





ПОБЕДИТЕЛЬ
Всероссийского конкурса
рукописей учебной,
научно-технической
и справочной литературы
по энергетике 2017 года

*Книга издана
при поддержке
Публичного акционерного общества
«Российские сети»*

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ И ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением
в системе высшего образования по укрупненным группам
специальностей и направлений подготовки
13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика»
в качестве учебного пособия для реализации
основных образовательных программ высшего образования
по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»

Под редакцией проф. И.П. Крючкова
и проф. В.А. Старшинова

Москва
Издательство МЭИ
2018

УДК 621.316
ББК 31.37-01
К 687

Рецензенты: Т.А. Стогний, канд. техн. наук, начальник отдела внешних сетей и сооружений ОАО «Институт Теплоэлектропроект»;
А.А. Коновалов, зам. начальника департамента подстанций ПАО «ФСК ЕЭС»;
А.М. Поляков, канд. техн. наук, доц. НИУ «МЭИ»

Авторы: И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, А.П. Долин,
М.В. Пираторов

К 687 Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учеб. пособие / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. проф. И.П. Крючкова, проф. В.А. Старшинова. – М.: Издательство МЭИ. – 440 с.

ISBN 978-5-7046-1937-6

Рассмотрены методы расчета коротких замыканий, простых и сложных несимметричных режимов в электроэнергетических системах, термического и электродинамического воздействия токов короткого замыкания на проводники и электрические аппараты, методы и способы ограничения токов короткого замыкания, особенности расчетов коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1 кВ. Приведены особенности расчетов жесткой ошиновки открытых распределительных устройств. Предложен комплекс программ для расчетов коротких замыканий с помощью компьютера.

Предназначено в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений направления подготовки 13.03.02 – «Электро- и теплоэнергетика» и может быть использовано специалистами электроэнергетиками.

УДК 621.316
ББК 31.37-01

ISBN 978-5-7046-1937-6

© Коллектив авторов, 2018
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2018
© ПАО «Россети», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие | 12 |
| Глава первая | |
| ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ | 13 |
| 1.1. Общие положения..... | 13 |
| 1.2. Термины и определения..... | 15 |
| 1.3. Основные допущения при расчетах коротких замыканий..... | 21 |
| Глава вторая | |
| РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ | 23 |
| 2.1. Назначение расчетов коротких замыканий и предъявляемые к ним требования | 23 |
| 2.2. Понятия о расчетных условиях | 24 |
| 2.3. Расчетная схема электроустановки | 24 |
| 2.4. Расчетный вид короткого замыкания | 24 |
| 2.5. Расчетная точка короткого замыкания | 25 |
| 2.6. Расчетная продолжительность короткого замыкания.... | 26 |
| Глава третья | |
| ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ | 27 |
| 3.1. Параметры наиболее удаленной от расчетной точки короткого замыкания части электроэнергетической системы..... | 27 |
| 3.2. Параметры синхронных машин | 27 |
| 3.3. Параметры асинхронных двигателей | 29 |
| 3.4. Параметры силовых трансформаторов и автотрансформаторов..... | 29 |
| 3.5. Параметры токоограничивающих реакторов..... | 30 |
| 3.6. Исходные параметры воздушных линий электропередачи..... | 30 |
| 3.7. Исходные параметры кабельных линий | 31 |
| 3.8. Исходные параметры токопроводов и шинопроводов... | 31 |
| Глава четвертая | |
| СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ | 32 |

| | |
|--|----|
| 4.1. Расчетная схема и схема замещения..... | 32 |
| 4.2. Система единиц, используемая при составлении схем замещения..... | 33 |
| 4.3. Виды схем замещения..... | 36 |
| 4.4. Составление схем замещения с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов расчетной схемы к одной ступени напряжения..... | 38 |
| 4.5. Составление схем замещения с сохранением трансформаторных связей..... | 44 |
| 4.6. Преобразование схем замещения..... | 45 |

Глава пятая

РАСЧЕТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ

| | |
|---|----|
| СВЫШЕ 1кВ..... | 48 |
| 5.1. Общие положения..... | 48 |
| 5.2. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания при удаленных коротких замыканиях (от электроэнергетической системы)... | 49 |
| 5.3. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных машин..... | 51 |
| 5.4. Влияние электродвигателей и нагрузок в начальный момент короткого замыкания..... | 60 |
| 5.5. Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания в произвольной схеме..... | 62 |
| 5.6. Способы определения ударного коэффициента и соответственно ударного тока короткого замыкания..... | 66 |
| 5.7. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени аналитическим способом..... | 68 |
| 5.8. Практические методы расчета периодической составляющей тока короткого замыкания..... | 70 |

Глава шестая

МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....

| | |
|---|----|
| 6.1. Методы, используемые при расчетах несимметричных режимов..... | 80 |
| 6.2. Образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронных машин..... | 83 |

Глава седьмая

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ.....

| | |
|---|----|
| 7.1. Постановка задачи..... | 86 |
| 7.2. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей..... | 86 |
| 7.3. Схемы замещения нулевой последовательности..... | 89 |
| 7.4. Схемы замещения различных последовательностей при поперечной и продольной несимметриях в одном и том же месте..... | 93 |

Глава восьмая

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ.....

| | |
|--|-----|
| 8.1. Исходные положения..... | 97 |
| 8.2. Двухфазное короткое замыкание..... | 98 |
| 8.3. Однофазное короткое замыкание..... | 102 |
| 8.4. Двухфазное короткое замыкание на землю..... | 106 |
| 8.5. Правило эквивалентности тока прямой последовательности..... | 110 |
| 8.6. Расчет токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях разными методами..... | 113 |
| 8.7. Расчет тока в произвольной ветви и напряжения в произвольном узле при несимметричных коротких замыканиях..... | 119 |
| 8.8. Соотношение токов короткого замыкания разных видов при замыканиях в одной и той же точке..... | 123 |

Глава девятая

РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ.....

| | |
|---|-----|
| 9.1. Общие замечания..... | 125 |
| 9.2. Обрыв одной фазы..... | 127 |
| 9.3. Обрыв двух фаз..... | 133 |
| 9.4. Включение в одну из фаз элемента, обладающего сопротивлением..... | 138 |
| 9.5. Включение в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением..... | 142 |
| 9.6. Особенности расчета токов и напряжений при однократной продольной несимметрии..... | 147 |

Глава десятая

| | |
|--|------------|
| РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ..... | 150 |
| 10.1. Общие замечания..... | 150 |
| 10.2. Использование комплексных схем замещения..... | 151 |
| 10.3. Двойное несимметричное повреждение, вызванное обрывом провода одной фазы воздушной линии элект- ропередачи и однофазным коротким замыканием на землю той же фазы..... | 154 |
| 10.4. Двойное несимметричное повреждение, вызванное обрывом провода одной фазы воздушной линии элект- ропередачи и однофазным коротким замыканием на землю другой фазы..... | 159 |
| 10.5. Расчет двойных коротких замыканий на землю..... | 165 |
| 10.6. Расчет несимметрии при обрыве проводника одной фазы и одновременном однофазном коротком замыка- нии с использованием производной схемы прямой по- следовательности..... | 176 |

Глава одиннадцатая

| | |
|--|------------|
| СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТО- КАМ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ... | 183 |
| 11.1. Влияние конструктивных особенностей различных элементов электроэнергетической системы на их со- противления обратной и нулевой последовательностей | 183 |
| 11.2. Синхронные машины | 184 |
| 11.3. Асинхронные электродвигатели..... | 190 |
| 11.4. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы..... | 191 |
| 11.5. Факторы, определяющие полное сопротивление пря- мой (обратной) и нулевой последовательностей воз- душных линий электропередачи..... | 197 |
| 11.6. Сопротивление нулевой последовательности одно- цепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов | 203 |
| 11.7. Сопротивление нулевой последовательности одно- цепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами..... | 205 |
| 11.8. Сопротивление нулевой последовательности двухцеп- ной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов..... | 208 |

| | |
|--|-----|
| 11.9. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами..... | 211 |
| 11.10. Сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей..... | 214 |

Глава двенадцатая

| | |
|--|------------|
| ТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПРОВОДНИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ..... | 217 |
| 12.1. Способы оценки термического воздействия токов короткого замыкания..... | 217 |
| 12.2. Методы расчета интеграла Джоуля и термически эквивалентного тока короткого замыкания..... | 218 |
| 12.3. Термическое воздействие токов короткого замыкания на проводники..... | 229 |
| 12.4. Проверка проводников на термическую стойкость..... | 231 |
| 12.5. Проверка силовых кабелей на невозгораемость при коротком замыкании..... | 236 |
| 12.6. Проверка электрических аппаратов на термическую стойкость..... | 237 |

Глава тринадцатая

| | |
|---|------------|
| ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПРОВОДНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ..... | 239 |
| 13.1 Силы взаимодействия проводников с токами..... | 239 |
| 13.2. Электродинамические нагрузки в трехфазной шинной линии при двухфазном коротком замыкании..... | 245 |
| 13.3. Электродинамические нагрузки в трехфазной шинной линии при трехфазном коротком замыкании..... | 248 |
| 13.4. Электродинамические нагрузки в шинной линии с проводниками, расположенными по вершинам треугольника, при трехфазном коротком замыкании..... | 251 |
| 13.5. Условия электродинамической стойкости и расчетные схемы шинных конструкций..... | 253 |
| 13.6. Расчет шинных конструкций на электродинамическую стойкость..... | 260 |
| 13.7. Проверка гибких проводников на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях..... | 269 |

| | |
|--|------------|
| Глава четырнадцатая | |
| МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ..... | 277 |
| 14.1. Постановка задачи..... | 277 |
| 14.2. Классификация методов и средств ограничения токов короткого замыкания..... | 278 |
| 14.3. Схемные решения..... | 280 |
| 14.4. Деление сети..... | 282 |
| 14.5. Общие требования к токоограничивающим устройствам..... | 286 |
| 14.6. Токоограничивающие реакторы..... | 287 |
| 14.7. Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения..... | 291 |
| 14.8. Вставки постоянного тока и переменного тока промышленной частоты..... | 292 |
| 14.9. Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками..... | 294 |
| 14.10. Ограничение токов короткого замыкания на землю... | 296 |
| | |
| Глава пятнадцатая | |
| ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ..... | 299 |
| 15.1. Расчетные условия для выбора электрооборудования..... | 299 |
| 15.2. Выбор электрических аппаратов и проводников по условиям рабочих продолжительных режимов..... | 303 |
| 15.3. Проверка коммутационных электрических аппаратов на коммутационную способность..... | 306 |
| 15.4. Расчет переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении коротких замыканий в трехфазных эффективно заземленных сетях..... | 307 |
| 15.5. Условия выбора и проверки проводников и электрических аппаратов разных видов..... | 316 |
| | |
| Глава шестнадцатая | |
| ВЫБОР И ПРОВЕРКА ШИННЫХ КОНСТРУКЦИЙ..... | 320 |
| 16.1. Общие положения..... | 320 |
| 16.2. Выбор изоляторов..... | 321 |
| 16.3. Выбор изоляционных расстояний..... | 323 |
| 16.4. Проверка ошиновки по условиям короны..... | 325 |
| 16.5. Проверка элементов ошиновки по допустимым температурным деформациям шин..... | 326 |
| 16.6. Выбор шин по нагреву в рабочих режимах..... | 329 |
| 16.7. Проверка шин по допустимым прогибам..... | 337 |
| 16.8. Расчет шин на ветровую стойкость..... | 340 |

| | |
|---|------------|
| 16.9. Проверка шин по условиям ветрового резонанса..... | 348 |
| 16.10. Проверка стойкости (прочности) изоляторов и шин при сочетании внешних нагрузок..... | 351 |
| Глава семнадцатая | |
| КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ | |
| НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ..... | 353 |
| 17.1. Основные факторы, влияющие на процесс короткого замыкания..... | 353 |
| 17.2. Параметры элементов электроустановок переменного тока..... | 359 |
| 17.3. Расчет трехфазных коротких замыканий..... | 384 |
| 17.4. Расчет токов несимметричных коротких замыканий... .. | 389 |
| 17.5. Параметры элементов электроустановок постоянного тока..... | 390 |
| 17.6. Короткие замыкания в электроустановках с полупро- водниковыми преобразователями..... | 403 |
| Глава восемнадцатая | |
| РАСЧЕТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ.... | |
| 18.1. Общие положения..... | 406 |
| 18.2. Комплексный учет различных факторов, влияющих на ток короткого замыкания..... | 407 |
| 18.3. Программы <i>GuFaults</i> , <i>GuExpert</i> , <i>GuDCSets</i> и <i>GuTestAC</i> . | 418 |
| 18.4. База справочных данных..... | 430 |
| 18.5. Защита от ошибок при вводе исходных данных..... | 434 |
| 18.6. Типовые задачи расчета коротких замыканий | 435 |
| Список литературы..... | 439 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга посвящена изложению методов расчета коротких замыканий и различных несимметричных режимов, в том числе и сложных, представляющих собой различные комбинации поперечной и продольной несимметрий. Поскольку короткие замыкания сопровождаются увеличением термического и электродинамического воздействия токов на проводники и токоведущие части электрических аппаратов, то этим вопросам в книге уделено особое внимание. Необходимо отметить, что в последнее время наблюдается тенденция применения жесткой ошиновки для распределительных устройств, расчетам которой посвящена отдельная глава. Также отдельная глава посвящена анализу методов и средств ограничения токов короткого замыкания. Подробно описаны особенности расчетов коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1 кВ и в установках постоянного тока. Одна из глав посвящена описанию методов расчетов коротких замыканий на компьютере с представлением комплекса программ, разработанного на кафедре электрических станций Национального исследовательского университета (МЭИ).

При подготовке рукописи авторами учтен их многолетний опыт чтения лекций и проведения практических занятий по курсам «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» и «Электрическая часть электростанций и подстанций», опыт применения разработанных с участием авторов государственных стандартов, посвященных расчету коротких замыканий и термического и электродинамического воздействия токов короткого замыкания, а также руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Общие положения

Надежность работы энергосистем в значительной степени зависит от характеристик коротких замыканий и уровней токов короткого замыкания в электрических сетях.

Короткие замыкания являются основными причинами повреждения электроустановок и электрооборудования. Анализ статистических данных энергосистем показывает, что от 50 до 65 % отказов электроустановок, от 60 до 80 % отказов электрооборудования и от 65 до 75 % пожаров в электроустановках происходят из-за коротких замыканий, ущерб от которых составляет сотни миллионов рублей в год и более.

Как правило, уровни токов короткого замыкания в сети возрастают с увеличением мощности энергосистемы, плотности генерирующих мощностей и плотности соответствующей сети. Наибольшее число отказов от воздействия токов короткого замыкания приходится на электрооборудование. Но отказ электрооборудования из-за цепочечного развития аварий может привести даже к системным авариям. Поэтому роль коротких замыканий в возникновении аварийных ситуаций весьма значительна. Важным фактором является и частота возникновения коротких замыканий разного вида. По усредненным данным для трехфазных, двухфазных и двухфазных коротких замыканий на землю она составляет примерно по 2 %, а для однофазных коротких замыканий – 94 %. Вместе с тем относительная частота коротких замыканий разных видов на электростанциях, подстанциях и линиях электропередачи неодинакова. Так на электростанциях доля трехфазных и двухфазных коротких замыканий на землю более значительна, чем на подстанциях и линиях электропередачи.

Последствия коротких замыканий разнообразны – это механическое и термическое повреждения электрооборудования, снижение уровня напряжения в сети, ведущее к уменьшению вращающего момента электродвигателей и к выпадению из синхронизма отдельных генераторов электростанций, возгорание электроустановок и т.п.

Расчеты коротких замыканий необходимы для выбора главных схем электростанций и подстанций, проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики, выбора и проверки приводников и электрооборудования и т.д.

Приоритетной основой надежной работы электрооборудования является строгое соблюдение расчетных условий при его выборе, под которыми понимаются наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться выбираемое электрооборудование при его практической эксплуатации. Расчетные условия, как комплекс требований к электрооборудованию, подлежит тщательному научному обоснованию, а также анализу и корректировке по итогам эксплуатации электрооборудования с учетом вероятностных характеристик параметров режима. В расчетных условиях должны учитываться изменения структуры сети и параметров основных элементов электроустановок, а также характеристики срабатывания ресурса электрооборудования.

При выборе электрооборудования необходимо учитывать наличие многофункциональных связей между его техническими, экономическими, экологическими и другими характеристиками; между детерминированными параметрами электрооборудования и непрерывными, но случайными (вероятностными) параметрами энергосистем. Выбор электрооборудования в этих условиях должен вестись с учетом системного принципа и системного подхода. Для электроустановок характерны четыре режима работы: нормальный, аварийный, послеварийный и ремонтный, причем аварийный режим является кратковременным режимом, а остальные – продолжительными режимами. Учитывая специфику работы электрооборудования, его выбор целесообразно производить в два этапа:

- предварительный выбор электрооборудования по параметрам продолжительных режимов (уровень изоляции, нагрев продолжительным током, экономичность), включая режимы допустимых перегрузок;

- проверка предварительно выбранного электрооборудования по условиям кратковременных режимов (сюда относятся короткие замыкания, неполнофазные режимы, сложные виды повреждений), определяющим из которых является режим расчетного короткого замыкания.

По режиму короткого замыкания электрооборудование проверяется на электродинамическую и термическую стойкость, невозгораемость (кабели), а коммутационные аппараты – также на коммутационную способность и износостойкость. При этом предварительно нужно правильно определить расчетные условия короткого замыка-

ния и параметры электрооборудования, выбрать модель расчета токов короткого замыкания и оценить, при необходимости, методы и средства ограничения токов короткого замыкания.

1.2. Термины и определения

В терминологии присутствуют три основных звена: понятие, термин и определение.

Понятие – это образное описание основных характеристик предмета, объекта, явления, достаточное для понимания его сути; *термин* – наименование предмета, объекта, явления; *определение* – краткое описание основных черт предмета, объекта, явления. Основной терминологии являются понятия, а термины и определения являются необходимыми для практической деятельности рабочими инструментами, без которых специалисты нормально не могут общаться.

Ниже используются следующие термины и определения.

▸ *Режим короткого замыкания* – режим работы электроустановки при наличии в ней короткого замыкания.

▸ *Короткое замыкание в электроустановке* – всякое случайное или преднамеренное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землей, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения и связанных с источником энергии, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

▸ *Короткое замыкание на землю в электроустановке* – короткое замыкание в электроустановке, обусловленное соединением с землей какого-либо ее элемента.

▸ *Однофазное короткое замыкание на землю* – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяется только одна фаза.

▸ *Двухфазное короткое замыкание* – короткое замыкание между двумя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

▸ *Двухфазное короткое замыкание на землю* – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтральными силовых элементов, при котором с землей соединяются две фазы.

▸ *Двойное короткое замыкание на землю* – короткое замыкание на землю двух разных фаз в трехфазной электроэнергетической системе в разных, но электрически связанных между собой точках.

‣ *Трехфазное короткое замыкание* – короткое замыкание между тремя фазами в трехфазной электроэнергетической системе.

‣ *Трехфазное короткое замыкание на землю* – короткое замыкание на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленными нейтральными силовыми элементами, при котором с землей соединяются три фазы.

‣ *Повторное короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке при автоматическом повторном включении коммутационного электрического аппарата поврежденной цепи.

‣ *Изменяющееся короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке с переходом одного вида короткого замыкания в другой.

‣ *Устойчивое короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, условия возникновения которого сохраняются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.

‣ *Неустойчивое короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, условия возникновения которого самоликвидируются во время бестоковой паузы коммутационного электрического аппарата.

‣ *Симметричное короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, при котором все ее фазы находятся в одинаковых условиях.

‣ *Несимметричное короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, при котором одна из ее фаз находится в условиях, отличных от условий других фаз.

‣ *Удаленное короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока источника энергии в начальный и произвольный моменты времени практически одинаковы.

‣ *Близкое короткое замыкание* – короткое замыкание в электроустановке, при котором амплитуды периодической составляющей тока данного источника энергии в начальный и произвольный моменты времени существенно отличаются друг от друга.

‣ *Предшествующий режим короткого замыкания* – режим работы электроустановки непосредственно перед моментом возникновения короткого замыкания.

‣ *Установившийся режим короткого замыкания* – режим короткого замыкания электроустановки, наступающий после затухания во всех цепях свободных токов и прекращения изменения напряжения возбудителей синхронных машин под воздействием устройств автоматических регуляторов возбуждения.

‣ *Свободная составляющая тока короткого замыкания* – составляющая тока короткого замыкания, определяемая только началь-

ными условиями короткого замыкания, структурой электрической сети и параметрами ее элементов.

‣ *Принужденная составляющая тока короткого замыкания* – составляющая тока короткого замыкания, равная разности между током короткого замыкания и его свободной составляющей.

‣ *Апериодическая составляющая тока короткого замыкания* – свободная составляющая тока короткого замыкания, изменяющаяся во времени без перемены знака.

‣ *Периодическая составляющая тока короткого замыкания рабочей частоты* – составляющая тока короткого замыкания, изменяющаяся по периодическому закону с рабочей частотой.

‣ *Мгновенное значение тока короткого замыкания* – значение тока короткого замыкания в рассматриваемый момент времени.

‣ *Действующее значение тока короткого замыкания* – среднее квадратичное значение тока короткого замыкания за период рабочей частоты, середина которого есть рассматриваемый момент времени.

‣ *Действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания* – среднее квадратичное значение периодической составляющей тока короткого замыкания за период рабочей частоты, середина которого есть рассматриваемый момент времени.

‣ *Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания* – условная величина, равная двойной амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени, уменьшенной в $2\sqrt{2}$ раз.

‣ *Начальное значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания* – значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени.

‣ *Установившийся ток короткого замыкания* – значение тока короткого замыкания после окончания переходного процесса, характеризуемого затуханием всех свободных составляющих этого тока и прекращением изменения тока от воздействия устройств автоматического регулирования возбуждения источников энергии.

‣ *Ударный ток короткого замыкания* – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания в одной из фаз трехфазной электрической цепи, которое имеет место, когда короткое замыкание происходит в момент прохождения напряжения этой фазы через нулевое значение, а до возникновения короткого замыкания ток в цепи носил емкостной характер или отсутствовал.

‣ *Ударный коэффициент тока короткого замыкания* – отношение ударного тока короткого замыкания к амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания рабочей частоты в начальный момент времени.

‣ *Отключаемый ток короткого замыкания* – ток короткого замыкания электрической цепи в момент начала расхождения дугогасительных контактов ее коммутационного электрического аппарата.

‣ *Действующее значение периодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания* – условная величина, равная двойной амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного электрического аппарата, уменьшенной в $2\sqrt{2}$ раз.

‣ *Апериодическая составляющая отключаемого тока короткого замыкания* – значение аperiодической составляющей тока короткого замыкания в момент начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного электрического аппарата.

‣ *Амплитудное значение отключаемого тока короткого замыкания* – условная величина, равная арифметической сумме действующего значения периодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания, увеличенного в $\sqrt{2}$ раз, и аperiодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания.

‣ *Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы токов короткого замыкания* – три симметричные трехфазные системы токов короткого замыкания рабочей частоты прямой, обратной и нулевой последовательностей, на которые данная несимметричная трехфазная система токов короткого замыкания может быть разложена.

‣ *Ток короткого замыкания прямой последовательности* – один из токов симметричной трехфазной системы токов короткого замыкания прямого следования фаз.

‣ *Ток короткого замыкания обратной последовательности* – один из токов симметричной трехфазной системы токов короткого замыкания обратного следования фаз.

‣ *Ток короткого замыкания нулевой последовательности* – один из токов симметричной неуравновешенной трехфазной системы токов короткого замыкания нулевого следования фаз.

‣ *Ожидаемый ток короткого замыкания* – ток короткого замыкания, который был бы в электрической цепи электроустановки при отсутствии действия установленного в ней токоограничивающего коммутационного электрического аппарата.

