превышать 0,4 с. В цепях питания распределительных щитов и сборок время отключения однофазных КЗ не должно превышать 5 с. Для стационарных электроприемников, питающихся от распределительных щитов, допускается увеличение времени отключения до 5 с, если выполняется условие (6-18).

Достоинства и недостатки предохранителей. К достоинствам пре-

дохраниелей относится их простота и дешевизна. Наряду с этим они имеют следующие существенные недостатки, ограничивающие область их применения:

- 1) плавкие вставки стареют с течением времени, после чего возможны ложные сгорания вставок в пусковых режимах, т.е. защита ненадежна;
- 2) при однофазных КЗ плавкая вставка отключает только одну фазу, что приводит к опасному режиму работы двигателей на двух фазах. Это может вызвать остановку двигателя. Если он все же продолжает вращаться, то работает с повышенным в 1,5–2 раза током по сравнению с номинальным;
- 3) плавкая вставка – однократного действия. После срабатывания предохранителя ее необходимо заменять;
- 4) в условиях эксплуатации часто вместо калиброванных вставок применяют другие или проволоку, что нарушает защиту сети;
- 5) плавкие предохранители не защищают двигатели от перегрузок, требуется защита с помощью тепловых реле, действующих на отключение магнитных пускателей.

11. ВЫБОР УСТАВОК ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ 0,4 кВ

Релейная защита генераторов 0,4 кВ. Рассмотрим схемы защиты генератора, предназначенного, например, для аварийного электроснабжения особо ответственных электроприемников КТП.

Вариант 1. Генератор имеет выводы обмоток статора со стороны нуля. Для отключения повреждений внутри генератора трансформаторы тока защиты включают со стороны нулевых выводов [34]. Схема защиты приведена на рис. 11-1. В качестве источника оперативного тока используют аккумуляторную батарею, установленную для питания автоматики привода двигателя (дизеля).

Состав защиты: максимальная токовая (реле $KA1$, $KA2$), от однофазных КЗ ($KA3$), от перегрузки ($KA4$), все токовые реле типа РТ-40.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты генератора выбирают по следующим условиям:

1. Несрабатывание при максимальном рабочем токе (принимается равным номинальному току генератора $I_{н.г}$) с учетом его увеличения при самозапуске электродвигателей после отключения внешнего КЗ

$$I_{с.з} = \frac{k_n}{k_b} k_{сп} I_{н.г}, \quad (11-1)$$

где k_n и k_b – коэффициенты надежности и возврата, для реле РТ-40 принимаются соответственно 1,2 и 0,8;

49. Беляев А.В., Эдлин М.А. Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кВ// Электрические станции. 2002. № 12. С. 51–55.
50. Belyaev A.V. and Edlin M.A.. Long-range backup of protection and breaker failures in 0.4-kV grids// Power Technology and Engineering. Vol. 36. 2002. No. 6. P. 373–377.
51. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
52. Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 136 с.
53. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
54. Гельфанд Я.С., Голубев М.Л., Царев М.И. Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе. – М.: Энергия, 1973. – 279 с.
55. И.И. Байтер, Н.А. Богданова. Релейная защита и автоматика питающих элементов собственных нужд тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 113 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Схемы сетей 0,4 кв и их особенности	6
2. Расчеты токов короткого замыкания в сетях 0,4 кв	11
2.1. Цель и особенности расчетов.....	11
2.2. Учет токоограничивающего действия электрической дуги.....	13
2.3. Сопротивления элементов схемы замещения	28
2.4. Расчет токов междуфазного КЗ при питании от энергосистемы.....	33
2.5. Расчет токов однофазного КЗ при питании от энергосистемы	38
2.6. Определение токов КЗ по расчетным кривым	46
2.7. Расчет токов КЗ при питании от генераторов собственных электростанций.....	47
3. Требования к выбору аппаратуры, защит и кабелей	59
4. Выбор сечений и длин кабелей.....	61
5. Выбор автоматических выключателей	69
6. Выбор уставок автоматических выключателей электродвигателей	106
7. Выбор уставок автоматических выключателей питания сборок и щитов.....	114
8. Особенности расчета и выполнения защиты на вводных выключателях КТП	122
9. Выносная релейная защита электродвигателей, щитов и сборок	130
10. Выбор плавких предохранителей	138
11. Выбор уставок защиты генераторов 0,4 кв	145
12. Самозапуск электродвигателей 0,4 кв.....	154
13. Аварийное электроснабжение на напряжении 0,4 кв	168
14. Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кв	177
15. Блокировка максимальной токовой защиты трансформаторов 6(10)/0,4 кв и аварийных дизель-генераторов при самозапуске электродвигателей	184
16. Расчет уставок блока БМРЗ-0,4	188
17. Некоторые особенности защиты трансформаторов 6(10)/0,4 кв	201
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Расчетные кривые для нахождения токов КЗ в сети 0,4 кв	213
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Расчетные кривые изменения токов КЗ для генераторов малой мощности	247
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	249

Об авторе



Анатолий Владимирович Беляев – доцент кафедры «Релейная защита и автоматика электрических станций, сетей и энергосистем» Петербургского энергетического института повышения квалификации Минпромэнерго РФ (ПЭИПК), кандидат технических наук. Работает в ДООАО «Оргэнергогаз» (г. Санкт-Петербург) в должности начальника отдела РЗА и АСУ-Э. Автор более 50 печатных изданий по вопросам РЗА и АСУ-Э, в том числе книг «Вторичная коммутация в распре-

делительных устройствах, оснащенных цифровыми РЗА», «Противоаварийная автоматика в узлах нагрузки с мощными синхронными электродвигателями», «Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ».

Учебное издание

Беляев Анатолий Владимирович

Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ

Учебное пособие

Редактор Е.Б. Никанорова

Объем 9 печ. л.. Тираж 500 экз.

Заказ №

ПЭИПК, 196135, Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23

Отпечатано в типографии издательства «Сударыня»
196128, Санкт-Петербург, Московский пр., 149 В, офис 412
Тел.: (812) 388-93-41