‣ *Пропускаемый ток короткого замыкания* – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания в электрической цепи электроустановки с учетом действия токоограничивающего коммутационного электрического аппарата.

‣ *Сквозной ток короткого замыкания* – ток, проходящий через включенный коммутационный электрический аппарат при внешнем коротком замыкании.

‣ *Содержание апериодической составляющей в отключаемом токе короткого замыкания* – отношение апериодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания в заданный момент времени к увеличенному в $\sqrt{2}$ раз действующему значению периодической составляющей отключаемого тока короткого замыкания в тот же момент времени.

‣ *Гармонический состав тока короткого замыкания* – совокупность синусоидальных токов различных частот, на которые может быть разложен ток короткого замыкания.

‣ *Фаза возникновения короткого замыкания в электроустановке* – фаза напряжения электроустановки к моменту возникновения короткого замыкания, выраженная в радианах.

‣ *Свободная переходная составляющая тока короткого замыкания* – периодическая составляющая тока короткого замыкания, обусловленная сравнительно медленно затухающими токами контуров ротора синхронной машины.

‣ *Переходная составляющая тока короткого замыкания* – периодическая составляющая тока короткого замыкания, равная сумме принужденной и свободной переходной составляющих тока короткого замыкания.

‣ *Свободная сверхпереходная составляющая тока короткого замыкания* – периодическая составляющая тока короткого замыкания, обусловленная быстро затухающими токами контуров ротора синхронной машины и проявляющаяся на начальной стадии переходного процесса.

‣ *Сверхпереходная составляющая тока короткого замыкания* – периодическая составляющая тока короткого замыкания, равная сумме переходной и свободной сверхпереходной составляющих тока короткого замыкания.

‣ *Мощность короткого замыкания* – условная величина, равная увеличенному в $\sqrt{3}$ раз произведению тока трехфазного короткого замыкания в начальный момент времени на номинальное напряжение поврежденной электрической сети.

‣ *Продольная несимметрия в электроустановке* – несимметрия трехфазной электроустановки, обусловленная последовательно включенным в ее цепь несимметричным трехфазным элементом.

‣ *Поперечная несимметрия в электроустановке* – несимметрия трехфазной электроустановки, обусловленная коротким замыканием одной или двух фаз на землю или между двумя фазами.

‣ *Однократная несимметрия в электроустановке* – продольная или поперечная несимметрия, возникшая в одной точке трехфазной электроустановки.

‣ *Сложная несимметрия в электроустановке* – несимметрия трехфазной электроустановки, представляющая собой комбинацию из продольных и поперечных несимметрий.

‣ *Особая фаза электроустановки* – фаза трехфазной электроустановки, которая при возникновении продольной или поперечной несимметрии оказывается в условиях, отличных от условий для двух других фаз.

‣ *Комплексная схема замещения* – электрическая схема, в которой схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей объединены соответствующим образом с учетом соотношений между симметричными составляющими токов и напряжений в месте повреждения.

‣ *Граничные условия при несимметрии* – характерные соотношения для токов и напряжений в месте появления в электроустановке несимметрии данного вида.

‣ *Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания* – электромагнитная постоянная времени, характеризующая скорость затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

‣ *Расчетные условия короткого замыкания элемента электроустановки* – наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться рассматриваемый элемент электроустановки при коротких замыканиях различного вида.

‣ *Расчетная схема электроустановки* – электрическая схема электроустановки, при которой имеют место расчетные условия короткого замыкания для данного элемента этой электроустановки.

‣ *Расчетный вид короткого замыкания* – вид короткого замыкания, при котором имеют место расчетные условия короткого замыкания для данного элемента электроустановки.

‣ *Расчетная точка короткого замыкания* – точка на расчетной схеме электроустановки, при коротком замыкании в которой для рассматриваемого элемента электроустановки имеют место расчетные условия короткого замыкания.

‣ *Расчетная продолжительность короткого замыкания* – продолжительность короткого замыкания, являющаяся расчетной для рассматриваемого элемента электроустановки при определении воздействия на него токов короткого замыкания.

‣ *Термическое воздействие тока короткого замыкания* – тепловое воздействие тока короткого замыкания, вызывающее изменение температуры элементов электроустановки.

‣ *Электродинамическое воздействие тока короткого замыкания* – механическое воздействие электродинамических сил, обусловленных током короткого замыкания, на элементы электроустановки.

▸ *Интеграл Джоуля* – условная величина, характеризующая тепловое воздействие тока короткого замыкания на рассматриваемый элемент электроустановки, численно равная интегралу от квадрата тока короткого замыкания по времени в пределах от начального момента короткого замыкания до момента его отключения.

▸ *Стойкость элемента электроустановки к току короткого замыкания* – способность элемента электроустановки выдерживать термическое и электродинамическое воздействия тока короткого замыкания без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

▸ *Ток термической стойкости электрического аппарата при коротком замыкании (ток термической стойкости)* – нормированный ток, термическое воздействие которого электрический аппарат способен выдержать при сквозном коротком замыкании в течение нормированного времени термической стойкости.

▸ *Ток электродинамической стойкости электрического аппарата при коротком замыкании (ток электродинамической стойкости)* – нормированный ток, электродинамическое воздействие которого электрический аппарат способен выдержать при коротком замыкании без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

▸ *Переходный процесс в электроустановке* – процесс перехода от одного установившегося режима электроустановки к другому.

1.3. Основные допущения при расчетах коротких замыканий

Учитывая дискретный характер изменения параметров электрооборудования, расчет токов короткого замыкания для его проверки допускается производить приближенно, с принятием ряда допущений, при этом погрешность расчетов токов короткого замыкания не должна превышать 5 – 10 %.

В частности, допускается:

▸ не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин, за исключением случаев, когда исследуется переходный процесс в трансформаторе при его включении с разомкнутой вторичной обмоткой;

▸ при расчете токов короткого замыкания не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

▸ все трехфазные элементы электроэнергетической системы, входящие в исходную расчетную схему, принимать симметричными;

‣ при расчете токов короткого замыкания не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин, если продолжительность короткого замыкания не превышает 0,5 с, а асинхронных электродвигателей – если продолжительность короткого замыкания не превышает 0,2 с;

‣ при определении ударного тока короткого замыкания от синхронных машин принимать действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в течение первого полупериода переходного процесса неизменным и равным его начальному значению;

‣ не учитывать поперечную емкость воздушных линий электропередачи напряжением до 35 кВ, а также напряжением 110–220 кВ, если их длина не превышает 200 км, и напряжением 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км;

‣ при расчете токов короткого замыкания наиболее удаленную от точки короткого замыкания часть электроэнергетической системы представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС;

‣ при расчете токов короткого замыкания не вводить в расчетную схему источники энергии, если они связаны с частью электроэнергетической системы, где находится расчетная точка короткого замыкания, с помощью электропередачи или вставки постоянного тока;

‣ при любом числе независимых контуров в исходной расчетной схеме, содержащей только индуктивные и активные сопротивления, аperiodическую составляющую тока короткого замыкания считать изменяющейся по экспоненциальному закону;

‣ при расчете тока короткого замыкания электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах электроэнергетической системы, учитывать приближенно, с помощью их эквивалентных параметров;

‣ при расчете периодической составляющей тока короткого замыкания не учитывать активные сопротивления различных элементов исходной расчетной схемы, если активная составляющая эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки короткого замыкания не превышает 30% индуктивной составляющей указанного сопротивления;

‣ принимать сопротивление постоянному току любого элемента электроэнергетической системы равным его активному сопротивлению.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

2.1. Назначение расчетов коротких замыканий и предъявляемые к ним требования

Расчеты коротких замыканий являются необходимым условием успешного решения многочисленных задач, возникающих при проектировании и эксплуатации отдельных электроустановок и электроэнергетической системы в целом, поскольку приходится учитывать возможность нарушений их нормального режима работы. Эти расчеты необходимы для выбора электрооборудования электроустановок по условиям его термической и электродинамической стойкости при коротком замыкании, а выключателей также по отключающей способности; определения электродинамического и термического воздействия токов короткого замыкания на токоведущие части; выбора средств ограничения токов короткого замыкания; выбора уставок средств релейной защиты и автоматики, а также их настройки и оценки возможного действия; выбора оптимальных схем электрических соединений электроустановок и т.п.

Указанные расчеты могут выполняться с различной степенью точности, в зависимости от их целевого назначения. Если для выбора и проверки электрооборудования по условиям короткого замыкания допустимы упрощенные методы расчета токов короткого замыкания, то для настройки средств релейной защиты и автоматики точность расчетов должна быть значительно выше, причем определению подлежат не только максимальные, но и минимальные значения токов короткого замыкания и напряжений в разные моменты времени.

Требуемая точность расчетов во многом определяет возможность принятия тех или иных допущений, упрощающих задачу, и выбор методов ее решения. Очевидно, с увеличением необходимой точности расчетов усложняются соответствующие математические модели, устанавливающие взаимосвязи между многочисленными параметрами элементов электроэнергетической системы и параметрами ее режима.

2.2. Понятия о расчетных условиях

Для проверки электрооборудования по режиму короткого замыкания требуется сопоставить вероятностные параметры режима короткого замыкания с детерминированными параметрами электрооборудования. Для возможности такого сопоставления вероятностные параметры режима короткого замыкания преобразуются в условно детерминированные параметры режима расчетных условий короткого замыкания.

Расчетные условия короткого замыкания – это наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия короткого замыкания. Они формируются на основе опыта эксплуатации электроустановок, анализа отказов электрооборудования и последствий коротких замыканий, использования соотношений параметров режима короткого замыкания, вытекающих из теории переходных процессов в электроустановках. Расчетные условия короткого замыкания определяются индивидуально для каждого элемента электроустановки. Для однотипных по параметрам и схеме включения элементов электроустановки допускается использовать аналогичные расчетные условия.

Расчетные условия короткого замыкания включают в себя:

- расчетную схему электроустановки;
- расчетный вид короткого замыкания;
- расчетную точку короткого замыкания;
- расчетную продолжительность короткого замыкания.

2.3. Расчетная схема электроустановки

Расчетная схема, как правило, включает в себя все элементы электроустановки и примыкающей части энергосистемы, исходя из условий, предусмотренных продолжительной работой электроустановки с перспективой не менее чем в 5 лет после ввода ее в эксплуатацию.

В отдельных, частных случаях, расчетная схема может содержать не все элементы электроустановки, если при этом расчетом доказана возможность существования более тяжелых расчетных условий, что может иметь место, например, при вводе в работу после ремонта одной из параллельных цепей электроустановки.

2.4. Расчетный вид короткого замыкания

При проверке электрических аппаратов и жестких проводников вместе с относящимися к ним поддерживающими и опорными конструкциями на электродинамическую стойкость расчетным видом является трехфазное короткое замыкание. При этом в общем случае допускается не учитывать механические колебания шинных конструкций.

При проверке гибких проводников на электродинамическую стойкость (тяжение, опасное сближение и склестывание проводников) расчетным видом является двухфазное короткое замыкание.

При проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость расчетным видом в общем случае является трехфазное короткое замыкание. При проверке на термическую стойкость проводников и аппаратов в цепях генераторного напряжения электростанций расчетным может быть также двухфазное короткое замыкание, если оно обуславливает больший нагрев проводников и аппаратов, чем при трехфазном коротком замыкании.

При проверке электрических аппаратов на коммутационную способность расчетным видом может быть трехфазное или однофазное короткое замыкание в зависимости от того, в каком случае ток короткого замыкания имеет наибольшее значение. Если для выключателей задается разная коммутационная способность при трехфазном и однофазном коротком замыкании, то проверку следует производить отдельно по каждому виду короткого замыкания.

2.5. Расчетная точка короткого замыкания

Расчетная точка короткого замыкания находится непосредственно с одной или с другой стороны от рассматриваемого элемента электроустановки в зависимости от того, когда для него создаются наиболее тяжелые условия в режиме короткого замыкания. Случаи двойных коротких замыканий на землю допускается в общем случае не учитывать.

В закрытых распределительных устройствах проводники и электрические аппараты, расположенные до реактора на реактированных линиях и отделенные от сборных шин разделяющими полками, а реактор находится в том же здании и все соединения от реактора до сборных шин выполнены шинами, проверяются, исходя из того, что расчетная точка короткого замыкания находится за реактором.

При проверке кабелей на термическую стойкость расчетной точкой короткого замыкания является:

- для одиночных кабелей одной строительной длины – в начале кабеля;
- для одиночных кабелей со ступенчатым сечением по длине – в начале каждого участка нового сечения;
- для двух и более параллельно включенных кабелей одной кабельной линии – в начале каждого кабеля.

Отступления от этих требований должны быть обоснованы.

2.6. Расчетная продолжительность короткого замыкания

При проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость в качестве расчетной продолжительности короткого замыкания следует принимать сумму времен действия основной токовой защиты (с учетом действия АПВ) ближайшего к месту короткого замыкания выключателя и полного времени отключения этого выключателя. При наличии зоны нечувствительности у основной защиты – по сумме времен действия защиты, реагирующей на короткое замыкание в указанной зоне, и полного времени отключения выключателя присоединения.

Токопроводы и трансформаторы тока в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более следует проверять на термическую стойкость, определяя расчетную продолжительность короткого замыкания путем сложения времен действия основной защиты (при установке двух основных защит) или резервной защиты (при установке одной основной защиты) и полного времени отключения генераторного выключателя. Коммутационные электрические аппараты в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более должны проверяться на термическую стойкость как по времени воздействия тока короткого замыкания, определяемому действием основной быстродействующей защиты, так и по времени, определяемому действием резервной защиты, если это время превышает нормируемое заводом-изготовителем время термической стойкости.

При проверке электрических аппаратов на коммутационную способность в качестве расчетной продолжительности короткого замыкания следует принимать сумму минимально возможного времени действия релейной защиты данного присоединения и собственного времени отключения коммутационного аппарата (время τ).

Важным моментом при проектировании является проверка кабелей на невозгораемость при коротком замыкании. При проверке кабелей на невозгораемость при коротком замыкании в качестве расчетной продолжительности следует принимать сумму времен действия резервной защиты и полного времени отключения выключателя присоединения.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

3.1. Параметры наиболее удаленной от расчетной точки короткого замыкания части электроэнергетической системы

При расчетах коротких замыканий электроэнергетическая система может быть задана следующими параметрами:

- ▶ номинальной мощностью $S_{\text{НОМ}}$, МВ·А;
- ▶ номинальным напряжением $U_{\text{НОМ}}$, кВ;
- ▶ индуктивным сопротивлением X , Ом;
- ▶ активным сопротивлением R , Ом;
- ▶ мощностью короткого замыкания $S_{\text{К}}$, МВ·А;
- ▶ током короткого замыкания $I_{\text{К}}$, кА.

3.2. Параметры синхронных машин

Для расчета коротких замыканий необходимы следующие данные о параметрах синхронных машин:

- ▶ номинальная мощность $P_{\text{НОМ}}$, МВт;
- ▶ номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{НОМ}}$;
- ▶ номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}}$, кВ;
- ▶ сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси $X_{*d(\text{НОМ})}''$;
- ▶ сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси $X_{*q(\text{НОМ})}''$;

- ▶ переходное индуктивное сопротивление по продольной оси $X'_{*d(\text{НОМ})}$;
- ▶ синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси $X_{*d(\text{НОМ})}$;
- ▶ синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси $X_{*q(\text{НОМ})}$;
- ▶ индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора $X_{*\sigma(\text{НОМ})}$;
- ▶ отношение короткого замыкания K_c ;
- ▶ индуктивное сопротивление обратной последовательности $X_{*2(\text{НОМ})}$;
- ▶ индуктивное сопротивление обмотки возбуждения $X_{*fz(\text{НОМ})}$;
- ▶ активное сопротивление обмотки возбуждения R_{fz} , Ом ;
- ▶ индуктивное сопротивление продольного демпферного контура $X_{*1d(\text{НОМ})}$;
- ▶ индуктивное сопротивление поперечного демпферного контура $X_{*1q(\text{НОМ})}$;
- ▶ активное сопротивление продольного демпферного контура $R_{*1d(\text{НОМ})}$;
- ▶ активное сопротивление поперечного демпферного контура $R_{*1q(\text{НОМ})}$;
- ▶ переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря T'_{d0} , с ;
- ▶ переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря T'_d , с ;
- ▶ сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря T''_{d0} , с ;
- ▶ сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря T''_d , с ;
- ▶ сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке якоря T''_{q0} , с ;

- ▶ сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря T_q'' , с;
- ▶ постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока якоря при трехфазном коротком замыкании на выводах машины $T_a^{(3)}$, с;
- ▶ ток возбуждения при работе машины в режиме холостого хода с номинальным напряжением $I_{fх}$, А;
- ▶ номинальный ток возбуждения $I_{fном}$, А;
- ▶ предельный ток возбуждения $I_{fпр}$, А.

3.3. Параметры асинхронных двигателей

Обычно в каталогах и данных заводов-изготовителей указываются:

- ▶ номинальная мощность $P_{ном}$, МВт;
- ▶ номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ;
- ▶ номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном}$;
- ▶ номинальное скольжение $s_{ном}$;
- ▶ кратность пускового тока по отношению к номинальному току $I_{*п}$;
- ▶ кратность максимального момента по отношению к номинальному моменту $b_{ном}$;
- ▶ кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту $M_{*п}$;
- ▶ активное сопротивление обмотки статора (при рабочей температуре) R_a , Ом;
- ▶ коэффициент полезного действия η ;
- ▶ напряжение, ток статора и коэффициент мощности в момент, предшествующий короткому замыканию: $U_{(0)}$, $I_{(0)}$, $\cos\varphi_{(0)}$.

3.4. Параметры силовых трансформаторов и автотрансформаторов

Исходными параметрами силовых трансформаторов и автотрансформаторов являются:

- ▶ номинальная мощность $S_{ном}$, МВ·А;
- ▶ номинальные напряжения обмоток и фактические коэффициенты трансформации;

- напряжения короткого замыкания между обмотками $u_{к В-С}$, $u_{к В-Н}$, $u_{к С-Н}$ (для двухобмоточных трансформаторов – $u_{к}$), %, и их зависимость от коэффициентов трансформации;
- диапазон регулирования напряжения, определяющий напряжение короткого замыкания в условиях короткого замыкания;
- потери короткого замыкания $\Delta P_{к В-С}$, $\Delta P_{к В-Н}$, $\Delta P_{к С-Н}$ (для двухобмоточных трансформаторов – $\Delta P_{к}$), кВт.

3.5. Параметры токоограничивающих реакторов

Исходными параметрами токоограничивающих реакторов являются:

- номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ;
- номинальный ток $I_{ном}$, А;
- номинальное индуктивное сопротивление $X_{* LR(ном)}$ или сопротивление в именованных единицах X_{LR} , Ом;
- номинальный коэффициент связи $K_{св}$ (только для сдвоенных реакторов);
- потери мощности (на фазу) при номинальном токе ΔP , кВт.

3.6. Исходные параметры воздушных линий электропередачи

Исходными параметрами воздушных линий электропередачи являются:

- номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ;
- длина линии l , км;
- сечение провода S , мм² и количество проводов в фазе;
- погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1пог}$, Ом/км;
- погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0пог}$, Ом/км;
- погонное активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{пог}$, Ом/км;
- погонные индуктивные сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности от других линий (при наличии нескольких воздушных линий на одной трассе) $X_{M0пог}$, Ом/км;
- погонная емкостная проводимость $b_{пог}$, См/км;
- расстояния между фазами a , м.

3.7. Исходные параметры кабельных линий

Исходными параметрами кабельных линий являются:

- ▶ номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- ▶ длина кабельной линии l , км;
- ▶ сечение жилы кабеля S , мм², материал жил и число параллельно включенных кабелей;
- ▶ погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1\text{пог}}$, Ом/км;
- ▶ погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0\text{пог}}$, Ом/км;
- ▶ погонное активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{\text{пог}}$, Ом/км.

3.8. Исходные параметры токопроводов и шинопроводов

Исходными параметрами токопроводов и шинопроводов являются:

- ▶ погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности $X_{1\text{пог}}$, Ом/км;
- ▶ погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности $X_{0\text{пог}}$, Ом/км;
- ▶ погонное активное сопротивление (при рабочей температуре) $R_{\text{пог}}$, Ом/км;
- ▶ длина токопровода или шинопровода l , м.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

4.1. Расчетная схема и схема замещения

Расчету токов короткого замыкания предшествует выбор расчетных условий, в частности, расчетной схемы, т.е. схемы, при которой возникают наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия, в которых может оказаться рассматриваемый элемент электроустановки при коротком замыкании. Расчетная схема зависит от цели расчетов токов короткого замыкания. Если эти цели состоят в выборе и проверке электрических аппаратов и проводников по условиям короткого замыкания, то в расчетную схему должны быть включены все источники энергии, влияющие на ток короткого замыкания – синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели. Влияние асинхронных электродвигателей допустимо не учитывать при мощности электродвигателя до 100 кВт в единице, если они отделены от расчетной точки короткого замыкания токоограничивающим реактором или силовым трансформатором. А если асинхронные электродвигатели отделены от расчетной точки короткого замыкания двумя плечами сдвоенного реактора или двумя и более ступенями трансформации, то их можно не учитывать и при больших мощностях.

При составлении расчетной схемы обычно исходят из следующих условий:

- ▶ все источники, включенные в расчетную схему, работают одновременно, причем к моменту возникновения короткого замыкания синхронные машины работают с номинальной нагрузкой и номинальным напряжением, а асинхронные электродвигатели – с пятидесятипроцентной нагрузкой;
- ▶ все синхронные машины имеют автоматическое регулирование напряжения и устройства для форсировки возбуждения;
- ▶ ЭДС всех источников совпадают по фазе, если продолжительность короткого замыкания не превышает 0,5 с;

▸ короткое замыкание происходит в такой момент времени, когда напряжение в расчетной фазе проходит через нулевое значение;

▸ наиболее удаленную от точки короткого замыкания часть электроэнергетической системы допустимо представлять в виде одного источника энергии, имеющего неизменную по амплитуде ЭДС и сопротивление, равное эквивалентному сопротивлению заменяемой части системы.

Выбор расчетных схем различных электроустановок производят путем анализа возможных схем этих электроустановок при различных режимах их работы, включая ремонтные и послеаварийные режимы, за исключением схем при переключениях.

При расчетах различных режимов электроэнергетических систем предварительно по исходной расчетной схеме электрической цепи составляют схему замещения этой цепи, т.е. схему, которая при определенных условиях отображает свойства реальной цепи.

4.2. Система единиц, используемая при составлении схем замещения

Параметры различных элементов электроэнергетических систем, а также параметры режима (напряжение, ток, мощность и т.д.) как и другие физические величины могут быть выражены как в системе именованных, так и в системе относительных единиц, т.е. в долях от некоторых значений этих же величин, принятых за единицу измерения. При этом точность получаемых результатов расчетов не зависит от используемой системы единиц измерения.

Применение системы относительных единиц часто существенно упрощает расчетные выражения, описывающие процессы в различных элементах электроэнергетической системы, облегчает контроль расчетных данных и сопоставление результатов расчетов для установок различной мощности, поскольку для таких установок относительные значения расчетных величин часто имеют одинаковый порядок.

Чтобы получить относительные значения различных физических величин, необходимо предварительно выбрать значения соответствующих величин, принимаемые за базисные, т.е. в качестве единиц измерения. В частности, чтобы выразить параметры различных элементов схемы замещения электрической цепи и параметры режима в системе относительных единиц, необходимо иметь четыре базисные единицы – базисное напряжение (линейное напряжение трехфазной системы) U_6 , базисный ток I_6 , базисную мощность (трехфазной системы) S_6 и базисное сопротивление Z_6 . Две из них выбирают произвольно, а две другие определяют из соотношения для мощности трехфазной системы

$$S_{\phi} = \sqrt{3}U_{\phi}I_{\phi}$$

и формулы, выражающей закон Ома,

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}I_{\phi}}.$$

При выбранных базисных единицах (базисных условиях) относительные значения ЭДС, напряжения, тока, мощности и сопротивления определяют путем деления значения соответствующей величины в именованных единицах на базисную единицу той же размерности:

$$E_{* (6)} = \frac{E}{U_{\phi}}; \quad (4.1)$$

$$U_{* (6)} = \frac{U}{U_{\phi}}; \quad (4.2)$$

$$I_{* (6)} = \frac{I}{I_{\phi}}; \quad (4.3)$$

$$S_{* (6)} = \frac{S}{S_{\phi}}; \quad (4.4)$$

$$Z_{* (6)} = \frac{Z}{Z_{\phi}}, \quad (4.5)$$

причем выбранные базисные единицы служат единицами измерения как полных величин, так и их составляющих. Иногда относительные значения величин выражают в процентах от соответствующих базисных единиц, для чего эти значения умножают на 100.

Очевидно, относительные значения фазного и линейного напряжений одинаковы. Также одинаковы относительные значения фазной мощности и мощности трех фаз.

Часто для определения относительного сопротивления вместо формулы (4.5) используют другие соотношения:

$$Z_{* (6)} = Z \frac{\sqrt{3}I_{\phi}}{U_{\phi}} \quad (4.6)$$

или

$$Z_{* (6)} = Z \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2}. \quad (4.7)$$

Из (4.6) следует, что сопротивление в относительных единицах численно равно относительному падению напряжения в соответствующем элементе, вызванному базисным током.

Часто параметры элементов электроэнергетических систем, вводимых в расчетную схему, заданы не в именованных единицах, а в процентах или относительных единицах при номинальных условиях. Это означает, что при выражении их в процентах или в относительных единицах в качестве базисных единиц приняты номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}}$ и номинальный ток $I_{\text{НОМ}}$ или номинальная мощность $S_{\text{НОМ}}$. Например, обычно активное и индуктивное сопротивления воздушных и кабельных линий задают в омах на единицу длины (километр), индуктивное сопротивление реакторов – в омах (до недавнего времени – в процентах), полное сопротивление трансформаторов (оно численно равно напряжению короткого замыкания) – в процентах, а индуктивное сопротивление генераторов и синхронных компенсаторов – в относительных единицах при номинальных условиях.

Для расчетов различных режимов электроэнергетических систем необходимо прежде всего привести ЭДС и сопротивления всех элементов исходной расчетной схемы к одним базисным единицам. Если значения ЭДС и сопротивлений заданы в именованных единицах, то с этой целью используют формулы (4.1) и (4.6) или (4.7), если же заданы относительные значения указанных величин при номинальных условиях, то для приведения используют формулы:

$$E_{* (\sigma)} = E_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\sigma}}; \quad (4.8)$$

$$Z_{* (\sigma)} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{I_{\sigma}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\sigma}}; \quad (4.9)$$

$$Z_{* (\sigma)} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{S_{\sigma}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{U_{\sigma}^2}, \quad (4.10)$$

где $E_{* (\text{НОМ})}$ и $Z_{* (\text{НОМ})}$ – ЭДС и сопротивление в относительных единицах при номинальных условиях; $U_{\text{НОМ}}$, $I_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, номинальный ток и номинальная мощность элемента (генератора, трансформатора и т.д.).

Чтобы упростить расчетные выражения, определяющие режимы электроэнергетических систем, целесообразно в качестве базис-

ной угловой частоты принимать синхронную. Тогда $\omega_{*}^{(6)} = \frac{\omega}{\omega_{\text{синх}}}$ и $\omega_{\text{синх}}^{(6)} = 1$, поэтому при синхронной частоте в системе

$$X_{*}^{(6)} = \omega_{\text{синх}}^{(6)} L_{*}^{(6)} = L_{*}^{(6)} \quad (4.11)$$

или

$$X_{*}^{(6)} = \omega_{\text{синх}}^{(6)} M_{*}^{(6)} = M_{*}^{(6)}; \quad (4.12)$$

$$\Psi_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} L_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} X_{*}^{(6)} \quad (4.13)$$

или

$$\Psi_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} M_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} X_{*}^{(6)}; \quad (4.14)$$

$$E_{*}^{(6)} = \omega_{\text{синх}}^{(6)} \Psi_{*}^{(6)} = \Psi_{*}^{(6)}, \quad (4.15)$$

где $\Psi_{*}^{(6)}$ – относительное значение потокосцепления при выбранных базисных условиях.

Таким образом, если $\omega = \omega_{\delta} = \omega_{\text{синх}}$, то относительные значения индуктивного сопротивления и соответствующей индуктивности или взаимной индуктивности численно равны. Также равны относительные значения потокосцепления и падения напряжения или ЭДС. Это позволяет в различных выражениях одни величины заменять численно равными другими.

При $\omega_{\delta} = \omega_{\text{синх}}$ базисная единица времени $t_{\delta} = \frac{1}{\omega_{\delta}} = \frac{1}{\omega_{\text{синх}}}$, поэтому время в относительных единицах при выбранных базисных условиях

$$t_{*}^{(6)} = \frac{t}{t_{\delta}} = \omega_{\text{синх}} t. \quad (4.16)$$

4.3. Виды схем замещения

Обычно исходная расчетная схема содержит сети разных номинальных напряжений, соединенные трансформаторами. При этом возможны два различных приема составления схем замещения:

- с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, принятой за основную или базисную ступень;
- с сохранением трансформаторных связей между различными ступенями напряжения.

В случае использования схемы замещения с приведением параметров всех элементов исходной расчетной схемы к одной, так называемой базисной ступени напряжения, истинными, не приведенными к другому напряжению, оказываются только параметры элементов сети и параметры режима (токи и напряжения) базисной ступени напряжения, а параметры элементов и параметры режима сетей других номинальных напряжений оказываются измененными, пересчитанными через коэффициенты трансформации промежуточных трансформаторов. Поэтому для получения действительных значений токов и напряжений на различных ступенях напряжения приходится проводить обратный пересчет, что усложняет расчет в целом.

Трудности возникают и при изменении коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов с помощью устройств для регулирования напряжения, так как в этих случаях приходится выполнять пересчет параметров всех элементов соответствующей части схемы замещения. Затруднения возникают и в тех случаях, когда сети двух разных номинальных напряжений связаны в нескольких местах с помощью трансформаторов, у которых коэффициенты трансформации неодинаковы.

При использовании схем замещения с трансформаторными связями устраняется операция по приведению параметров различных элементов исходной расчетной схемы к базисной ступени напряжения, а в результате расчетов получаются истинные токи и напряжения на различных ступенях напряжения. Кроме того, при изменении коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и автотрансформаторов подлежат пересчету только параметры этих трансформаторов и автотрансформаторов, а параметры других элементов схемы замещения остаются неизменными. Однако наличие трансформаторных связей делает такие схемы замещения более сложными. Поэтому они применяются при расчетах с использованием современных вычислительных программ для вычислительных машин. А схемы замещения с приведением параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени, несмотря на их указанные выше недостатки, широко используются при аналитических расчетах установившихся режимов и переходных процессов.

4.4. Составление схем замещения с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов расчетной схемы к одной ступени напряжения

Расчетные выражения, используемые для приведения параметров различных элементов исходной расчетной схемы и параметров режима к основной ступени напряжения, зависят от того, известны или неизвестны фактические коэффициенты трансформации всех трансформаторов и автотрансформаторов расчетной схемы, а также от того, в каких единицах требуется выразить параметры схемы замещения – именованных или относительных. Обычно приведение параметров различных элементов к основной ступени напряжения с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов называют точным приведением, а приведение по средним коэффициентам трансформации – приближенным. Во всех случаях трансформаторы с соединением обмоток по схеме Y/Δ учитываются по схеме Y/Y.

При составлении схемы замещения с точным приведением ЭДС источников энергии и сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении ЭДС и параметров различных элементов схемы замещения в именованных единицах приведенные значения ЭДС источников энергии и сопротивлений элементов, отделенных от основной ступени напряжения каскадно включенными трансформаторами с коэффициентами трансформации n_1, n_2, \dots, n_m (рис. 4.1), определяют по формулам:

$$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m; \quad (4.17)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (4.18)$$

где E и Z – фактические значения ЭДС источника энергии и сопротивления какого-либо элемента исходной расчетной схемы; $\overset{\circ}{E}$ и $\overset{\circ}{Z}$ – их приведенные значения.

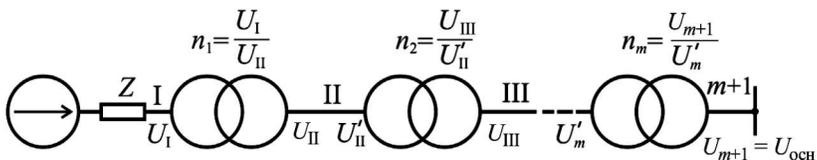


Рис. 4.1. Исходная расчетная схема

Здесь и далее коэффициенты трансформации трансформаторов и автотрансформаторов определяются в направлении от основной ступени напряжения. Это означает, что под коэффициентом трансформации трансформатора и автотрансформатора понимается отношение напряжения холостого хода его обмотки, обращенной в сторону выбранной основной ступени напряжения сети, к напряжению холостого хода обмотки, обращенной в противоположную сторону.

Если ЭДС источника энергии или сопротивление приводимого элемента выражены в относительных единицах при номинальных условиях (т.е. ЭДС при номинальном напряжении, а сопротивление – при номинальном напряжении и номинальном токе или номинальной мощности элемента), то значения соответствующей ЭДС и сопротивления, приведенные к основной ступени напряжения, определяют по формулам:

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{НОМ})} U_{\text{НОМ}} n_1 n_2 \dots n_m; \quad (4.19)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \quad (4.20)$$

или

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (4.21)$$

где $E_{* (\text{НОМ})}$ и $Z_{* (\text{НОМ})}$ – значения ЭДС источника энергии и сопротивления элемента расчетной схемы в относительных единицах при номинальных условиях.

При точном приведении ЭДС и параметров различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении приведенных ЭДС и параметров в относительных единицах сначала устанавливают базисную мощность и базисные напряжение и ток для ступени напряжения, выбранной в качестве основной, т.е. $S_{\text{б}}$, $U_{\text{б осн}}$ и $I_{\text{б осн}}$ (две единицы выбирают произвольно, а третья определяется из соотношения для мощности трехфазной системы). Затем можно, используя соответствующие формулы, ЭДС каждого источника и сопротивление каждого элемента привести к основной ступени напряжения и выразить их в относительных единицах при выбранных базисных условиях. Так, если между ступенью напряжения I , на которой находятся элементы с подлежащими приведению ЭДС и сопротивлениями, и основной ступенью напряжения имеется m трансформаторов, причем значения ЭДС и сопротивлений заданы в именованных единицах, то искомые значения ЭДС и сопротивлений в относительных единицах в соответствии с (4.17), (4.18) и (4.1), (4.6), (4.7) могут быть найдены по формулам:

$$E_{* (6)} = \frac{E}{U_{6 \text{ осн}}} n_1 n_2 \dots n_m; \quad (4.22)$$

$$Z_{* (6)} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{\sqrt{3} I_{6 \text{ осн}}}{U_{6 \text{ осн}}} \quad (4.23)$$

или

$$Z_{* (6)} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{S'_{6 \text{ осн}}}{U_{6 \text{ осн}}^2}. \quad (4.24)$$

Если же значения ЭДС и сопротивлений заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то приведенные значения ЭДС и сопротивлений в относительных единицах в соответствии с (4.19) – (4.21) и (4.1), (4.6), (4.7) можно определить по формулам:

$$E_{* (6)} = E_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{6 \text{ осн}}} n_1 n_2 \dots n_m; \quad (4.25)$$

$$Z_{* (6)} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{I_{6 \text{ осн}}}{U_{6 \text{ осн}}} \quad (4.26)$$

или

$$Z_{* (6)} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{S'_{6 \text{ осн}}}{U_{6 \text{ осн}}^2}. \quad (4.27)$$

Очевидно, пересчет всех ЭДС и сопротивлений исходной расчетной схемы через коэффициенты трансформации трансформаторов при сложной схеме оказывается довольно громоздким. Поэтому чаще используют другой способ определения искомых значений ЭДС и сопротивлений схемы замещения в относительных единицах, при котором вычисления менее громоздки, а результаты те же. Он заключается в следующем. После выбора базисных условий на основной ступени напряжения находят базисные напряжения и токи других ступеней. Очевидно, для ступени напряжения I, связанной с основной ступенью через m каскадно включенных трансформаторов, базисным напряжением и базисным током являются приведенные к этой ступени напряжения базисное напряжение и базисный ток основной ступени, т.е.

$$U_{61} = \frac{U_{6 \text{ осн}}}{n_1 n_2 \dots n_m} \quad (4.28)$$

и

$$I_{\text{б1}} = I_{\text{б осн}} (n_1 n_2 \dots n_m) \quad (4.29)$$

или проще, поскольку базисная мощность для всех ступеней напряжения одинакова,

$$I_{\text{б1}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б1}}} \quad (4.30)$$

На этом учет коэффициентов трансформации трансформаторов заканчивается. Остается подсчитать искомые значения ЭДС и сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах, используя формулы (4.1), (4.6), (4.7) или (4.8) – (4.10), но подставляя в них $U_{\text{б}} = U_{\text{б1}}$ и $I_{\text{б}} = I_{\text{б1}}$, т.е. базисное напряжение и базисный ток той ступени напряжения, на которой находится подлежащий приведению элемент. Такой способ вычисления значений ЭДС и сопротивлений схемы замещения в относительных единицах исключает необходимость пересчета каждой ЭДС и сопротивления каждого элемента исходной расчетной схемы через коэффициенты трансформации. В справедливости этого способа легко убедиться, если несколько преобразовать любую из формул (4.22) – (4.27). Например, формулы (4.22) и (4.23) можно представить в виде

$$E_{* (6)} = \frac{E}{\frac{U_{\text{б осн}}}{(n_1 n_2 \dots n_m)}} = \frac{E}{U_{\text{б1}}};$$
$$Z_{* (6)} = Z \frac{\sqrt{3}I_{\text{б осн}} (n_1 n_2 \dots n_m)}{U_{\text{б осн}}} = Z \frac{\sqrt{3}I_{\text{б1}}}{U_{\text{б1}}},$$

что соответствует сказанному выше.

В тех случаях, когда отсутствуют данные о фактических коэффициентах трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, приведение ЭДС и параметров различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения выполняют по средним коэффициентам трансформации, т.е. принимая коэффициент трансформации каждого трансформатора и автотрансформатора равным отношению так называемых средних номинальных напряжений сетей, связанных этим трансформатором или автотрансформатором. С этой целью предварительно для каждой ступени напряжения устанавливают одно среднее номинальное напряжение, выбирая его из принятого в нашей стране ряда средних номинальных напряжений: 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770; 1175 кВ.

Выбранное для любой ступени напряжения среднее номинальное напряжение должно соответствовать номинальным напряжениям различных элементов, относящихся к этой ступени напряжения (т.е. среднее номинальное напряжение и номинальные напряжения элементов должны быть или равны, или отличаться лишь на несколько процентов).

При замене фактических коэффициентов трансформации средними входящее в выражения для приведения различных величин к основной ступени напряжения произведение средних коэффициентов трансформации каскадно включенных трансформаторов оказывается равным отношению средних номинальных напряжений основной ступени напряжения и ступени напряжения, с которой проводится пересчет, т.е.

$$n_{\text{срI}} n_{\text{ср2}} \dots n_{\text{срm}} = \frac{U_{\text{срII}}}{U_{\text{срI}}} \cdot \frac{U_{\text{срIII}}}{U_{\text{срII}}} \dots \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{срm-I}}} = \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{срI}}}, \quad (4.31)$$

где $U_{\text{ср осн}}$ и $U_{\text{срI}}$ – средние номинальные напряжения основной ступени напряжения и ступени напряжения, на которой находится подлежащий приведению элемент исходной расчетной схемы.

Таким образом, при составлении схемы замещения с приближенным приведением ЭДС и сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении этих ЭДС и сопротивлений в именованных единицах расчетные формулы существенно упрощаются. В частности, если ЭДС и сопротивления элементов расчетной схемы заданы в именованных единицах, то формулы имеют вид:

$$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{срI}}}; \quad (4.32)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{срI}}^2}. \quad (4.33)$$

Если же ЭДС и сопротивления элементов расчетной схемы заданы в относительных единицах при номинальных условиях, то

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{НОМ})} U_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{срI}}}; \quad (4.34)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{срI}}^2} \quad (4.35)$$

или

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{ср I}}^2}. \quad (4.36)$$

Часто номинальные напряжения всех элементов исходной расчетной схемы, находящихся на одной ступени напряжения, принимают одинаковыми и равными среднему номинальному напряжению этой ступени напряжения, т.е. $U_{\text{НОМ}} = U_{\text{ср I}}$. При этом соотношения (4.34) и (4.36) упрощаются:

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{НОМ})} U_{\text{ср осн}}; \quad (4.37)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{S_{\text{НОМ}}}. \quad (4.38)$$

При приближенном приведении ЭДС и параметров различных элементов исходной расчетной схемы к одной ступени напряжения и выражении ЭДС и параметров схемы замещения в относительных единицах целесообразно за базисное напряжение основной ступени напряжения принять среднее номинальное напряжение этой ступени, т.е. $U_{\text{б осн}} = U_{\text{ср осн}}$. Тогда в соответствии с (4.28) и (4.31)

$$U_{\text{б I}} = \frac{U_{\text{ср осн}}}{\frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{ср I}}}} = U_{\text{ср I}},$$

т.е. при указанном условии базисное напряжение любой ступени напряжения оказывается численно равным среднему номинальному напряжению этой ступени. Если и в этом случае номинальные напряжения всех элементов исходной расчетной схемы, находящихся на одной ступени напряжения, принять одинаковыми и равными среднему номинальному напряжению этой ступени напряжения, то формулы (4.8) – (4.10) существенно упрощаются

$$E_{* (\text{б})} = E_{* (\text{НОМ})}; \quad (4.39)$$

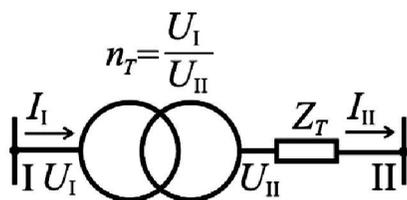
$$Z_{* (\text{б})} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{НОМ}}}; \quad (4.40)$$

$$Z_{* (\text{б})} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}. \quad (4.41)$$

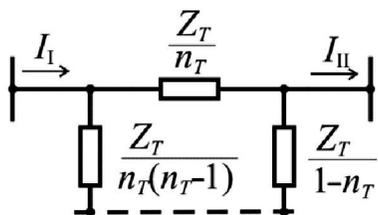
4.5. Составление схем замещения с сохранением трансформаторных связей

При использовании схем замещения с трансформаторными связями все расчеты проводят в именованных единицах. Двухобмоточные трансформаторы обычно учитывают приближенно в виде последовательно включенных идеального трансформатора (т.е. трансформатора, у которого отсутствуют потери мощности, а ток намагничивания равен нулю), имеющего коэффициент трансформации n_T , и сопротивления Z_T , представляющего собой сумму сопротивлений рассеяния обеих обмоток, приведенных к ступени напряжения II (рис. 4.2,а).

Если расчеты выполняются с помощью программ для ЭВМ, то двухобмоточные трансформаторы могут быть представлены П-образной схемой замещения с электрическими связями (рис. 4.2,б), которая, как и схема на рис. 4.2,а, при соединении обмоток трансформаторов по схеме Y/Y обеспечивает истинные значения токов и напряжений на обеих ступенях напряжения. При этом следует иметь в виду, что предварительно сопротивление трансформатора Z_T должно быть приведено к ступени напряжения II.



а



б

Рис. 4.2. Представление двухобмоточного трансформатора в схеме замещения:

а – последовательная схема; б – П-образная схема

4.6. Преобразование схем замещения

При аналитических расчетах коротких замыканий и других режимов электроэнергетических систем исходные схемы замещения прямой последовательности, в которых представлены различные элементы исходных расчетных схем, обычно посредством последовательных преобразований приводят к эквивалентным схемам замещения, содержащим эквивалентную ЭДС и эквивалентное сопротивление. Если исходная схема замещения не содержит сложных замкнутых контуров, а все источники энергии присоединены в одном узле, то она легко может быть преобразована в эквивалентную схему, используя правила сложения последовательно и параллельно соединенных сопротивлений и замены нескольких источников энергии, имеющих в общем случае разные ЭДС и разные сопротивления, одним эквивалентным источником, обладающим эквивалентной ЭДС $E_{\text{эк}}$ и эквивалентным сопротивлением $Z_{\text{эк}}$. В частности, если источники энергии в схеме замещения учтены только индуктивными сопротивлениями и ЭДС, то эквивалентная ЭДС и эквивалентное сопротивление определяются по формулам:

$$E_{\text{эк}} = \frac{\frac{E_1}{X_1} + \frac{E_2}{X_2} + \dots + \frac{E_n}{X_n}}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}} \quad (4.42)$$

и

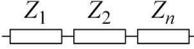
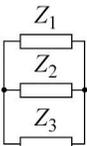
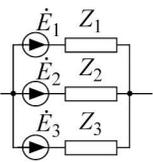
$$X_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}}, \quad (4.43)$$

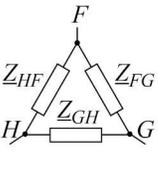
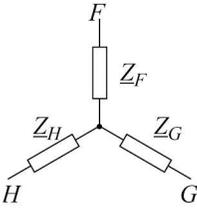
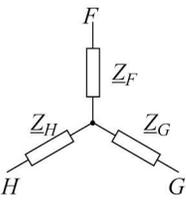
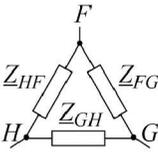
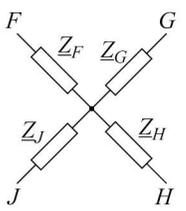
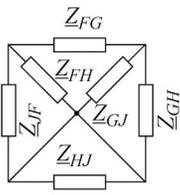
где E_1, E_2, \dots, E_n – ЭДС отдельных источников, присоединенных в одном узле; X_1, X_2, \dots, X_n – индуктивные сопротивления этих источников.

При более сложных исходных схемах замещения для определения эквивалентного сопротивления используют известные способы преобразования, такие как преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений, звезду сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений, многолучевую звезду сопротивлений в полный многоугольник сопротивлений и т.д. (см. табл. 4.1).

Таблица 4.1

Основные формулы преобразования схем

| Вид преобразования | Исходная схема | Преобразованная схема | Эквивалентный элемент преобразованной схемы |
|--|---|---|---|
| Последовательное соединение |  |  | $Z_{\text{эк}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n$ |
| Параллельное соединение |  |  | $Z_{\text{эк}} = \frac{1}{Y_{\text{эк}}},$ <p>где</p> $Y_{\text{эк}} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n;$ $Y_1 = \frac{1}{Z_1};$ $Y_2 = \frac{1}{Z_2};$ $Y_n = \frac{1}{Z_n}$ <p>При двух ветвях</p> $Z_{\text{эк}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$ |
| Замена нескольких источников эквивалентным |  |  | $\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{1}{Y_{\text{эк}}} \sum_{k=1}^n Y_k \dot{E}_k$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{\text{эк}} = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$ |

| Вид преобразования | Исходная схема | Преобразованная схема | Эквивалентный элемент преобразованной схемы |
|---|--|--|---|
| Преобразование треугольника в звезду |  |  | $\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG}\underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG}\underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH}\underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ |
| Преобразование трехлучевой звезды в треугольник |  |  | $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$ |
| Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник |  |  | $\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ <p style="text-align: center;">и т.д., где</p> $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$ <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p> |

В тех случаях, когда исходная схема замещения симметрична относительно расчетной точки короткого замыкания или какая-либо часть этой схемы симметрична относительно некоторой промежуточной точки, задачу нахождения эквивалентного сопротивления можно существенно облегчить. Для этого необходимо соединить на исходной схеме замещения точки, имеющие одинаковые потенциалы, и исключить из схемы те элементы, которые при коротком замыкании оказываются обесточенными.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ СВЫШЕ 1 кВ

5.1. Общие положения

В начальный момент короткого замыкания значение тока в любой цепи, обладающей индуктивностью, остается неизменным и равным его значению в конце предшествующего режима. Однако при исследовании переходных процессов ток в произвольный момент времени обычно представляют как сумму периодической и апериодической составляющих и определение каждой из них представляет собой важную задачу.

При расчете начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в электроустановках напряжением свыше 1 кВ должны быть учтены все синхронные генераторы и компенсаторы, а также синхронные и асинхронные электродвигатели мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки короткого замыкания токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами.

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного генератора или компенсатора можно получить, решив дифференциальные уравнения переходного процесса в синхронной машине (уравнения Парка–Горева) и подставив в полученные выражения $t = 0$. Но проще процесс в начальный момент короткого замыкания можно исследовать, исходя из принципа сохранения потокосцеплений контуров ротора синхронной машины в момент любого нарушения ее режима. Кроме того, такой подход позволяет более наглядно выявить, какими ЭДС и сопротивлениями следует характеризовать синхронную машину в начальный момент короткого замыкания.

5.2. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания при удаленных коротких замыканиях (от электроэнергетической системы)

При расчетах токов короткого замыкания самую удаленную часть электроэнергетической системы часто представляют в виде одного эквивалентного источника энергии (обычно его называют системой) с индуктивным сопротивлением X_{GS} , равным суммарному индуктивному сопротивлению соответствующей части электроэнергетической системы относительно ближайшего к месту короткого замыкания узла сети, и с неизменной по амплитуде ЭДС, равной среднему номинальному напряжению U_{cp} той ступени напряжения сети, к которой приведено сопротивление X_{GS} . При коротком замыкании за сопротивлением X_{GS} действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от системы не изменяется во времени и определяется по формуле

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}X_{GS}} \quad (5.1)$$

или, если сопротивление системы выражено в относительных единицах при выбранных базисных условиях,

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{U_{cp}}{U_б} \cdot \frac{I_б}{X_{*GS(б)}}, \quad (5.2)$$

где $U_б$ и $I_б$ – базисное напряжение и базисный ток той ступени напряжения сети, на которой находится точка короткого замыкания.

В тех случаях, когда эквивалентное сопротивление системы относительно заданной точки неизвестно, его можно определить, исходя из известного значения периодической составляющей тока короткого замыкания в этой точке:

$$X_{GS} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}I_{п0}} \quad (5.3)$$

или

$$X_{*GS(б)} = \frac{U_{cp}}{U_б} \cdot \frac{I_б}{I_{п0}}. \quad (5.4)$$

Иногда вместо периодической составляющей тока короткого замыкания от системы задается так называемая мощность короткого замыкания в какой-либо точке системы, под которой понимают

условную величину, равную увеличенному в $\sqrt{3}$ раз произведению тока трехфазного короткого замыкания от системы на среднее номинальное напряжение соответствующей ступени напряжения электрической сети, т.е.

$$S_k = \sqrt{3} I_{п0} U_{cp}. \quad (5.5)$$

При этом

$$X_{GS} = \frac{U_{cp}^2}{S_k} \quad (5.6)$$

или

$$X_{*GS(6)} = \frac{S_6}{S_k} \cdot \frac{U_{cp}^2}{U_6^2}. \quad (5.7)$$

Если за базисное напряжение той части сети, где находится точка короткого замыкания, принято ее среднее номинальное напряжение, то выражения (5.2), (5.4) и (5.7) существенно упрощаются:

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{I_6}{X_{*GS(6)}}; \quad (5.8)$$

$$X_{*GS(6)} = \frac{I_6}{I_{п0}}; \quad (5.9)$$

$$X_{*GS(6)} = \frac{S_6}{S_k}. \quad (5.10)$$

При отсутствии данных о токе или мощности короткого замыкания в существующей сети индуктивное сопротивление системы можно оценить (но не при проектировании) приближенно, исходя из условия полного использования отключающей способности выключателей, установленных на узловой подстанции электроэнергетической системы, т.е. полагая, что периодическая составляющая тока короткого замыкания в месте установки выключателей равна их номинальному току отключения $I_{откл. ном.}$. В этом случае в формулах (5.3), (5.4) под током $I_{п0}$ следует понимать ток $I_{откл. ном.}$.

Если кроме системы расчетная схема содержит источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы), для которых короткое замыкание является удаленным, т.е. отношения действующих значений периодической составляющей токов этих источников в начальный момент короткого замыкания в расчетной точке к их но-

минальным токам менее 2 (такие условия имеют место при коротком замыкании за двумя трансформаторами, за линейными реакторами и т.д.), то все эти источники энергии посредством соответствующих преобразований схемы замещения, составленной для расчета начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания (т.е. схемы, в которой синхронные генераторы и компенсаторы учтены сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС), можно объединить с системой и амплитуду эквивалентной ЭДС считать неизменной во времени. При этом действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания также остается неизменной и определяется по формуле

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{E_{эк}}{X_{эк}} \quad (5.11)$$

или

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{E_{*эк(б)}}{X_{*эк(б)}} I_{б}, \quad (5.12)$$

где $E_{эк}$ и $E_{*эк(б)}$ – эквивалентная ЭДС соответственно в именованных и относительных единицах;

$X_{эк}$ и $X_{*эк(б)}$ – эквивалентное сопротивление части расчетной схемы, содержащей удаленные источники энергии и систему, соответственно в именованных и относительных единицах.

5.3. Расчет начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных машин

Каждая синхронная машина имеет демпферные контуры, причем у гидрогенераторов они обычно устанавливаются специально, а у турбогенераторов роль демпферных контуров выполняет стальной массив ротора. При анализе характеристик синхронной машины могут быть использованы различные ЭДС, в зависимости от того, каким магнитным потоком они наводятся в обмотке якоря машины: синхронная ЭДС E_q , обусловленная магнитным потоком от тока возбуждения; ЭДС зазора $E_{\delta q}$, индуцируемая магнитным потоком зазора машины; переходная ЭДС E'_q (при неучете демпферных контуров синхронной машины), пропорциональная суммарному потокосцеплению обмотки возбуждения машины, обусловленному собственным

током и периодической составляющей тока якоря; сверхпереходная ЭДС E_q'' (при учете демпферных контуров синхронной машины), определяемая потокосцеплениями обмоток возбуждения и продольного демпферного контура, и т.д.

Каждой ЭДС соответствует определенное сопротивление синхронной машины, являющееся ее параметром: синхронной ЭДС E_q соответствует синхронное сопротивление по продольной оси X_d , ЭДС зазора $E_{\delta q}$ – сопротивление рассеяния якоря X_σ , переходной ЭДС E_q' – переходное сопротивление по продольной оси X_d' , сверхпереходной ЭДС E_q'' – сверхпереходное сопротивление по продольной оси X_d'' .

Поэтому при учете синхронной машины любой из указанных ЭДС в расчетную схему эта машина должна быть введена соответствующим сопротивлением. Но независимо от используемых в расчетах ЭДС и сопротивлений при заданных значениях продольной составляющей

тока машины \dot{I}_d и поперечной составляющей напряжения на ее выводах \dot{U}_q должны выполняться соотношения:

$$\dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d = \dot{U}_q; \quad (5.13)$$

$$\dot{E}_{\delta q} - jX_\sigma \dot{I}_d = \dot{U}_q; \quad (5.14)$$

$$\dot{E}'_q - jX'_d \dot{I}_d = \dot{U}_q; \quad (5.15)$$

$$\dot{E}''_q - jX''_d \dot{I}_d = \dot{U}_q. \quad (5.16)$$

Можно легко показать, что при расчете начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания ЭДС E_q и $E_{\delta q}$ не могут быть использованы, так как в начальный момент короткого замыкания ЭДС E_q мгновенно увеличивается, а ЭДС $E_{\delta q}$ мгновенно уменьшается, причем степень их изменения зависит от искомого тока якоря. И лишь переходная ЭДС E_q' (при неучете демпферных контуров) и сверхпереходная ЭДС E_q'' (при учете демпферных контуров) остаются неизменными при любой коммутации. Но если синхронную ЭДС E_q легко определить до короткого замыкания, так как при отсутствии насыщения магнитной системы машины она пропорциональна току возбуждения, то переходную и сверхпереходную ЭДС с достаточной точностью можно определить только из векторной диаграммы машины до короткого замыкания.

Определение начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного генератора без учета влияния демпферных контуров

Для построения векторной диаграммы синхронной машины без демпферных контуров используют известное соотношение:

$$\dot{E}_q = \dot{U} + R \dot{I} + jX_q \dot{I} + j(X_d - X_q) \dot{I}_d. \quad (5.17)$$

Если пренебречь активным сопротивлением якоря, то

$$\dot{E}_q = \dot{U} + jX_q \dot{I} + j(X_d - X_q) \dot{I}_d \quad (5.18)$$

Исходными при построении векторной диаграммы являются векторы \dot{U} и \dot{I} и угол φ между ними (рис. 5.1). Добавив к вектору \dot{U} вектор $jX_q \dot{I}$, найдем некоторый вектор \dot{E}_Q , который, как видно из (5.17), совпадает с поперечной осью q машины. Таким образом, положение оси q на комплексной плоскости определено. Проведя перпендикулярно этой оси ось d , легко найти ток \dot{I}_d как проекцию вектора тока \dot{I} на ось d и напряжение \dot{U}_q как проекцию вектора напряжения \dot{U} на ось q . Откладывая, далее, от конца вектора \dot{E}_Q вектор $j(X_d - X_q) \dot{I}_d$, найдем вектор ЭДС \dot{E}_q .

Из выражения (5.15) следует:

$$\dot{E}'_q = \dot{U}_q + jX'_d \dot{I}_d. \quad (5.19)$$

Последнее выражение позволяет определить начальное значение переходной ЭДС E'_{q0} из векторной диаграммы синхронной машины до момента короткого замыкания (рис. 5.1,а). С этой целью достаточно изложенным выше способом построить векторную диаграмму (без учета R) и к поперечной составляющей напряжения якоря \dot{U}_q прибавить вектор $jX'_d \dot{I}_d$.

В поперечной оси синхронной машины отсутствует обмотка возбуждения, вследствие чего $\dot{E}'_d = 0$. Поэтому при коротком замыкании во внешней цепи, индуктивное сопротивление которой до места повреждения составляет $X_{вн}$, периодическая составляющая тока в начальный момент короткого замыкания является продольной и равна

$$\dot{I}_{п0} = \dot{I}'_{d0} = \frac{\dot{E}'_{q0}}{j(X'_d + X_{вн})}, \quad (5.20)$$

а напряжение на выводах генератора $\dot{U} = jX_{вн} \dot{I}_{п0}$.

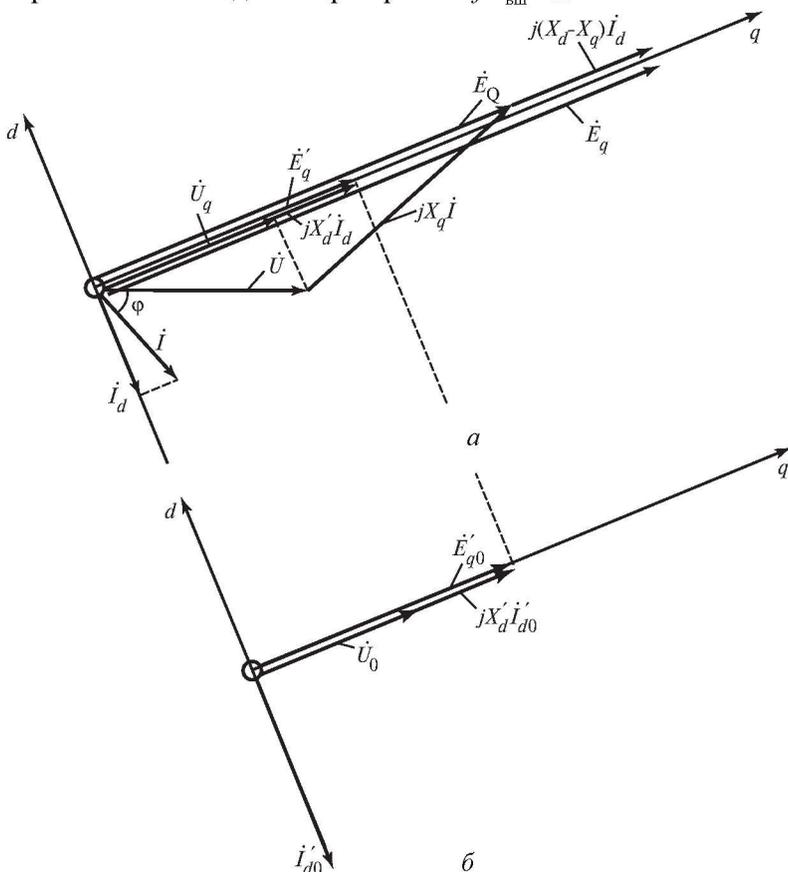


Рис. 5.1. Векторные диаграммы синхронного генератора без демпферных контуров:
a – до короткого замыкания;
б – в начальный момент короткого замыкания

Соответствующая векторная диаграмма синхронной машины в начальный момент короткого замыкания приведена на рис. 5.1,б. Из нее видно, что в указанный момент неизменной по модулю и фазе остается только ЭДС \dot{E}'_q .

С небольшой погрешностью модуль переходной ЭДС машины к моменту короткого замыкания можно найти, полагая, что параметры синхронной машины по продольной и поперечной осям одинаковы и равны X'_d . В этом случае существенно упрощается векторная диаграмма машины, так как нет необходимости определять продольную составляющую тока и поперечную составляющую напряжения, а достаточно знать истинные напряжение и ток машины до короткого замыкания. Искомая ЭДС связана с этими величинами соотношением:

$$\dot{E}' = \dot{U} + jX'_d \dot{I}. \quad (5.21)$$

Векторная диаграмма синхронного генератора, построенная по (5.21), приведена на рис. 5.2. Из этой диаграммы следует

$$E'_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(U_{(0)} \sin \varphi_{(0)} + X'_d I_{(0)}\right)^2} \quad (5.22)$$

или

$$E'_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} + X'_d I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(X'_d I_{(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2}. \quad (5.23)$$

Поскольку угол δ между векторами напряжения и переходной ЭДС незначителен, то для определения $E'_{(0)}$ можно использовать также следующее приближенное выражение

$$E'_{(0)} \approx U_{(0)} + X'_d I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}. \quad (5.24)$$

Переходное сопротивление можно представить так:

$$X'_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{ad}}}. \quad (5.25)$$

Этому выражению соответствует схема замещения синхронной машины без учета демпферных контуров, приведенная на рис. 5.3.

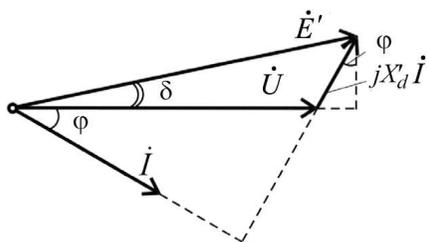


Рис. 5.2. Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора без демпферных контуров

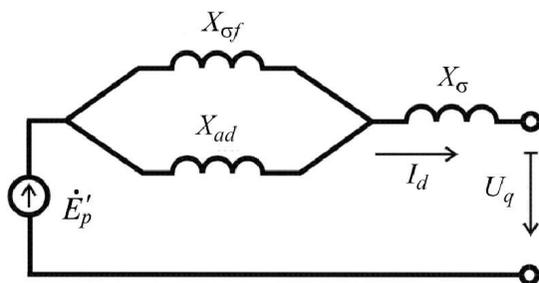


Рис. 5.3. Схема замещения синхронной машины без демпферных контуров

Определение начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного генератора с учетом влияния демпферных контуров

В синхронной машине с демпферными контурами всякое изменение магнитного потока реакции якоря по продольной оси, обусловленное изменением периодической составляющей тока якоря, вызывает ответную реакцию не только со стороны обмотки возбуждения, но и продольного демпферного контура, в результате чего их потокосцепления остаются неизменными. Поэтому остается неизменной и ЭДС якоря, определяемая этими потокосцеплениями.

Из формулы (5.16) следует:

$$\dot{E}''_q = \dot{U}_q + jX''_d \dot{I}_d. \quad (5.26)$$

Сверхпереходное сопротивление по продольной оси можно представить в виде:

$$X_d'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{cf}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} . \quad (5.27)$$

При учете демпферных контуров продольная сверхпереходная ЭДС E_d'' не равна нулю и определяется по формуле:

$$E_d'' = \dot{U}_d + jX_q'' I_q, \quad (5.28)$$

где

$$X_q'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma 1q}} + \frac{1}{X_{aq}}} . \quad (5.29)$$

Выражения (5.26) и (5.28) показывают, что сверхпереходные ЭДС E_q'' и E_d'' могут быть определены по данным установившегося режима работы машины, предшествующего короткому замыканию. С этой целью из векторной диаграммы машины, построенной для этого режима, находят продольные и поперечные составляющие тока и напряжения и, используя (5.26) и (5.28), находят искомые ЭДС (рис. 5.4,а).

При коротком замыкании во внешней цепи, индуктивное сопротивление которой до места повреждения составляет $X_{вщ}$, продольная и поперечная слагающие периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания равны соответственно:

$$\dot{I}_{d0}'' = \frac{\dot{E}_{q0}''}{j(X_d'' + X_{вщ})} = \frac{\dot{E}_{q(0)}''}{j(X_d'' + X_{вщ})}; \quad (5.30)$$

$$\dot{I}_{q0}'' = \frac{\dot{E}_{d0}''}{j(X_q'' + X_{вщ})} = \frac{\dot{E}_{d(0)}''}{j(X_q'' + X_{вщ})}, \quad (5.31)$$

поэтому искомое начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания

$$I_{п0} = \sqrt{I_{d0}''^2 + I_{q0}''^2} . \quad (5.32)$$

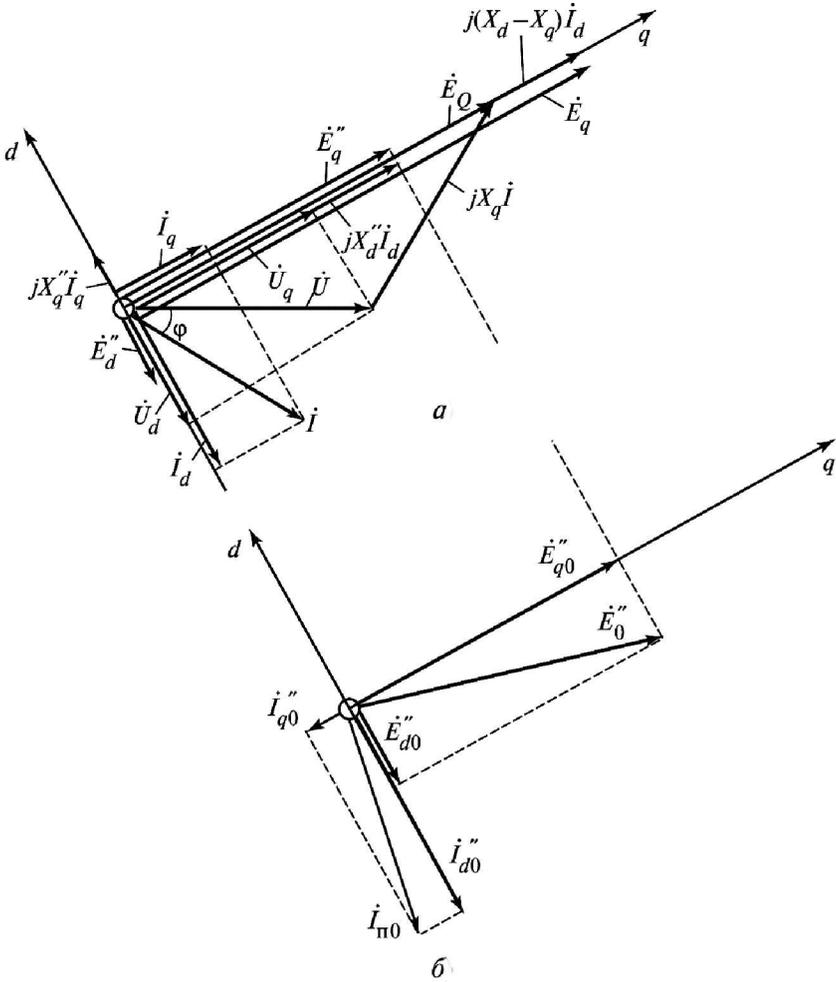


Рис. 5.4. Векторные диаграммы синхронного генератора с демпферными контурами:
a – до короткого замыкания;
б – в начальный момент короткого замыкания

Векторная диаграмма машины в начальный момент короткого замыкания приведена на рис. 5.4,б. Поскольку $X_q'' > X_d''$, то, как видно из (5.30) и (5.31), угол между векторами результирующей ЭДС \dot{E}'' и результирующего тока $\dot{I}_{\pi 0}$ меньше $\pi/2$, несмотря на то, что активное сопротивление обмотки якоря не учитывается.

Расчет начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания существенно упрощается, если принять допущение, что сверхпереходные сопротивления синхронной машины по продольной и поперечной осям одинаковы и равны X_d'' . При этом сверхпереходная ЭДС синхронной машины определяется из простого соотношения:

$$E'' = \dot{U} + jX_d'' \dot{I}, \quad (5.33)$$

а ее модуль к моменту короткого замыкания

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(U_{(0)} \sin \varphi_{(0)} + X_d'' I_{(0)}\right)^2} \quad (5.34)$$

или

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} + X_d'' I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(X_d'' I_{(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2}. \quad (5.35)$$

В приближенных расчетах можно использовать следующую формулу:

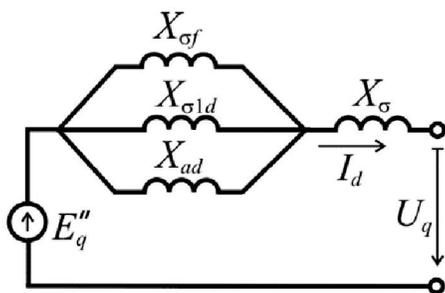
$$E''_{(0)} \approx U_{(0)} + X_d'' I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}. \quad (5.36)$$

Сверхпереходная ЭДС синхронного компенсатора определяется как

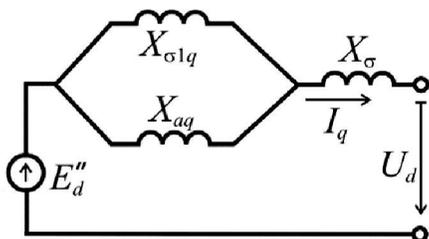
$$E''_{(0)} = U_{(0)} \pm X_d'' I_{(0)}, \quad (5.37)$$

где знак «плюс» принимается в том случае, если до короткого замыкания компенсатор работал с перевозбуждением, а «минус» – с недо-возбуждением.

Выражения (5.26), (5.27) и (5.28), (5.29) позволяют составить схемы замещения синхронной машины с демпферными контурами соответственно по продольной и поперечной осям ротора. Такие схемы приведены на рис. 5.5,а и 5.5,б.



a



б

Рис. 5.5. Схемы замещения синхронной машины с демпферными контурами:

a – по продольной оси; *б* – по поперечной оси

5.4. Влияние электродвигателей и нагрузок в начальный момент короткого замыкания

Влияние синхронных электродвигателей и синхронных компенсаторов на ток в месте короткого замыкания в начальный момент времени зависит от их режима работы до короткого замыкания и удаленности точки короткого замыкания. При работе синхронных электродвигателей (компенсаторов) с перевозбуждением их сверхпереходная ЭДС больше напряжения на выводах, поэтому они подобно синхронным генераторам увеличивают ток в месте короткого замыкания. В случае работы синхронных электродвигателей (компенсаторов) с недо возбуждением их влияние в начальный момент короткого замыкания зависит от удаленности точки короткого замыкания:

- если в этот момент остаточное напряжение оказывается меньше сверхпереходной ЭДС, то они увеличивают ток в месте короткого замыкания;

- если же остаточное напряжение остается больше сверхпереходной ЭДС, то они продолжают потреблять реактивную мощность из сети.

Сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя до короткого замыкания при его работе с недозвуждением в соответствии с упрощенной векторной диаграммой ($X_q'' = X_d''$), приведенной на рис. 5.6, может быть определена по формуле

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} - X_d'' I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}\right)^2 + \left(X_d'' I_{(0)} \cos \varphi_{(0)}\right)^2} \quad (5.38)$$

или

$$E''_{(0)} \approx U_{(0)} - X_d'' I_{(0)} \sin \varphi_{(0)}. \quad (5.39)$$

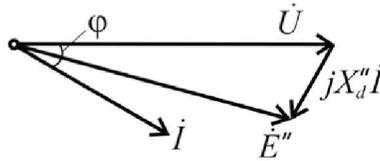


Рис. 5.6. Векторная диаграмма синхронного электродвигателя, работающего с недозвуждением

Асинхронные электродвигатели в начальный момент короткого замыкания можно рассматривать как синхронные электродвигатели, работающие с недозвуждением, поэтому их влияние на начальный ток в месте короткого замыкания также зависит от удаленности точки короткого замыкания.

В расчетной схеме асинхронные электродвигатели, как и синхронные, должны быть учтены сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС. Сравнивая известную схему замещения асинхронного электродвигателя с двумя обмотками на роторе со схемой замещения синхронной машины с демпферными контурами по продольной оси, можно увидеть, что сверхпереходное сопротивление асинхронного электродвигателя практически равно его входному сопротивлению при неподвижном роторе $X_{*к(ном)}$ (так как только в

этом случае можно пренебречь активными сопротивлениями $\frac{R_2}{s}$, входящими в схему замещения асинхронного двигателя), т.е.

$$X_{* (ном)}'' \approx X_{*к(ном)} \approx \frac{1}{I_{*п}}, \quad (5.40)$$

где $I_{*п}$ – кратность пускового тока электродвигателя по отношению к его номинальному току.

Для определения сверхпереходной ЭДС асинхронных электродвигателей применимы формулы (5.38) и (5.39). При этом в них вместо X_d'' следует подставлять сверхпереходное сопротивление асинхронного электродвигателя, определяемое по (5.40).

Обычно при расчете начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания индивидуально учитывают только электродвигатели, подключенные вблизи точки короткого замыкания. Остальные электродвигатели вместе с другими потребителями электрической энергии, а также понижающими трансформаторами и кабелями учитывают в виде обобщенных нагрузок различных узлов электроэнергетической системы. При отсутствии достоверных данных об относительном составе нагрузок их в расчетной схеме учитывают средними параметрами, полученными на основе анализа результатов соответствующих экспериментов. В частности, если относительный состав нагрузки близок к тому, который характерен для промышленных потребителей, а ее электроснабжение осуществляется по радиальной схеме, то такую обобщенную нагрузку эквивалентизируют следующими параметрами: $E_{* (ном)}'' = 0,85$ и $X_{* (ном)}'' = 0,35$.

Указанное значение ЭДС отнесено к среднему номинальному напряжению той ступени напряжения, где подключена нагрузка, а значение сверхпереходного сопротивления – к тому же напряжению и к суммарной мощности этой нагрузки.

5.5. Расчет апериодической составляющей тока короткого замыкания в произвольной схеме

Модуль начального значения апериодической составляющей тока короткого замыкания следует определять как разность мгновенных значений периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания и тока в момент, предшествующий короткому замыканию. Наибольшее начальное значение апериодической составляющей тока короткого замыкания в общем случае следует принимать равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания, т.е.

$$i_{a0} = \sqrt{2} I_{п0}. \quad (5.41)$$

Это выражение справедливо при следующих условиях:

- ▶ активная составляющая эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно расчетной точки короткого замыкания значительно меньше индуктивной составляющей;

- ▶ к моменту короткого замыкания ветвь расчетной схемы, в которой находится расчетная точка короткого замыкания, не нагружена;

▸ напряжение одной из фаз сети к моменту возникновения короткого замыкания проходит через нуль.

Если указанные условия не выполняются, то начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания меньше амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания.

Для определения аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени предварительно должна быть составлена такая схема замещения, чтобы в ней все элементы исходной расчетной схемы учитывались как индуктивными, так и активными сопротивлениями. При этом синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки.

Если исходная расчетная схема имеет только последовательно соединенные элементы, то аperiodическую составляющую тока короткого замыкания в произвольный момент времени t следует определять по формуле

$$i_{at} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (5.42)$$

где T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

Эта постоянная определяется по формуле

$$T_a = \frac{X_{\text{эк}}}{\omega_{\text{синх}} R_{\text{эк}}}, \quad (5.43)$$

где $X_{\text{эк}}$ и $R_{\text{эк}}$ – соответственно индуктивная и активная составляющие результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки короткого замыкания; $\omega_{\text{синх}}$ – синхронная угловая частота напряжения сети.

В тех случаях, когда при расчете аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени необходимо учесть ток генератора в момент, предшествующий короткому замыканию, следует использовать формулу

$$i_{at} = \sqrt{2} I_{(0)} \sqrt{\left(\frac{I_{\text{п}0}}{I_{(0)}}\right)^2 - 2 \frac{I_{\text{п}0}}{I_{(0)}} \sin \psi_{(0)} + 1} e^{-\frac{t}{T_a}},$$

где $I_{(0)}$ – ток генератора (действующее значение) к моменту короткого замыкания; ψ – угол сдвига фаз сверхпереходной ЭДС и тока генератора к моменту короткого замыкания; T_a – постоянная времени

затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания в цепи с синхронным генератором.

Если исходная расчетная схема (и соответственно схема замещения) является многоконтурной, то апериодическая составляющая тока короткого замыкания изменяется во времени не по экспоненциальному закону, а представляет собой сумму токов, являющихся экспоненциальными функциями времени и затухающих с различными постоянными времени. Число экспоненциальных слагающих апериодической составляющей в цепи с активно-индуктивными ветвями равно числу независимых контуров. Поэтому точное значение апериодической составляющей может быть определено только путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, составленных с учетом как индуктивных, так и активных сопротивлений всех элементов исходной расчетной схемы. Однако обычно используют приближенную методику расчета апериодической составляющей, причем такая методика зависит от конфигурации исходной расчетной схемы и положения расчетной точки короткого замыкания.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, но все источники энергии связаны с расчетной точкой короткого замыкания общим сопротивлением (или схема содержит только один источник энергии), то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени допускается считать, что эта составляющая затухает во времени по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени. Существует несколько методов определения последней:

▶ с использованием составляющих комплексного эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки короткого замыкания, измеренного при промышленной частоте:

$$T_{a.эк} = \frac{\text{Im } \underline{Z}_{эк}}{\omega_{\text{синх}} \text{Re } \underline{Z}_{эк}}, \quad (5.44)$$

где $\underline{Z}_{эк}$ – комплексное эквивалентное сопротивление схемы замещения, измеренное при частоте 50 Гц; $\text{Im } \underline{Z}_{эк}$ – мнимая составляющая комплексного эквивалентного сопротивления; $\text{Re } \underline{Z}_{эк}$ – действительная составляющая комплексного эквивалентного сопротивления;

▶ с использованием эквивалентных индуктивных и активных сопротивлений схемы замещения относительно расчетной точки короткого замыкания, полученных при поочередном исключении из схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений:

$$T_{a.эк} = \frac{X_{эк}(R=0)}{\omega_{\text{синх}} R_{эк}(X=0)}, \quad (5.45)$$

где $X_{\text{эк}(R=0)}$ – эквивалентное сопротивление схемы замещения при учете в ней различных элементов расчетной схемы только индуктивными сопротивлениями, т.е. при исключении всех активных сопротивлений; $R_{\text{эк}(X=0)}$ – эквивалентное сопротивление схемы замещения при исключении из нее всех индуктивных сопротивлений;

▶ с использованием составляющих комплексного эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно точки короткого замыкания, измеренного при частоте 20 Гц:

$$T_{\text{а.эк}} = 2,5 \frac{\text{Jm} Z_{\text{эк}(20)}}{\omega_{\text{синх}} \text{Re} Z_{\text{эк}(20)}}, \quad (5.46)$$

где $Z_{\text{эк}(20)}$ – комплексное эквивалентное сопротивление схемы замещения относительно расчетной точки короткого замыкания, измеренное при частоте 20 Гц; $\text{Jm} Z_{\text{эк}(20)}$ – мнимая составляющая указанного комплексного сопротивления; $\text{Re} Z_{\text{эк}(20)}$ – действительная составляющая этого сопротивления.

По отношению к точному решению применение первого метода обычно дает отрицательную погрешность (занижает значения постоянной времени), применение второго метода дает положительную погрешность (завышает значения постоянной времени). Погрешность, связанная с применением третьего метода, по абсолютной величине обычно меньше, чем при использовании первого и второго методов. При аналитических расчетах наиболее простым является второй метод. При расчетах с применением ЭВМ предпочтение следует отдавать первому и третьему методам.

Если расчетная точка короткого замыкания делит исходную расчетную схему на несколько независимых друг от друга частей, то при приближенных расчетах аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени ее следует определять как сумму аperiodических составляющих токов от отдельных частей схемы, полагая, что каждая из этих составляющих изменяется во времени с соответствующей эквивалентной постоянной времени, т.е.

$$i_{\text{ат}} = \sum_{i=1}^m i_{\text{а0}i} e^{-\frac{t}{T_{\text{а.эк}i}}}, \quad (5.47)$$

где m – число независимых частей схемы; $i_{\text{а0}i}$ – начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания от i -й части схемы; $T_{\text{а.эк}i}$ – эквивалентная постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания от i -й части схемы, определяемая по (5.44), (5.45) или (5.46).

5.6. Способы определения ударного коэффициента и соответственно ударного тока короткого замыкания

Способ расчета ударного коэффициента и ударного тока короткого замыкания зависит от требуемой точности расчета и конфигурации исходной расчетной схемы.

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, то для получения высокой точности расчета ударного тока короткого замыкания следует решить систему дифференциальных уравнений, составленных для мгновенных значений токов в узлах и падений напряжения в контурах расчетной схемы, и определить максимальное мгновенное значение тока в ветви, в которой находится расчетная точка короткого замыкания.

При расчете ударного тока короткого замыкания с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям короткого замыкания допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока короткого замыкания в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент короткого замыкания. Исключения составляют случаи, когда вблизи расчетной точки короткого замыкания включены асинхронные электродвигатели.

Если исходная расчетная схема содержит только последовательно включенные элементы, то ударный ток следует определять по формуле

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} K_{уд}, \quad (5.48)$$

где $K_{уд}$ – ударный коэффициент. Последний рекомендуется определять по одной из следующих формул:

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,5\pi + \varphi_k}{X_{эк}/R_{эк}}}, \quad (5.49)$$

где

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_{эк}}{R_{эк}} \quad (5.50)$$

или

$$K_{уд} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X_{эк}/R_{эк}}}. \quad (5.51)$$

В тех случаях, когда $X_{\text{эк}}/R_{\text{эк}} \geq 5$, ударный коэффициент допустимо определять по более простой формуле

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}, \quad (5.52)$$

где T_a – постоянная времени, определяемая по формуле (5.43).

Если исходная расчетная схема является многоконтурной, причем все источники энергии связаны с расчетной точкой короткого замыкания общим сопротивлением, то при приближенных расчетах ударного тока короткого замыкания, исходя из ранее принятого допущения об экспоненциальном характере изменения апериодической составляющей тока короткого замыкания, при использовании формулы (5.48) ударный коэффициент следует определять по формулам, аналогичным (5.49) и (5.51):

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,5\pi + \varphi_k}{\omega \sin \alpha} \frac{1}{T_{\text{а.эк}}}} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5 + \varphi_k/\pi)}{T_{\text{а.эк}}}} \quad (5.53)$$

и

$$K_{\text{уд}} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega \sin \alpha} \frac{1}{T_{\text{а.эк}}}}, \quad (5.54)$$

где $T_{\text{а.эк}}$ – эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания, определяемая по формулам (5.44), (5.45) или (5.46).

При $X_{\text{эк}}/R_{\text{эк}} \geq 5$ допустимо также использовать формулу, аналогичную (5.52):

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\text{а.эк}}}}. \quad (5.55)$$

В тех случаях, когда исходная расчетная схема является многоконтурной, но расчетная точка короткого замыкания делит ее на несколько независимых частей, то ударный ток допустимо принимать равным сумме ударных токов от соответствующих частей схемы, т.е.

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} \sum_{i=1}^m I_{\text{п0}i} K_{\text{уд}i}, \quad (5.56)$$

где $I_{\text{п0}i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от i -й части схемы; $K_{\text{уд}i}$ – ударный коэффициент тока короткого замыкания от i -й части схемы, определяемый по формулам (5.53), (5.54) или (5.55).

5.7. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени аналитическим способом

Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени в сложной разветвленной схеме с учетом переходных процессов в синхронных машинах, для которых короткое замыкание является близким, следует производить путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов, используя с этой целью ЭВМ, и выделения из найденного тока его периодической составляющей.

Если же исходная расчетная схема является радиальной и содержит только одну синхронную машину (или группу однотипных машин), а требуемая точность расчетов позволяет принять допущение, что при форсировке возбуждения напряжение на обмотке возбуждения мгновенно возрастает до предельного значения, то действительное значение периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени приближенно, без учета поперечной составляющей тока короткого замыкания, может быть определено с использованием формулы

$$\begin{aligned}
 I_{шт} = & \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{X'_{d(1d)} + X_{вщ}} - \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \\
 & + \left(\frac{E''_{q(0)}}{X''_d + X_{вщ}} - \frac{E'_{q(0)}}{X'_{d(1d)}} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \\
 & + \left(\frac{E_{qпр} - E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} \right) \left(1 - \frac{T'_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{T''_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \leq \frac{U_{ном}}{X_{вщ}},
 \end{aligned} \tag{5.57}$$

где $E_{q(0)}$ – синхронная ЭДС машины по поперечной оси к моменту короткого замыкания (допускается принимать эту ЭДС в относительных единицах численно равной отношению предшествующего тока возбуждения машины к ее току возбуждения при работе в режиме холостого хода с номинальным напряжением); $E''_{q(0)}$ и $E'_{q(0)}$ – соответственно сверхпереходная и переходная ЭДС машины по поперечной оси к моменту короткого замыкания; $E_{qпр}$ – предельное значение синхронной ЭДС машины по поперечной оси (в относительных единицах его можно считать равным отношению предельного тока возбуждения машины к

ее току возбуждения при работе в режиме холостого хода с номинальным напряжением); $X_{вщ}$ – внешнее сопротивление; T'_d и T''_d – постоянные времена затухания соответственно переходной и сверхпереходной составляющих тока короткого замыкания, с.

Эти постоянные времена связаны с T'_f и T'_{1d} соотношениями:

$$T'_d = T'_f + T'_{1d}$$

и

$$T''_d = \sigma' \frac{T'_f T'_{1d}}{T'_f + T'_{1d}}.$$

Постоянные времена T'_f и T'_{1d} и коэффициент рассеяния σ' рассчитываются по формулам:

$$T'_f = \frac{X'_f}{\omega_{\text{синх}} R_f} = \frac{X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{вщ}}}{\omega_{\text{синх}} R_f};$$

$$T'_{1d} = \frac{X'_{1d}}{\omega_{\text{синх}} R_{1d}} = \frac{X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{вщ}}}{\omega_{\text{синх}} R_{1d}};$$

$$\sigma' = 1 - \frac{(X_\sigma + X_{вщ})^2 X_{ad}^2}{\left[X_f (X_d + X_{вщ}) - X_{ad}^2 \right] \left[X_{1d} (X_d + X_{вщ}) - X_{ad}^2 \right]},$$

где X_f и R_f – индуктивное и активное сопротивления обмотки возбуждения; X_{1d} и R_{1d} – индуктивное и активное сопротивления продольного демпферного контура.

Параметр $X'_{d(1d)}$ определяется по формуле:

$$X'_{d(1d)} \approx (X_d + X_{вщ}) \frac{T'_f + T'_{1d}}{T_{f0} + T_{1d0}},$$

где

$$T_{f0} = \frac{X_f}{\omega_{\text{синх}} R_f}; \quad T_{1d0} = \frac{X_{1d}}{\omega_{\text{синх}} R_{1d}}.$$

Постоянная времени $T_{\sigma 1d}$ определяется по формуле:

$$T_{\sigma 1d} = \frac{X_{\sigma 1d}}{\omega_{\text{синх}} R_{1d}} = \frac{X_{1d} - X_{ad}}{\omega_{\text{синх}} R_{1d}}.$$

5.8. Практические методы расчета периодической составляющей тока короткого замыкания

Определение удаленности точки короткого замыкания от электрической машины

Высокая точность расчетов действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени может быть обеспечена лишь при учете влияния демпферных контуров синхронных машин, действия устройств для автоматического регулирования возбуждения, насыщения стали в зубцовой зоне якоря, изменения частоты вращения электрических машин, влияния подключенных нагрузок и других факторов.

Между тем в ряде случаев оказываются достаточными приближенные данные о токах короткого замыкания. В частности, в проектной практике широкое применение нашли так называемые практические методы расчета действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания.

При использовании практических методов необходимо знать только удаленность точки короткого замыкания от источника энергии (генератора или электродвигателя). Обычно под удаленностью точки короткого замыкания понимают приведенное к номинальной мощности и номинальному напряжению машины сопротивление внешней цепи до точки короткого замыкания, т.е. сопротивление элементов энергосистемы (трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий и т.д.), которые при коротком замыкании оказываются включенными между источником энергии и точкой короткого замыкания. Однако такая оценка удаленности применима лишь в тех случаях, когда расчетная схема содержит только одну электрическую машину или несколько однотипных и одинаково удаленных от точки короткого замыкания машин. Более удобной и универсальной величиной, которая в полной мере характеризует удаленность точки короткого замыкания от генератора (электродвигателя) и может быть определена в любой схеме и при любом числе машин, является отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный момент короткого замыкания $I_{п0}$ к его номинальному току $I_{ном}$, т.е.

$$I_{* \text{ п0(ном)}} = \frac{I_{\text{п0}}}{I_{\text{ном}}}. \quad (5.58)$$

Это выражение целесообразно применять в тех случаях, когда между генератором (электродвигателем) и точкой короткого замыкания нет трансформаторов. В общем случае, когда генератор (электродвигатель) и точка короткого замыкания находятся на разных

степеньях напряжения и действующее значение периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания $I_{п0}$ приведено к той ступени напряжения, на которой находится точка короткого замыкания, относительное значение периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный момент короткого замыкания $I_{*п0(ном)}$ следует определять как

$$I_{*п0(ном)} = \frac{I_{п0}}{I_{ном}} = \sqrt{3} I_{п0} \frac{U_{ном}}{S_{ном}}, \quad (5.59)$$

где $I_{ном}$ и $U_{ном}$ – соответственно номинальный ток и номинальное напряжение генератора (электродвигателя), приведенные к той ступени напряжения сети, на которой находится точка короткого замыкания.

Если расчеты тока короткого замыкания проводятся с использованием системы относительных единиц при произвольно выбранных базисных условиях, то относительное значение периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный момент короткого замыкания, определяющее удаленность точки короткого замыкания, целесообразно находить по формуле

$$I_{*п0(ном)} = I_{*п0(б)} \frac{S_б}{S_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_б}, \quad (5.60)$$

где $I_{*п0(б)}$ – действующее значение периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный момент короткого замыкания, выраженное в относительных единицах при произвольно выбранных базисных условиях;

$S_б$ и $U_б$ – базисные мощность и напряжение той ступени напряжения, на которой находится генератор (электродвигатель);

$U_{ном}$ – номинальное напряжение генератора (электродвигателя).

В зависимости от удаленности точки короткого замыкания от генератора (электродвигателя) все короткие замыкания делят на *удаленные* и *близкие*. Удаленными называют такие короткие замыкания, при которых амплитуды периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный и произвольный моменты времени практически одинаковы, а близкими – короткие замыкания, при которых амплитуды периодической составляющей тока машины в начальный и произвольный моменты времени существенно отличаются. Обычно короткое замыкание считают удаленным, если отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора (электродвигателя) в начальный момент короткого замыкания к номинальному току машины менее 2, т.е. если $I_{*п0(ном)} < 2$, и близким, если $I_{*п0(ном)} \geq 2$.

Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых

Наиболее распространенным практическим методом расчета действующего значения периодической составляющей тока в произвольный момент времени при близких коротких замыканиях является метод типовых кривых. В отличие от других этот метод позволяет, используя единые кривые, определить ток короткого замыкания от разнотипных генераторов (электродвигателей), даже если числовые значения их одноименных параметров существенно отличаются (исключение составляют турбогенераторы мощностью более 500 МВт). Это достигается за счет того, что периодическая составляющая тока короткого замыкания в любой момент времени отнесена не к номинальному току машины, как это имело место в применяемом ранее методе расчетных кривых, а к действующему значению периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания. В качестве примера на рис. 5.7 приведены кривые $\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{п0}}} = f(t)$ для турбогенераторов типов ТВВ-200-2 (кривая 1), ТВВ-320-2 (кривая 2) и ТВВ-500-2 (кривая 3) при коротком замыкании на выводах этих генераторов. Нетрудно видеть, что для турбогенераторов мощностью 200 и 320 МВт кривые весьма близки друг к другу. Существенно дальше лежит кривая для турбогенератора мощностью 500 МВт. По мере удаления точки короткого замыкания от генераторов все кривые $\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{п0}}} = f(t)$ приближаются друг к другу.

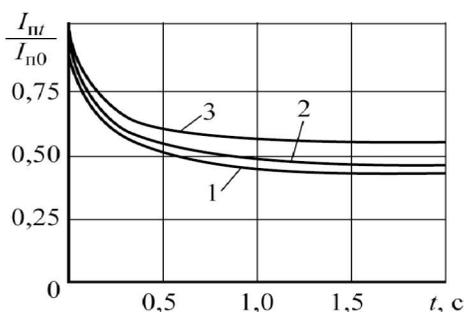


Рис. 5.7. Изменение во времени отношений действующих значений периодической составляющей тока в произвольный момент времени и в начальный момент короткого замыкания при коротком замыкании на выводах генераторов разных типов: 1 – ТВВ-200-2; 2 – ТВВ-320-2; 3 – ТВВ-500-2

Важным преимуществом метода типовых кривых перед другими методами является также его применимость при любой предшествующей нагрузке генератора (электродвигателя) и весьма малая зависимость результатов расчетов от места подключения нагрузки.

Метод типовых кривых основан на использовании кривых изменения во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (синхронного компенсатора, электродвигателя), отнесенного к его начальному значению, т.е. $\gamma_{пт} = \frac{I_{пт}}{I_{п0}}$ при разных удаленностях точки короткого замы-

кания. Типовые кривые для синхронных генераторов и синхронных компенсаторов с тиристорной независимой системой возбуждения приведены на рис. 5.8. При их построении кратность предельного установившегося напряжения возбуждения по отношению к номинальному напряжению возбуждения (кратность форсировки возбуждения) была принята равной двум, а постоянная времени нарастания напряжения возбуждения синхронной машины при форсировке возбуждения равной нулю.

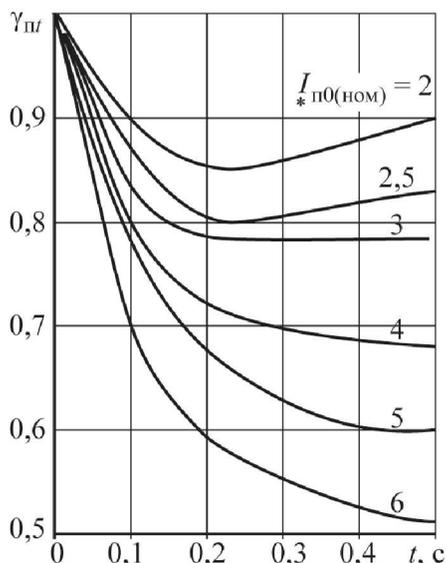


Рис. 5.8. Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных генераторов (компенсаторов) с тиристорной независимой системой возбуждения, выраженного в долях от его значения в начальный момент короткого замыкания

Если исходная расчетная схема содержит только один синхронный генератор (компенсатор), то расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в заданный момент времени с использованием метода типовых кривых производят в следующем порядке.

1. По исходной расчетной схеме составляют схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронной машины, т.е. схему, в которой синхронный генератор (компенсатор) учитывают сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС, найденной с учетом предшествующей нагрузки машины.

2. Находят эквивалентное индуктивное сопротивление элементов схемы замещения относительно точки короткого замыкания $X_{\text{ЭК}}$ и определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора (компенсатора) при коротком замыкании

$$I_{\text{п0}} = \frac{E_0''}{X_{\text{ЭК}}}. \quad (5.61)$$

3. По одной из формул (5.58), (5.59) или (5.60) находят начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора (компенсатора), отнесенное к номинальному току машины, т.е. $I_{* \text{п0(ном)}}$. Если $I_{* \text{п0(ном)}} \geq 2$, то расчет ведут с применением типовых кривых. С этой целью находят типовую кривую, соответствующую полученному значению тока $I_{* \text{п0(ном)}}$. Если последнее оказывается дробным числом, то его округляют до ближайшего целого числа (при небольшой разнице между дробным и целым числами) или производят интерполяцию кривых.

4. По выбранной кривой определяют отношение действующих значений периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (компенсатора) в расчетный и начальный моменты времени, т.е. $\gamma_{\text{пт}} = \frac{I_{\text{пт}}}{I_{\text{п0}}}$.

5. Определяют искомое действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в расчетный момент времени:

$$I_{\text{пт}} = \gamma_{\text{пт}} I_{\text{п0}} = \gamma_{\text{пт}} I_{* \text{п0(ном)}} I_{\text{ном}} = \gamma_{\text{пт}} I_{* \text{п0(б)}} I_{\text{б}}. \quad (5.62)$$

В тех случаях, когда $I_{* \text{п0(ном)}} < 2$, действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания мало изменяется во времени, поэтому принимают $I_{\text{пт}} = I_{\text{п0}}$.

Если расчетная схема содержит несколько однотипных синхронных генераторов (компенсаторов) и они находятся в одинаковых условиях по отношению к точке короткого замыкания, то расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени ведут в том же порядке, только все генераторы (компенсаторы) заменяют одним эквивалентным, т.е. соответствующие ветви в схеме замещения эквивалентизируют, а в формулу (5.59) или (5.60) вместо номинальной мощности одной машины подставляют сумму номинальных мощностей всех машин.

В тех случаях, когда исходная расчетная схема содержит несколько генераторов или компенсаторов, причем они находятся на разном удалении от точки короткого замыкания, но связаны с ней независимо друг от друга, то при определении периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в произвольный момент времени изложенным выше способом находят значения этой составляющей от отдельных машин и затем результаты суммируют.

В общем случае, когда расчетная схема является сложной, т.е. содержит несколько разноудаленных от расчетной точки короткого замыкания источников энергии и при коротком замыкании эти источники оказываются связанными с точкой повреждения не независимо друг от друга, а через какой-либо общий элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи и т.д.), при расчете действующего значения периодической составляющей тока в месте трехфазного короткого замыкания в произвольный момент времени следует учитывать влияние переходного процесса в ближайшем к месту короткого замыкания генераторе (компенсаторе) на изменение во времени указанной составляющей тока короткого замыкания. Это влияние характеризуется коэффициентом

$$\gamma_{kt} = \frac{I_{kt}}{I_{k0}},$$

где I_{kt} и I_{k0} – действующие значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания соответственно в рассматриваемый момент времени и в начальный момент короткого замыкания.

Для определения коэффициента γ_{kt} исходную схему замещения следует преобразовать в трехлучевую звезду, причем так, чтобы ближайший к месту короткого замыкания генератор (компенсатор) и последовательно соединенные с ним элементы были представлены в виде отдельной ветви с включенными в нее сверхпереходной ЭДС генератора (компенсатора) E_G'' , найденной из предшествующего установившегося режима, и суммарным сопротивлением всех элементов этой ветви X_G (рис. 5.9), а более удаленные источники энергии и связывающие их линии электропередачи, трансформаторы и т.д. вместе с остальной частью электроэнергетической системы были

представлены в виде другой ветви с включенной в нее неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС удаленных источников и системы E_{GS} и эквивалентным сопротивлением X_{GS} . В третью ветвь включают сопротивление элемента, который при коротком замыкании связывает обе ветви, содержащие ЭДС, с точкой короткого замыкания.

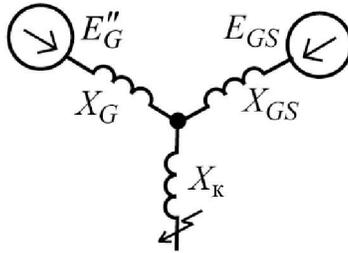


Рис. 5.9. Расчетная схема для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания с учетом влияния переходного процесса в ближайшем к месту короткого замыкания генераторе

Из полученной схемы легко найти действующие значения периодической составляющей тока генератора (компенсатора) и тока в месте короткого замыкания в начальный момент короткого замыкания, т.е. $I_{п0}$ и $I_{к0}$. По ним определяют $I_{*п0(ном)}$ и $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$. При этом могут быть разные слу-

чай. Если $I_{*п0(ном)} < 2$ или $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} < 0,5$, либо одновременно $I_{*п0(ном)} < 2$ и

$\frac{I_{п0}}{I_{к0}} < 0,5$, то принимают, что действующее значение периодической со-

ставляющей тока в месте короткого замыкания остается неизменным во

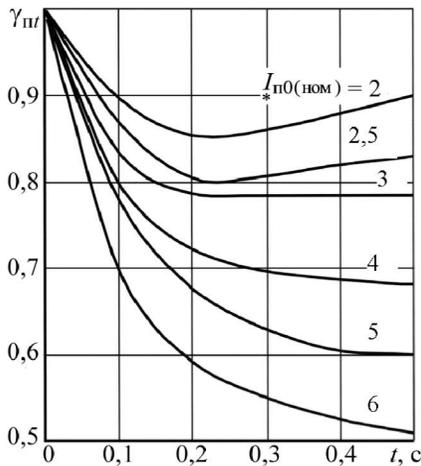
времени, т.е. $\gamma_{кт} = 1$. Если же одновременно $I_{*п0(ном)} \geq 2$ и $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} \geq 0,5$, т.е.

для выделенного генератора (компенсатора) короткое замыкание является близким и его влияние на изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания оказывается существенным, то для определения значения этого тока в заданный момент времени необходимо сначала для этого момента найти значение коэффициента $\gamma_{кт}$. Его приближенное значение может быть определено с помощью вспомогательных кривых

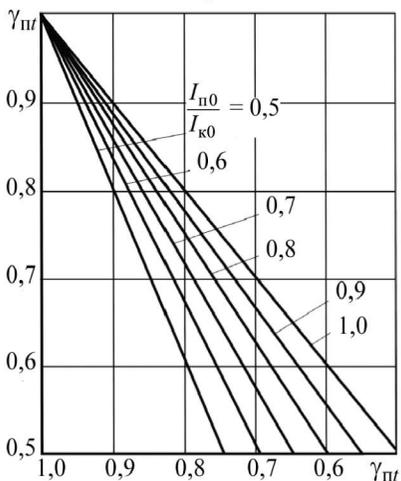
$\gamma_{кт} = f(\gamma_{пт})$, построенных для разных отношений $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$, в пределах

от 1 до 0,5. Такие кривые приведены на рис. 5.10 совместно с типо-

выми кривыми для синхронного генератора с тиристорной независимой системой возбуждения. Для удобства пользования кривыми $\gamma_{kt} = f(\gamma_{пт})$ ось $\gamma_{пт}$ расположена вертикально, а ось γ_{kt} – горизонтально, причем в начале координат $\gamma_{kt} = 1$, а по мере удаления от начала координат значения γ_{kt} уменьшаются.



а



б

Рис. 5.10. Кривые для определения отношения действующих значений периодической составляющей тока короткого замыкания от нескольких источников энергии в произвольный момент времени и в начальный момент короткого замыкания с учетом влияния переходного процесса в ближайшем к месту короткого замыкания генераторе: а – кривые $\gamma_{пт} = f(t)$; б – кривые $\gamma_{kt} = f(\gamma_{пт})$

Расчет действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени с использованием кривых $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$ проводят в следующем порядке.

1. В соответствии с заданной расчетной схемой составляют схему замещения для определения начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания.

2. Путем преобразования схемы замещения в звезду находят эквивалентные индуктивные сопротивления ветвей ближайшего к месту короткого замыкания генератора (компенсатора) X_G и источников с неизменной по амплитуде ЭДС X_{GS} до узловой точки (рис. 5.9), эквивалентную ЭДС E_{GS} , а также индуктивное сопротивление общего элемента X_K , который связывает генератор (компенсатор) и систему с точкой короткого замыкания.

3. Зная E_G'' и E_{GS} , находят эквивалентную ЭДС ветвей генератора (компенсатора) и системы $E_{ЭК}$, эквивалентное индуктивное сопротивление всех элементов расчетной схемы до точки короткого замыкания $X_{ЭК}$ и определяют начальное действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания

$$I_{к0} = \frac{E_{ЭК}}{X_{ЭК}}. \quad (5.63)$$

4. Находят начальное действующее значение периодической составляющей тока в ветви генератора (компенсатора)

$$I_{п0} = \frac{E_G'' - X_K I_{к0}}{X_G}. \quad (5.64)$$

5. Определяют $I_{*п0(ном)}$, а также отношение $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$.

6. Если $I_{*п0(ном)} \geq 2$ и $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} \geq 0,5$, то на рис. 5.10,а выбирают

кривую $\gamma_{nt} = f(t)$, соответствующую найденному значению $I_{*п0(ном)}$, а

на рис. 5.10,б – кривую $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$, соответствующую найденному

значению $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$, и для заданного расчетного момента времени t по вы-

бранной кривой $\gamma_{nt} = f(t)$ определяют γ_{nt} , а затем, используя выбранную кривую $\gamma_{kt} = f(\gamma_{nt})$, по полученному γ_{nt} определяют γ_{kt} .

Искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени составляет

$$I_{kt} = \gamma_{kt} I_{к0} = \gamma_{kt} I_{*к0(б)} I_{б}. \quad (5.65)$$

Для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени от синхронных и асинхронных электродвигателей также применяют метод типовых кривых. Соответствующие типовые кривые для этих электродвигателей приведены на рис. 5.11 и 5.12.

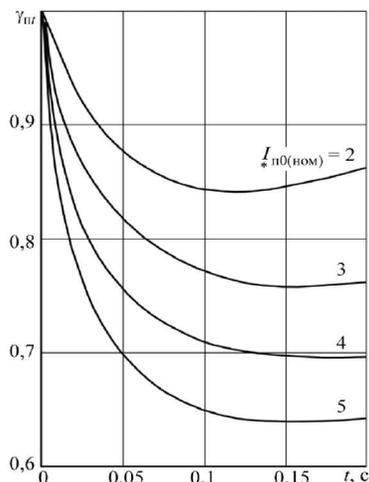


Рис. 5.11. Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных электродвигателей, выраженного в долях от его значения в начальный момент короткого замыкания

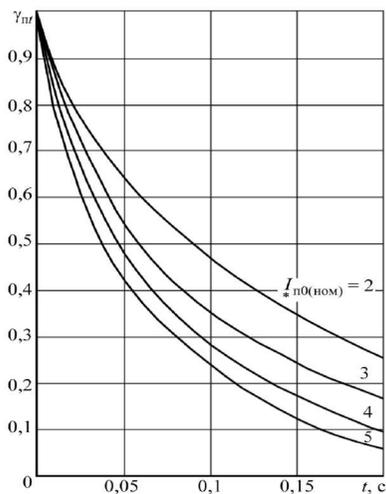


Рис. 5.12. Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от асинхронных электродвигателей, выраженного в долях от его значения в начальный момент короткого замыкания

ГЛАВА ШЕСТАЯ

МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

6.1. Методы, используемые при расчетах несимметричных режимов

В трехфазных электрических цепях возможны поперечные и продольные несимметрии. К первым относятся несимметричные короткие замыкания, т.е. замыкания между какими-либо двумя фазами, а также между одной или двумя фазами и землей. Ко вторым – несимметрии, обусловленные неравенством сопротивлений разных фаз, в частности, последовательно включенными в разные фазы какими-либо элементами с неодинаковым сопротивлением, а также обрывами проводников одной или двух фаз.

Для расчета несимметричных режимов линейных трехфазных электрических цепей можно использовать следующие методы:

- «классический» метод, при котором в систему уравнений, описывающих состояние соответствующей электрической цепи, входят действительные (полные) токи и напряжения фаз;

- метод симметричных составляющих, который, как известно, основан на представлении любой трехфазной системы величин (токов, напряжений, ЭДС) в виде суммы в общем случае трех симметричных систем соответствующих величин, называемых симметричными составляющими системами данной несимметричной системы величин.

Поскольку при несимметричных режимах электрических цепей, в частности, при несимметричных коротких замыканиях и обрывах проводников фаз токи фаз, фазные и линейные напряжения, падения напряжения в элементах цепей несимметричны, то при использовании первого метода схема замещения и соответствующие уравнения состояния должны составляться для всех фаз с учетом взаимной индукции между ними. Поэтому расчет таким методом оказывается громоздким даже при простой исходной схеме. А при наличии в исходных данных явнополусных синхронных машин расчет дополни-

тельно усложняется, так как подлежащие учету индуктивности фазных обмоток таких машин и взаимные индуктивности между этими обмотками, как было показано ранее, периодически изменяются.

При расчетах несимметричных режимов трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих сначала определяют симметричные составляющие токов и напряжений, а затем по этим составляющим находят искомые токи и напряжения. Таким образом, применение указанного метода расчета несимметричных режимов предполагает использование принципа наложения, поэтому этот метод применим только к линейным цепям. Метод симметричных составляющих позволяет существенно упростить расчет несимметричных режимов трехфазной цепи, если она симметрична, т.е. сопротивление всех фаз этой цепи отдельно для каждой симметричной системы токов одинаковы, а причиной нарушения симметрии является возникновение в одной или двух точках цепи поперечной или продольной несимметрии. При этом условия симметричные системы токов любой последовательности определяются только составляющими напряжений той же самой последовательности и соответственно симметричные системы падения напряжения на любом симметричном элементе электрической цепи связаны законом Ома с симметричными системами токов только одноименной последовательности, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_2 &= \underline{Z}_2 \dot{I}_2; \\ \Delta \dot{U}_0 &= \underline{Z}_0 \dot{I}_0, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_0 – комплексы сопротивлений симметричного трехфазного элемента электрической цепи соответственно для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей или, сокращенно, комплексы сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элемента.

Выражение (6.1) показывает, что анализ несимметричных режимов линейных трехфазных симметричных цепей с помощью метода симметричных составляющих сводится к анализу трех симметричных систем, причем расчет для каждой последовательности можно вести независимо друг от друга. Кроме того, при расчете достаточно составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей только для одной фазы. Это значительно упрощает расчеты, в том числе и в цепях с явнополюсными синхронными машинами, так как последние, как и другие элементы цепей, учитываются в соответствующих схемах замещения сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые принимаются постоянными и имеют простой физический смысл.

Если же линейная электрическая цепь содержит трехфазный несимметричный элемент, то падение напряжения любой последовательности в этом элементе связано линейной зависимостью с токами всех последовательностей, причем коэффициенты при токах отдельных последовательностей являются функциями сопротивлений всех фаз. Поэтому применение метода симметричных составляющих в этом случае связано со сложными вычислениями.

В электрических системах не все трехфазные элементы симметричны. В частности, трехфазные трехстержневые трансформаторы, строго говоря, являются несимметричными устройствами ввиду неодинакового взаимного расположения обмоток разных фаз. Однако эта несимметрия существенно проявляется лишь на холостом ходу и не имеет практического значения при нагруженных обмотках вследствие относительной малости токов холостого хода. Не все трехфазные машины с вращающимся ротором являются симметричными. Симметричны лишь те из них, у которых трехфазная обмотка якоря симметрична, а токи соответствующих контуров ротора создают круговое вращающееся магнитное поле. Поэтому асинхронные машины с короткозамкнутым и фазным ротором симметричны, а синхронные машины, имеющие на роторе контуры с различными параметрами по его продольной и поперечной осям, несимметричны. Тем не менее при практических расчетах несимметричных режимов и такие машины можно считать симметричными. Принимаются и специальные меры по обеспечению симметрии отдельных элементов электроэнергетических систем. К ним, в частности, относится транспозиция проводов воздушных линий электропередачи. Поэтому современные электрические системы практически симметричны. Это обстоятельство позволяет рассчитывать несимметричные режимы, связанные с возникновением несимметрии в одной или двух точках системы, с использованием метода симметричных составляющих, рассматривая все элементы системы симметричными. При этом вычисления токов и напряжений при продольной или поперечной несимметрии фактически сводятся к вычислению токов и напряжений эквивалентного симметричного режима.

При несимметричном режиме синхронной машины помимо основного магнитного поля, созданного током возбуждения, с обмоткой якоря связаны и другие магнитные поля:

- вращающиеся синхронно с ротором магнитные поля реакции и рассеяния обмотки якоря, вызванные токами прямой последовательности этой обмотки;
- обратносинхронное магнитное поле, обусловленное токами обратной последовательности обмотки якоря и соответствующими токами контуров ротора, которые являются следствием электромагнитной (трансформаторной) связи этих контуров с обмоткой якоря машины;
- магнитное поле рассеяния от токов нулевой последовательности обмотки якоря.

Перечисленные магнитные поля, обусловленные токами прямой, обратной и нулевой последовательностей обмотки якоря синхронной машины, наводят в этой обмотке ЭДС самоиндукции, пропорциональные токам соответствующих последовательностей. Поскольку эти токи при расчете несимметричного режима являются искомыми величинами, то указанные ЭДС также неизвестны. Поэтому целесообразно последние рассматривать как взятые с обратным знаком падения напряжения от отдельных симметричных составляющих тока обмотки якоря соответственно в индуктивных сопротивлениях прямой, обратной и нулевой последовательностей синхронной машины, а в схему замещения в явном виде вводить только те ЭДС машины, которые не зависят от искомым токов, например, переходную или сверхпереходную ЭДС, найденную из предшествующего режима, или синхронную ЭДС при расчете установившегося режима. Система указанных фазных ЭДС синхронной машины вследствие симметрии ее устройства содержит только составляющие прямой

последовательности, т.е. $\dot{E}_1 \neq 0$, а $\dot{E}_2 = 0$ и $\dot{E}_0 = 0$. Отсюда следует, что токи обратной и нулевой последовательностей, за отсутствием ЭДС этих последовательностей, определяются только соответствующими напряжениями в местах возникновения поперечной или продольной несимметрии. Таким образом токи обратной и нулевой последовательностей являются уравнительными токами, возникающими под влиянием возникшей асимметрии электрической системы.

Кроме упомянутых выше магнитных полей в синхронных машинах при несимметричных режимах возникают и другие магнитные поля, в результате влияния которых в токе обмотки якоря появляются высшие гармонические составляющие, о чем пойдет речь ниже. Между тем метод симметричных составляющих применим только к величинам, изменяющимся во времени по синусоидальному закону. Однако при расчете несимметричных режимов электроэнергетических систем обычно учитывают лишь основную гармонику токов и напряжений. Это позволяет использовать метод симметричных составляющих не только для расчета несимметричных установившихся режимов, но и несимметричных переходных процессов.

6.2. Образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронных машин

Ротор синхронной машины не является симметричным устройством. Поэтому при несимметричных режимах токи и напряжения содержат высшие гармонические составляющие. Чтобы выявить физическую картину процесса, рассмотрим однофазное или двухфазное

короткое замыкание и предположим сначала, что на роторе машины помимо обмотки возбуждения нет никаких демпферных контуров.

Как при однофазном, так и при двухфазном коротком замыкании в цепи якоря синхронной машины образуется однофазный короткозамкнутый контур. Циркулирующий по этому контуру переменный ток синхронной частоты f создает пульсирующее магнитное поле. Последнее, как известно, можно представить как два поля, вращающихся с синхронной угловой скоростью $\omega_{\text{синх}}$ в противоположных направлениях. Прямовращающееся поле, т.е. поле, которое вращается в направлении вращения ротора, по отношению к последнему оказывается неподвижным и таким образом трансформаторно связанным с магнитным полем, созданным током возбуждения. Обратновращающееся поле, т.е. поле, которое вращается в противоположном направлении, по отношению к ротору перемещается с двойной угловой скоростью $2\omega_{\text{синх}}$ и индуцирует в обмотке возбуждения ЭДС двойной частоты. Поскольку обмотка возбуждения замкнута через возбудитель, в ней возникает ток двойной частоты $2f$, который создает магнитное поле, пульсирующее с двойной частотой. Последнее также можно разложить на два магнитных поля, вращающихся в противоположные стороны с угловой скоростью $2\omega_{\text{синх}}$ относительно ротора. Обратновращающееся поле по отношению к якорю движется с угловой скоростью $2\omega_{\text{синх}} - \omega_{\text{синх}} = \omega_{\text{синх}}$, т.е. с синхронной скоростью в направлении противоположном направлению вращения ротора и оказывается неподвижным относительно магнитного поля, вызвавшего в обмотке возбуждения ток двойной частоты, частично компенсируя это поле. Прямовращающееся поле по отношению к якорю движется с тройной угловой скоростью в направлении вращения ротора и индуцирует в обмотке якоря ЭДС тройной частоты, результатом чего является возникновение в токе якоря третьей гармонической составляющей. Последняя создает магнитное поле, пульсирующее с тройной частотой, которое опять можно разложить на прямо- и обратновращающиеся поля. Обратное поле индуцирует в обмотке возбуждения ЭДС частоты $4f$, под действием которой в токе возбуждения возникает четвертая гармоническая составляющая и т.д. Таким образом, появление в обмотке якоря синхронной машины однофазного переменного тока влечет за собой возникновение в нем нечетных гармонических и в токе обмотки возбуждения четных гармонических составляющих.

В момент возникновения несимметричного режима помимо указанных гармонических составляющих в токе обмотки якоря синхронной машины появляются свободные четные гармонические составляющие, а в токе обмотки возбуждения – свободные нечетные гармонические составляющие, что является результатом влияния свободного апериодического тока якоря. Физически это объясняется следующим образом. Апериодический ток якоря создает неподвижное в пространстве магнитное поле, под действием которого в обмот-

ке возбуждения, вращающейся относительно этого поля с синхронной угловой скоростью, наводится переменный ток синхронной частоты. Последний создает магнитное поле, которое относительно ротора пульсирует с синхронной частотой. Представив это поле в виде двух полей, вращающихся в противоположных направлениях относительно ротора с синхронной угловой скоростью, легко увидеть, что обратновращающееся поле по отношению к якору оказывается неподвижным, а прямо-вращающееся магнитное поле – вращается с двойной синхронной угловой скоростью и наводит в обмотке якоря переменный ток двойной частоты. Поскольку при несимметричном коротком замыкании в цепи якоря образуется однофазный короткозамкнутый контур, то указанный ток двойной частоты создает магнитное поле, пульсирующее с двойной частотой. Разложив это поле на два поля, вращающихся в противоположных направлениях с угловой скоростью $2\omega_{\text{синх}}$ относительно якоря, обнаружим, что в результате действия обратновращающегося поля в обмотке возбуждения появляется переменный ток тройной частоты. Наличие этого тока приводит к возникновению в обмотке якоря тока частоты $4f$ и т.д. Вместе с затуханием свободного апериодического тока якоря с той же постоянной времени T_a затухают амплитуды четных гармонических составляющих тока обмотки якоря и нечетных гармонических составляющих тока обмотки возбуждения.

Если бы ротор синхронной машины обладал полной магнитной и электрической симметрией, как короткозамкнутый ротор асинхронной машины, то и пульсирующее магнитное поле, вызванное однофазным переменным током синхронной частоты обмотки якоря, и магнитное поле, вызванное апериодической составляющей тока якоря, не могли бы создать высших гармонических составляющих. Это объясняется тем, что такой ротор симметричен по отношению к любому вращающемуся относительно него магнитному полю. При этом возникающие в его обмотках токи создают вращающиеся магнитные поля, которые по отношению к соответствующим вращающимся магнитным полям от токов якоря оказываются неподвижными и направленными навстречу, ослабляя эти поля (а при малом активном сопротивлении проводников ротора магнитные поля от токов якоря почти полностью вытесняются за пределы контуров ротора).

Ротор любой реальной синхронной машины, даже турбогенератора, не обладает полной магнитной и электрической симметрией. Поэтому при несимметричном режиме синхронной машины как в токе обмотки якоря, так и в токе обмотки возбуждения возникают высшие гармонические составляющие. Однако при наличии демпферных контуров в обеих осях ротора синхронной машины (а у турбогенераторов роль демпферных контуров выполняет стальной массив ротора) степень несимметрии ротора незначительна. Поэтому при несимметричных режимах таких машин высшие гармонические составляющие почти не проявляются.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

7.1. Постановка задачи

Для расчета различных несимметричных режимов с использованием метода симметричных составляющих предварительно по исходной расчетной схеме должны быть составлены в общем случае схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Необходимость этих схем определяется тем, что ток прямой последовательности, как будет показано ниже, и при поперечной, и при продольной несимметрии зависит от эквивалентных сопротивлений схем замещения различных последовательностей. Кроме того, подлежащие определению симметричные составляющие токов в произвольной ветви и напряжений в любом узле исходной расчетной схемы определяются из схем замещения соответствующих последовательностей.

При аналитических расчетах несимметричных режимов схемы замещения всех последовательностей составляют или в именованных единицах с приведением параметров всех элементов исходной расчетной схемы к основной ступени напряжения сети, или в относительных единицах при предварительно выбранных базисных единицах.

7.2. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей

Схема замещения прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании аналогична схеме при трехфазном коротком замыкании, причем в зависимости от расчетного момента времени и применяемого метода расчета тока короткого замыкания синхронные генераторы (синхронные компенсаторы) и нагрузки вво-

дят в схему замещения соответствующими ЭДС и сопротивлениями. Сопротивления остальных элементов не зависят от расчетного момента времени. Поскольку при любом несимметричном коротком замыкании напряжение прямой последовательности в точке коротко-

го замыкания \dot{U}_{K1} не равно нулю, его вводят в схему замещения прямой последовательности. Обычно на этой схеме показывают также весь контур, по которому замыкается ток прямой последовательности (см. рис. 7.1,а, на котором изображена схема замещения прямой последовательности в преобразованном виде).

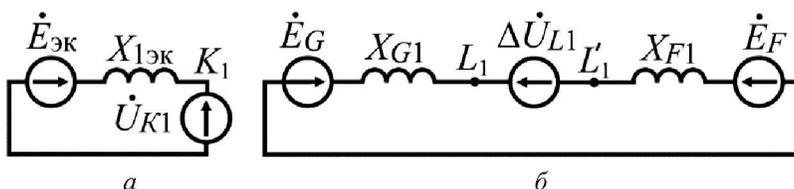


Рис. 7.1. Схемы замещения прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании (а) и при продольной несимметрии (б)

Схема замещения прямой последовательности при продольной несимметрии отличается от одноименной схемы замещения при несимметричном коротком замыкании тем, что в результате появления продольной несимметрии между произвольными точками L_1 и L'_1 схема замещения делится на две части с неодинаковыми потенциалами в точках L_1 и L'_1 (см. рис. 7.1,б, где \dot{E}_G и X_{G1} – эквивалентная ЭДС и эквивалентное сопротивление прямой последовательности одной части схемы замещения, \dot{E}_F и X_{F1} – соответствующие параметры второй части схемы замещения). Поэтому в схеме замещения прямой последовательности между точками L_1 и L'_1 включается противоЭДС, равная падению напряжения прямой последовательности $\Delta \dot{U}_{L1}$. При этом указанные две части схемы замещения оказываются включенными последовательно с $\Delta \dot{U}_{L1}$ (отсюда термин «продольная несимметрия»).

Схемы замещения обратной последовательности при несимметричном коротком замыкании и при продольной несимметрии по своей структуре не отличаются от соответствующих схем замещения прямой последовательности, так как пути циркуляции токов прямой и обратной последовательностей при несимметрии одого и того же

вида (поперечной или продольной) одинаковы. Только ЭДС обратной последовательности источников энергии, как было показано ранее, принимают равными нулю.

Ток обратной последовательности при несимметричном повреждении является следствием возникшего в месте повреждения напряжения обратной последовательности. Поэтому в схему замещения обратной последовательности при несимметричном коротком замыкании вводят напряжение обратной последовательности в месте

короткого замыкания \dot{U}_{K2} (см. рис. 7.2,а), а в схему замещения обратной последовательности при продольной несимметрии – падение

напряжения обратной последовательности $\Delta\dot{U}_{L2}$ между точками L_2 и L'_2 (см. рис. 7.2,б).

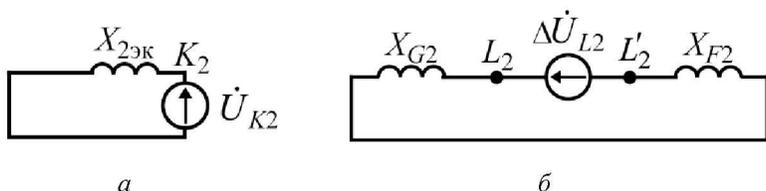


Рис. 7.2. Схемы замещения обратной последовательности при несимметричном коротком замыкании (а) и при продольной несимметрии (б)

У каждой схемы замещения, используемой при расчетах несимметричных режимов, обычно различают *начало* и *конец*. У схем замещения прямой и обратной последовательностей, используемых для расчета несимметричных коротких замыканий или продольной несимметрии, за начало схемы принимают точку, в которой объединены нейтрали генераторов и концы нагрузочных ветвей. Потенциал начала схемы замещения равен нулю (правда, потенциал начала схемы замещения обратной последовательности, как и других ее точек, как будет показано ниже (см. гл. 8 – 10), иногда искусственно смещают, чтобы получить так называемую простую комплексную схему замещения).

Концом схемы замещения прямой или обратной последовательности при несимметричном коротком замыкании считают точку, где произошло замыкание. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей при продольной несимметрии имеют по два конца. Ими являются точки L_1 и L'_1 в схеме прямой последовательности и точки L_2 и L'_2 в схеме обратной последовательности (см. рис. 7.1,б

и 7.2,б), между которыми имеются разности потенциалов соответственно $\Delta \dot{U}_{L1}$ и $\Delta \dot{U}_{L2}$.

За положительное направление токов прямой и обратной последовательностей при несимметричном коротком замыкании принимают направление от начала к концу схемы замещения, а при продольной несимметрии за положительное направление токов обычно принимают направление от той части схемы прямой последовательности (к месту несимметрии), которая имеет большую эквивалентную ЭДС.

7.3. Схемы замещения нулевой последовательности

Схемы замещения нулевой последовательности как при несимметричных коротких замыканиях, так и при продольной несимметрии резко отличаются от схем замещения прямой и обратной последовательностей, так как пути циркуляции токов прямой (обратной) и нулевой последовательностей неодинаковы. Ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, разветвленным между тремя фазами, т.е. для него все фазы трехфазной цепи являются тремя параллельно включенными ветвями, обладающими одинаковым сопротивлением. При этом конфигурация схемы замещения нулевой последовательности в значительной мере определяется числом и схемами соединения обмоток трансформаторов и автотрансформаторов, содержащихся в исходной расчетной схеме. Поэтому методика составления схемы замещения нулевой последовательности имеет свои особенности и иногда оказывается довольно сложной.

Схему замещения нулевой последовательности необходимо составлять, начиная от ее конца (концов), т.е. от места возникновения поперечной или продольной несимметрии. В частности, чтобы составить схему замещения нулевой последовательности при несимметричном коротком замыкании, необходимо представить, что в точке короткого замыкания K_0 все три фазы трехфазной цепи соединены между собой и между полученной перемычкой и землей включен

источник напряжения \dot{U}_{K0} (см. рис. 7.3,а). А при составлении схемы замещения нулевой последовательности в случае продольной несимметрии следует представить, что как в точке L_0 , так и в точке L'_0 , ограничивающих место возникновения продольной несимметрии, все три фазы трехфазной цепи соединены между собой и между точками

L_0 и L'_0 (т.е. последовательно с параллельно включенными проводниками всех фаз) включен источник напряжения $\Delta\dot{U}_{L0}$ (см. рис. 7.3,б). Именно следствием возникновения при несимметричных режимах напряжений \dot{U}_{K0} и $\Delta\dot{U}_{L0}$ являются токи нулевой последовательности.

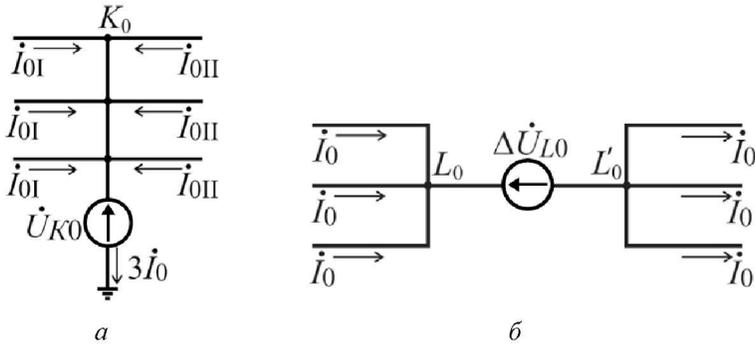


Рис. 7.3. Концы схем замещения нулевой последовательности при несимметричном коротком замыкании (а) и при продольной несимметрии (б):

I_{0I} – токи в левой части линии; I_{0II} – токи в правой части линии

Включив источник напряжения нулевой последовательности по схеме, соответствующей заданному виду несимметрии, сначала выявляют возможные пути циркуляции токов нулевой последовательности в пределах той части исходной расчетной схемы, элементы которой электрически связаны с этим источником, а затем, учитывая схемы соединения обмоток имеющих трансформаторов и автотрансформаторов, определяют возможные замкнутые контуры для циркуляции токов нулевой последовательности на других ступенях напряжения. Очевидно, в схему замещения нулевой последовательности войдут только те элементы исходной расчетной схемы, по которым возможна циркуляция токов нулевой последовательности.

За начало схемы нулевой последовательности принимают соединенные между собой точки, в которых напряжение нулевой последовательности равно нулю (однако если при продольной несимметрии отсутствует возможность циркуляции тока нулевой последовательности по земле, понятие о начале схемы нулевой последовательности теряет смысл).

При однофазном или двухфазном коротком замыкании на землю для циркуляции токов нулевой последовательности необходимо (но недостаточно), чтобы в той части электрической цепи, которая

электрически связана с указанным источником напряжения \dot{U}_{K0} , были одна или несколько заземленных нейтралей. В последнем случае схема замещения нулевой последовательности может содержать несколько параллельно включенных контуров. Для циркуляции токов нулевой последовательности на других ступенях напряжения необходимо (но недостаточно) наличие не менее двух заземленных нейтралей.

В качестве примера на рис. 7.4,а приведена простейшая исходная расчетная схема (на ней римскими цифрами обозначены разные ступени напряжения, а арабскими – порядковые номера элементов этой схемы), а на рис. 7.4,б ее схема замещения нулевой последовательности при коротком замыкании на землю в точке K (на рис. 7.4,б и далее первое число подстрочного индекса у сопротивлений означает порядковый номер элемента схемы замещения, а второе, расположенное несколько выше первого, – последовательность: 1 – прямая, 2 – обратная и 0 – нулевая). Как видно из рис. 7.4,б, в схему замещения нулевой последовательности со стороны генератора входит только трансформатор $T1$, а с другой – линия электропередачи $L1$, трансформатор $T2$, линия электропередачи $L2$ и трансформатор $T3$. При этом эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно

$$X_{0эК} = X_{2^0} // (X_{3^0} + X_{4^0} + X_{5^0} + X_{6^0}).$$

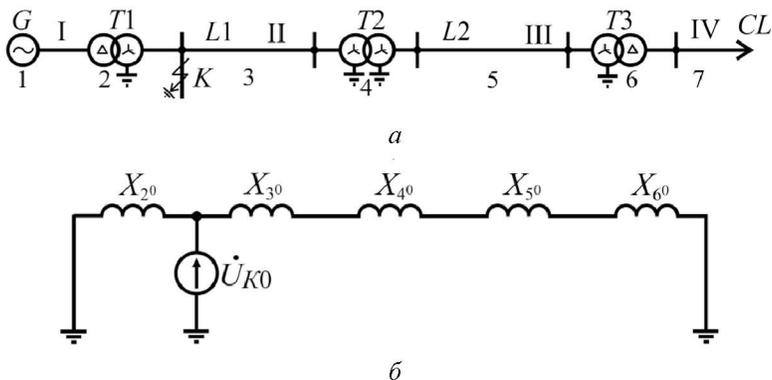


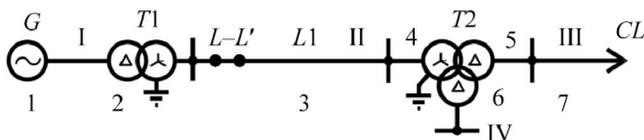
Рис. 7.4. Исходная расчетная схема (а) и схема замещения нулевой последовательности при коротком замыкании на землю в точке K (б); G – генератор; CL – нагрузка

Если разземлить нейтраль трансформатора $T3$, то справа от точки короткого замыкания ток нулевой последовательности циркулировать не может, так как на ступени напряжения III нет контура для его замыкания (возврата по земле). Следовательно, в этом случае $X_{0\text{ЭК}} = X_{2^0}$.

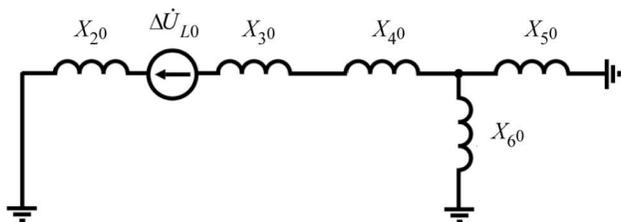
В случае продольной несимметрии, циркуляция токов нулевой последовательности возможна и при отсутствии заземленных нейтралей трансформаторов. Такие условия имеют место, например, при возникновении продольной несимметрии в одной из цепей двухцепной воздушной линии электропередачи, у которой цепи соединены между собой на обоих концах линии, или при продольной несимметрии в одной из воздушных линий замкнутой сети, так как в этих случаях в пределах той части сети, элементы которой электрически связаны с местом повреждения, образуется замкнутый контур для токов нулевой последовательности. При отсутствии такого контура циркуляция токов нулевой последовательности возможна только в том случае, если в пределах той ступени напряжения, где возникла продольная несимметрия, имеется не менее двух заземленных нейтралей, расположенных с разных сторон от места несимметрии.

В качестве другого примера на рис. 7.5,а приведена исходная расчетная схема, а на рис. 7.5,б – соответствующая схема замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии в начале линии электропередачи $L1$ между точками L и L' . При этом эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно

$$X_{0\text{ЭК}} = X_{2^0} + X_{3^0} + X_{4^0} + X_{5^0} // X_{6^0}.$$



а



б

Рис. 7.5. Исходная расчетная схема (а) и схема замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии между точками L и L' (б)

Если же разземлить нейтраль одного из трансформаторов, то циркуляция тока нулевой последовательности при продольной несимметрии невозможна, т.е. $X_{0эк} = \infty$.

7.4. Схемы замещения различных последовательностей при поперечной и продольной несимметриях в одном и том же месте

В пунктах 7.2 и 7.3 уже отмечалось, что схемы замещения одноименной последовательности при поперечной и продольной несимметриях неодинаковы. Чтобы более полно выявить их отличие и неидентичность способов их преобразований, рассмотрим конкретную расчетную схему, представленную на рис. 7.6,а, и допустим, что как расчетная точка несимметричного короткого замыкания K (при отсутствии продольной несимметрии), так и расчетные точки L и L' , между которыми возникает продольная несимметрия (при отсутствии несимметричного короткого замыкания), находятся в начале линии электропередачи $L1$.

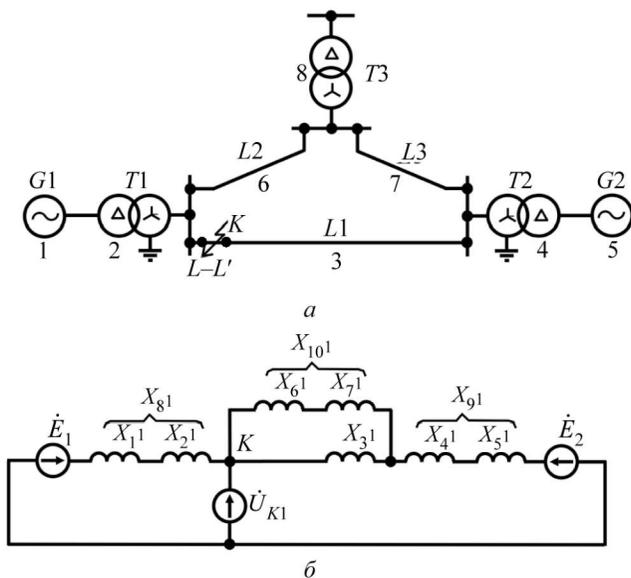


Рис. 7.6. Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения прямой и нулевой последовательностей при поперечной (б, в, з) и продольной (д, е, ж) несимметриях

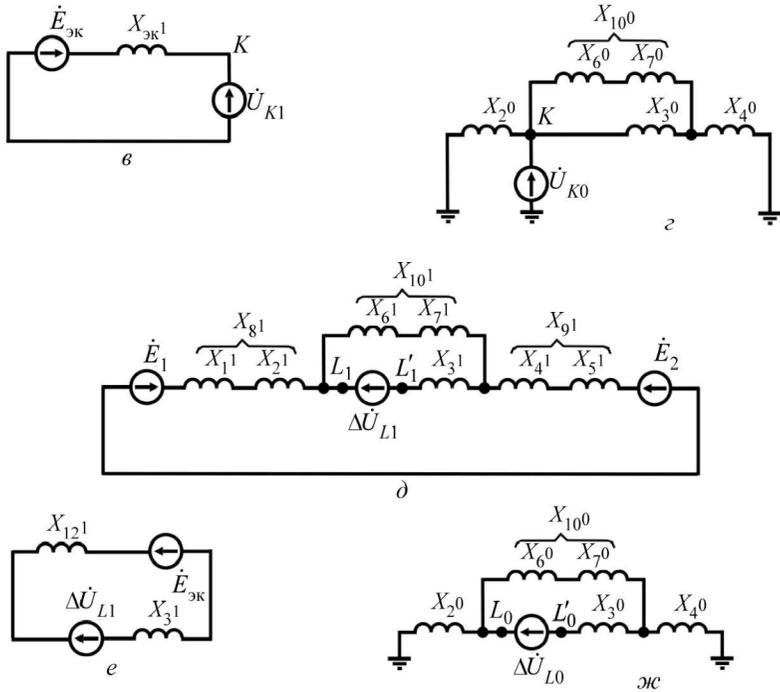


Рис. 7.6. Окончание

В случае несимметричного короткого замыкания в точке K схема замещения прямой последовательности имеет вид, показанный на рис. 7.6.б. Для упрощения схемы сопротивления последовательно соединенных элементов обозначены так: $X_{1^1} + X_{2^1} = X_{8^1}$; $X_{4^1} + X_{5^1} = X_{9^1}$; $X_{6^1} + X_{7^1} = X_{10^1}$. Суммарное сопротивление всех элементов, входящих в схему замещения и расположенных справа от точки K , составляет $X_{11^1} = X_{9^1} + X_{3^1} // X_{10^1}$. Поэтому эквивалентное сопротивление прямой последовательности относительно точки K равно $X_{1эк} = X_{8^1} // X_{11^1}$ и эквивалентная ЭДС $E_{эк} = (E_1 X_{11^1} + E_2 X_{8^1}) / (X_{11^1} + X_{8^1})$. Полученная схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 7.6.в.

Схема замещения обратной последовательности по структуре отличается от схемы замещения прямой последовательности лишь отсутствием ЭДС источников энергии, поэтому преобразуется в эквивалентную схему таким же образом.

Схема замещения нулевой последовательности не содержит параметров источников энергии (так как источники находятся за обмотками трансформаторов, соединенными в треугольник), а также трансформатора с незаземленной нейтралью (см. рис. 7.6,е) и легко

преобразуется относительно \dot{U}_{K0} . При этом

$$X_{0\text{эк}} = X_{2^0} // (X_{1^0} // X_{3^0} + X_{4^0}).$$

При продольной несимметрии в том же месте, где рассматривалось несимметричное короткое замыкание, схема замещения прямой последовательности содержит те же элементы, однако источник

$\Delta\dot{U}_{L1}$ должен быть введен в нее между точками L_1 и L'_1 , т.е. последовательно с линией электропередачи $L1$, имеющей сопротивление X_{3^1} (см. рис. 7.6,д). Вследствие этого схема замещения должна пре-

образовываться относительно $\Delta\dot{U}_{L1}$. Очевидно, элементы, имеющие сопротивления $X_{1^1}, X_{2^1}, X_{4^1}$ и X_{3^1} , оказываются включенными по-

следовательно, а ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 направлены встречно (предполагается, что при коротком замыкании они совпадают по фазе), поэтому

$X_{8^1} + X_{9^1} = X_{11^1}$ и $\dot{E} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2$. Ветвь с ЭДС \dot{E} и сопротивлением X_{11^1} включена параллельно с ветвью, имеющей сопротивление X_{10^1} .

В результате их замены одной ветвью получим эквивалентную ЭДС

$\dot{E}_{\text{эк}} = \dot{E} X_{10^1} / (X_{10^1} + X_{11^1})$ и сопротивление $X_{10^1} // X_{11^1} = X_{12^1}$ (см.

рис. 7.6,е). Искомое эквивалентное сопротивление прямой последовательности равно $X_{1\text{эк}} = X_{3^1} + X_{12^1}$ (сравни с $X_{1\text{эк}}$ при несимметричном коротком замыкании).

Схема замещения обратной последовательности по своей структуре отличается от схемы, приведенной на рис. 7.6,д, лишь тем, что не содержит ЭДС источников энергии, поэтому преобразуется в

эквивалентную схему относительно $\Delta\dot{U}_{L2}$ подобным образом.

Схема замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии представлена на рис. 7.6,жс. Она отличается от аналогичной схемы замещения при поперечной несимметрии местом включения источника напряжения $\Delta\dot{U}_{L0}$, поэтому преобразуется иначе (относительно точек $L_0 - L'_0$). Трансформаторы $T1$ и $T2$, имеющие сопротивления X_{2^0} и X_{4^0} , оказываются включенными последовательно, т.е. $X_{11^0} = X_{2^0} + X_{4^0}$. Нетрудно увидеть, что часть тока нулевой последовательности возвращается по земле, а другая его часть – по линиям электропередачи $L2$ и $L3$. Таким образом $X_{12^0} = X_{10^0} // X_{11^0}$ и эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно $X_{0эк} = X_{3^0} + X_{12^0}$.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

8.1. Исходные положения

При несимметричных коротких замыканиях напряжение в месте повреждения не равно нулю, поэтому подлежит определению не только ток короткого замыкания, но и указанное напряжение. Таким образом при использовании для расчета несимметричных коротких замыканий метода симметричных составляющих необходимо в общем случае определить три составляющих тока короткого замыкания и три составляющих напряжения в месте короткого замыкания. Для этого необходимо составить и решить шесть уравнений с шестью неизвестными. Исходя из того, что ЭДС обратной и нулевой последовательностей синхронной машины равны нулю и принимая токи прямой, обратной и нулевой последовательностей положительными, если они направлены к месту короткого замыкания, при любом несимметричном коротком замыкании и неучете активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы справедливы следующие уравнения:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{1\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}; \quad (8.1)$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA2}; \quad (8.2)$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - jX_{0\text{ЭК}} \dot{I}_{K0}, \quad (8.3)$$

где \dot{U}_{KA1} , \dot{U}_{KA2} и \dot{U}_{K0} – соответственно напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы A в месте короткого замыкания; $\dot{E}_{\text{ЭК}}$ – эквивалентная ЭДС; $X_{1\text{ЭК}}$, $X_{2\text{ЭК}}$ и $X_{0\text{ЭК}}$ – эквивалентные сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей; \dot{I}_{KA1} , \dot{I}_{KA2} и \dot{I}_{K0} – соответственно токи прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы A в месте короткого замыкания.

При любом несимметричном коротком замыкании одна из фаз находится в условиях, отличных от условий двух других фаз. Так при однофазном коротком замыкании в особых условиях находится поврежденная фаза, а при двухфазном коротком замыкании и двухфазном коротком замыкании на землю – неповрежденная фаза. Такую фазу называют *особой*. В дальнейшем условно будем считать, что особой фазой всегда является фаза *A*.

Чтобы наглядно представить условия, в которых находятся разные фазы при несимметричном коротком замыкании, обычно полагают, что короткое замыкание происходит не на реальных проводниках электроустановки, а на воображаемом ответвлении от них, не обладающим сопротивлением (см. рис. 8.1). Токи воображаемого ответвления при коротком замыкании на нем и являются искомыми токами короткого замыкания.

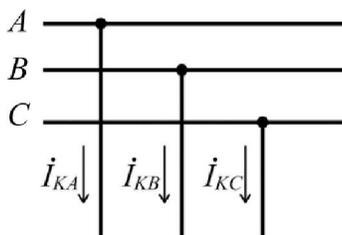


Рис. 8.1. Фиктивное ответвление в месте короткого замыкания

Условия, возникающие в ответвлении при коротком замыкании того или другого вида, называют *граничными*. Эти условия, будучи выраженными через симметричные составляющие токов и напряжений, дают дополнительные три уравнения для определения симметричных составляющих искомых токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания.

8.2. Двухфазное короткое замыкание

При двухфазном коротком замыкании (см. рис. 8.2) граничные условия таковы:

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (8.4)$$

$$\dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0; \quad (8.5)$$

$$\dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC}. \quad (8.6)$$

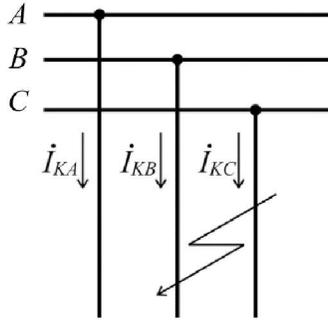


Рис. 8.2. Двухфазное короткое замыкание

Как известно, ток нулевой последовательности связан с токами фаз следующим соотношением:

$$\dot{I}_{K0} = \frac{1}{3} \left(\dot{I}_{KA} + \dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} \right),$$

но, учитывая (8.4) и (8.5), получаем:

$$\dot{I}_{K0} = 0. \quad (8.7)$$

Условие (8.4) можно представить через симметричные составляющие так:

$$\dot{I}_{KA} = \dot{I}_{KA1} + \dot{I}_{KA2} + \dot{I}_{K0},$$

откуда следует, что

$$\dot{I}_{KA1} = -\dot{I}_{KA2}. \quad (8.8)$$

Выразим условие (8.6) через симметричные составляющие напряжений соответствующих фаз

$$\dot{U}_{KB1} + \dot{U}_{KB2} + \dot{U}_{K0} = \dot{U}_{KC1} + \dot{U}_{KC2} + \dot{U}_{K0},$$

а затем через симметричные составляющие напряжения особой фазы

$$a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = a \dot{U}_{KA1} + a^2 \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0},$$

где a и a^2 – комплексы – операторы поворота фазы:

$$a = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{-j120} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким образом

$$(a^2 - a)\dot{U}_{KA1} = (a^2 - a)\dot{U}_{KA2}$$

или

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2}. \quad (8.9)$$

Последнее равенство позволяет приравнять правые части уравнений (8.1) и (8.2):

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{1\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1} = -jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA2}.$$

Если исключить из этого выражения \dot{I}_{KA2} с помощью (8.8), получим следующее выражение для тока прямой последовательности особой фазы при двухфазном коротком замыкании:

$$\dot{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}})}. \quad (8.10)$$

Зная ток \dot{I}_{KA1} и учитывая (8.8) и (8.9), из уравнения (8.2) легко найти напряжения прямой и обратной последовательностей фазы A в месте короткого замыкания:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}.$$

Если в формулу (8.3) подставить (8.7) и учесть, что при двухфазном коротком замыкании $X_{0\text{ЭК}} = \infty$, получим неопределенность. Таким образом при рассматриваемом коротком замыкании напряжение \dot{U}_{K0} может принимать разные значения, т.е. потенциал нейтрали может быть смещен. А относительно нейтрали системы напряжение неповрежденной фазы в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} = 2jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}, \quad (8.11)$$

напряжения поврежденных фаз

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KB} &= a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} = (a^2 + a)\dot{U}_{KA1} = \\ &= -\dot{U}_{KA1} = -0,5\dot{U}_{KA} = -jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1} \end{aligned} \quad (8.12)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KC} &= a\dot{U}_{KA1} + a^2\dot{U}_{KA2} = (a + a^2)\dot{U}_{KA1} = \\ &= -\dot{U}_{KA1} = -0,5\dot{U}_{KA} = -jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (8.13)$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания, выраженные через ток прямой последовательности особой фазы, с учетом (8.8)

$$\dot{I}_{KB} = a^2\dot{I}_{KA1} + a\dot{I}_{KA2} = (a^2 - a)\dot{I}_{KA1} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{KA1} \quad (8.14)$$

и

$$\dot{I}_{KC} = a\dot{I}_{KA1} + a^2\dot{I}_{KA2} = (a - a^2)\dot{I}_{KA1} = j\sqrt{3}\dot{I}_{KA1}. \quad (8.15)$$

Выражения (8.8) и (8.9) позволяют построить векторные диаграммы токов и напряжений в месте двухфазного короткого замыкания. Такие диаграммы представлены на рис. 8.3.

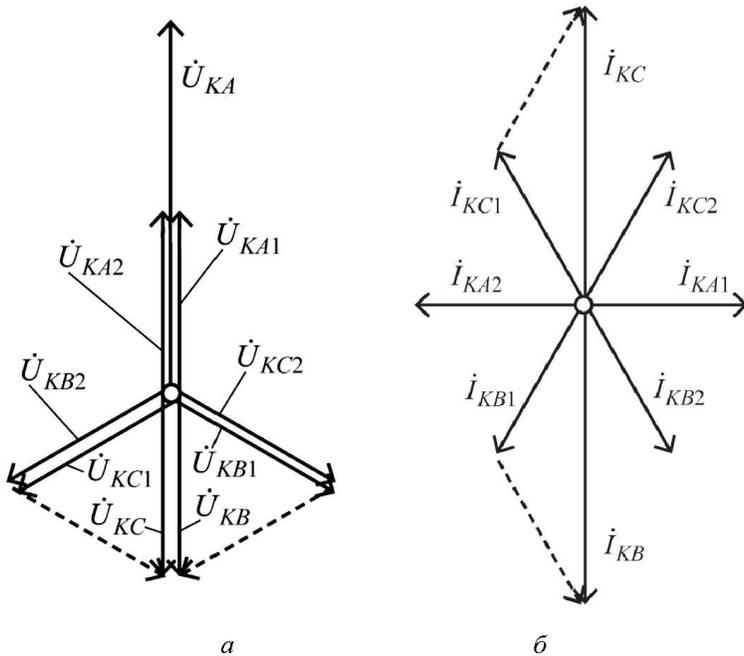


Рис. 8.3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном коротком замыкании

Соотношения между симметричными составляющими напряжений и токов особой фазы в месте короткого замыкания, характерные для рассматриваемого вида короткого замыкания, дают возможность соединить между собой схемы замещения отдельных последовательностей и получить так называемую *комплексную схему замещения*. Такая схема при двухфазном коротком замыкании представлена на рис. 8.4.

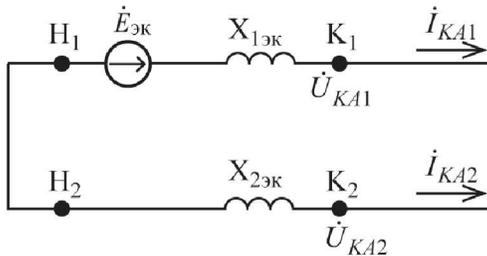


Рис. 8.4. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании

8.3. Однофазное короткое замыкание

При однофазном коротком замыкании (см. рис. 8.5) граничные условия таковы:

$$\dot{U}_{KA} = 0; \quad (8.16)$$

$$\dot{I}_{KB} = 0; \quad (8.17)$$

$$\dot{I}_{KC} = 0. \quad (8.18)$$

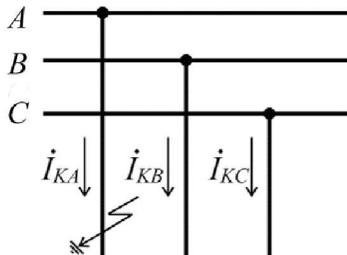


Рис. 8.5. Однофазное короткое замыкание

Условие (8.16) можно представить так:

$$\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0. \quad (8.19)$$

Используя известные формулы для определения симметричных составляющих тока фазы A по полным токам разных фаз и учитывая (8.17) и (8.18), найдем:

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{KA}. \quad (8.20)$$

В соответствии с (8.19) при однофазном коротком замыкании сумма правых частей уравнений (8.1) – (8.3) равна нулю, т.е.

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{1\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1} - jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA2} - jX_{0\text{ЭК}} \dot{I}_{K0} = 0$$

или с учетом (8.20)

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}) \dot{I}_{KA1} = 0,$$

откуда ток прямой последовательности поврежденной фазы при однофазном коротком замыкании

$$\dot{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})}. \quad (8.21)$$

Полный ток поврежденной фазы в соответствии с (8.20) составляет

$$\dot{I}_{KA} = 3 \dot{I}_{KA1}. \quad (8.22)$$

Напряжения обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания определяют по формулам (8.2) и (8.3), а напряжение прямой последовательности, учитывая (8.19) и (8.20), равно

$$\dot{U}_{KA1} = - \left(\dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} \right) = j(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}) \dot{I}_{KA1}. \quad (8.23)$$

Напряжения неповрежденных фаз в месте короткого замыкания в соответствии с (8.23), (8.2), (8.3) и (8.20) составляют

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KB} &= a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = \\ &= j \left[(a^2 - a) X_{2\text{ЭК}} + (a^2 - 1) X_{0\text{ЭК}} \right] \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left[\sqrt{3} X_{2\text{ЭК}} + j(a^2 - 1) X_{0\text{ЭК}} \right] \dot{I}_{KA1}; \end{aligned} \quad (8.24)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{KC} &= a\dot{U}_{KA1} + a^2\dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = \\
 &= j \left[(a - a^2)X_{2\text{ЭК}} + (a - 1)X_{0\text{ЭК}} \right] \dot{I}_{KA1} = \quad (8.25) \\
 &= \left[-\sqrt{3}X_{2\text{ЭК}} + j(a - 1)X_{0\text{ЭК}} \right] \dot{I}_{KA1}.
 \end{aligned}$$

Выражения (8.23), (8.2) и (8.3) с учетом (8.20) позволяют построить векторные диаграммы напряжений и токов при однофазном коротком замыкании. Такие диаграммы представлены на рис. 8.6.

Угол θ_U между векторами напряжений неповрежденных фаз зависит от соотношения между эквивалентными сопротивлениями нулевой и обратной последовательностей и с изменением $X_{0\text{ЭК}}$ изменяется в широких пределах: $\pi/3 \leq \theta_U < \pi$. Нижний предел имеет место при $X_{0\text{ЭК}} = \infty$, т.е. при отсутствии у трансформаторов заземленных нейтралей. С уменьшением $X_{0\text{ЭК}}$ угол θ_U увеличивается, приближаясь к π .

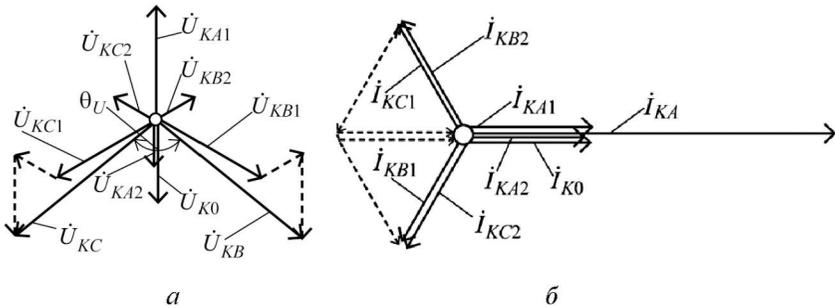


Рис. 8.6. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при однофазном коротком замыкании

Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании, справедливая не только для токов, но и для напряжений, может быть составлена только с использованием для связи схем замещения обратной и нулевой последовательностей со схемой замещения прямой последовательности промежуточных идеальных трансформаторов, не имеющих рассеяния и намагничивающего тока. Они изолируют друг от друга схемы замещения разных последовательностей и имеют коэффициент трансформации $n = 1/1$. Такая комплексная схема замещения представлена на рис. 8.7,а. Здесь между схемами замещения отдельных последовательностей введена специ-

альная связывающая часть, которая образована путем последовательного соединения вторичных обмоток идеальных трансформаторов. Нетрудно убедиться, что в связывающей части выполняются как условие (8.20), так и условие (8.19), а потенциалы всех точек схем замещения обратной и нулевой последовательностей остаются неизменными.

Часто отказываются от идеального трансформатора, подключенного к схеме замещения прямой последовательности (см. рис. 8.7,б). Однако при этом комплексная схема замещения теряет наглядность.

Упрощенная комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании, не требующая использования идеальных трансформаторов и справедливая только для токов, может быть получена лишь путем искусственного смещения потенциалов всех точек схемы замещения нулевой последовательности на $-\dot{U}_{K0}$, а всех точек схемы замещения обратной последовательности — на $(-\dot{U}_{K2} - \dot{U}_{K0})$. При этом схемы замещения всех последовательностей могут быть соединены так, как показано на рис. 8.7,в. Очевидно, напряжения обратной и нулевой последовательностей в любой точке такой комплексной схемы замещения могут быть определены только относительно нулевых точек (начал) схем замещения соответствующих последовательностей.

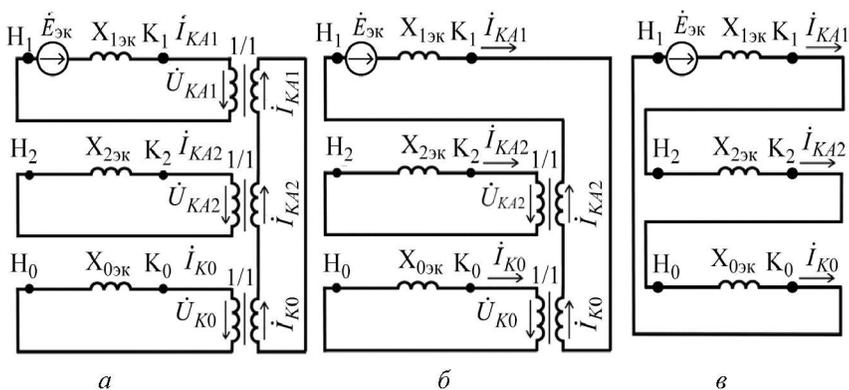


Рис. 8.7. Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании:

a — схема со связывающей частью; *б* — схема с двумя идеальными трансформаторами; *в* — упрощенная схема

8.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

При двухфазном коротком замыкании на землю (см. рис. 8.8) граничные условия таковы:

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (8.26)$$

$$\dot{U}_{KB} = 0; \quad (8.27)$$

$$\dot{U}_{KC} = 0. \quad (8.28)$$

Условие (8.26), выраженное через симметричные составляющие тока особой фазы, имеет вид:

$$\dot{I}_{KA1} + \dot{I}_{KA2} + \dot{I}_{K0} = 0. \quad (8.29)$$

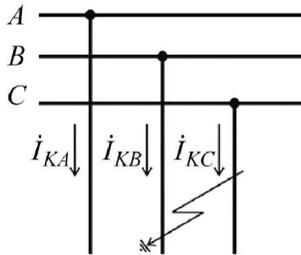


Рис. 8.8. Двухфазное короткое замыкание на землю

Если в известные формулы для определения \dot{U}_{KA1} , \dot{U}_{KA2} , \dot{U}_{K0} через напряжения фаз \dot{U}_{KA} , \dot{U}_{KB} , \dot{U}_{KC} подставить (8.27) и (8.28), то получим

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \dot{U}_{K0} = \frac{1}{3} \dot{U}_{KA}. \quad (8.30)$$

В соответствии с этим соотношением приравняем правые части уравнений (8.2) и (8.3):

$$X_{2эк} \dot{I}_{KA2} = X_{0эк} \dot{I}_{K0},$$

откуда

$$\dot{I}_{K0} = \frac{X_{2эк}}{X_{0эк}} \dot{I}_{KA2}. \quad (8.31)$$

Подставив это выражение в (8.29), найдем:

$$\dot{I}_{KA1} + \left(1 + \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{0\text{ЭК}}}\right) \dot{I}_{KA2} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{KA2} = -\frac{\dot{I}_{KA1}}{1 + \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{0\text{ЭК}}}} = -\frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (8.32)$$

Формулы (8.31) и (8.32) позволяют выразить ток \dot{I}_{K0} через \dot{I}_{KA1} :

$$\dot{I}_{K0} = -\frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (8.33)$$

Если в соответствии с (8.30) приравнять правые части уравнений (8.1) и (8.2) и исключить из полученного выражения ток \dot{I}_{KA2} , используя с этой целью (8.32), то получим:

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{1\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1} = j \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1},$$

откуда ток прямой последовательности особой фазы в месте двухфазного короткого замыкания на землю

$$\dot{I}_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j \left(X_{1\text{ЭК}} + \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right)}. \quad (8.34)$$

Определив по этой формуле ток прямой последовательности особой фазы \dot{I}_{KA1} в месте короткого замыкания, легко найти токи обратной и нулевой последовательностей этой же фазы, используя формулы (8.32) и (8.33).

Напряжение прямой последовательности фазы *A* в точке короткого замыкания можно определить по формуле (8.1). Однако чаще используют другую формулу, которая получается путем исключения

из (8.1) эквивалентной ЭДС $\dot{E}_{\text{ЭК}}$ с помощью выражения (8.34):

$$\dot{U}_{KA1} = j \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (8.35)$$

Как показывает (8.30), полное напряжение на неповрежденной фазе в 3 раза больше \dot{U}_{KA1} , т.е.

$$\dot{U}_{KA} = 3j \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}.$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания, выраженные через ток прямой последовательности особой фазы с помощью (8.32) и (8.33) равны соответственно:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KB} &= a^2 \dot{I}_{KA1} - a \frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} - \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left(a^2 - \frac{X_{2\text{ЭК}} + aX_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right) \dot{I}_{KA1}; \end{aligned} \quad (8.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KC} &= a \dot{I}_{KA1} - a^2 \frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} - \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left(a - \frac{X_{2\text{ЭК}} + a^2 X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right) \dot{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (8.37)$$

Хотя комплексы в (8.36) и (8.37), заключенные в скобки, и различны, однако их модули одинаковы и составляют:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}, \quad (8.38)$$

причем в зависимости от соотношения между $X_{0\text{ЭК}}$ и $X_{2\text{ЭК}}$ коэффициент $m^{(1,1)}$ принимает разные значения в пределах $1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}$. Минимальное предельное значение имеет место при $X_{0\text{ЭК}} = X_{2\text{ЭК}}$, а максимальное – когда $X_{0\text{ЭК}}/X_{2\text{ЭК}}$ равно нулю или бесконечности.

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного короткого замыкания на землю, построенные с учетом (8.30), (8.32) и (8.33), приведены на рис. 8.9.

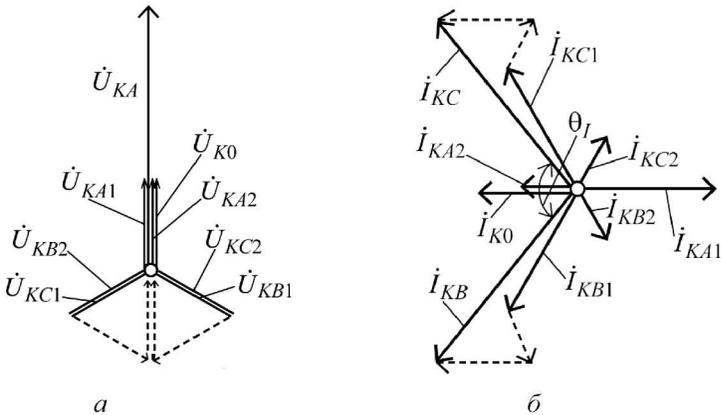


Рис. 8.9. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном коротком замыкании на землю

Угол θ_I между векторами токов поврежденных фаз зависит от соотношения между эквивалентными сопротивлениями $X_{0Эк}$ и $X_{2Эк}$ и может изменяться в пределах: $\pi/3 < \theta_I \leq \pi$. К нижнему пределу угол θ_I стремится при стремлении отношения $X_{0Эк}/X_{2Эк}$ к нулю, а к верхнему пределу – при стремлении $X_{0Эк}/X_{2Эк}$ к бесконечности. В последнем случае двухфазное короткое замыкание на землю переходит в двухфазное короткое замыкание.

При двухфазном коротком замыкании на землю эквипотенциальными оказываются не только начала схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей как точки нулевого потенциала, но и, как следует из соотношения (8.30), концы этих схем. Это позволяет соединить между собой отдельно все начала схем замещения разных последовательностей (как точки нулевого потенциала), и все их концы (как эквипотенциальные точки), образуя комплексную схему замещения. Последняя представлена на рис. 8.10.

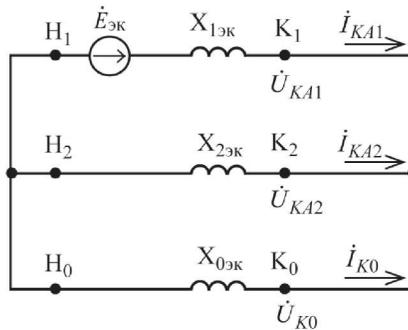


Рис. 8.10. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю

8.5. Правило эквивалентности тока прямой последовательности

Полученные выше выражения для токов обратной и нулевой последовательностей и всех симметричных составляющих напряжений в месте несимметричных коротких замыканий разных видов показывают, что их значения пропорциональны току прямой последовательности. Пропорциональны току прямой последовательности также полные токи поврежденных фаз и напряжения неповрежденных фаз (а при двухфазном коротком замыкании и напряжения поврежденных фаз), что видно из данных табл. 8.1. Поэтому задача расчета любого несимметричного короткого замыкания в первую очередь состоит в определении с достаточной точностью тока прямой последовательности в месте замыкания.

Для определения тока прямой последовательности при несимметричных коротких замыканиях разных видов были получены формулы (8.10), (8.21) и (8.34). Нетрудно заметить, что указанные формулы имеют одинаковую структуру. Это позволяет записать выражение для тока прямой последовательности особой фазы при любом несимметричном коротком замыкании в обобщенном виде:

$$\dot{I}_{K\Delta 1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{\text{эк}}}{j(X_{1\text{эк}} + \Delta X^{(n)})}, \quad (8.39)$$

где (n) – означает вид короткого замыкания; $\Delta X^{(n)}$ – дополнительное сопротивление, которое необходимо прибавить к эквивалентному сопротивлению схемы замещения прямой последовательности относительно точки короткого замыкания, чтобы получить ток прямой последовательности особой фазы при коротком замыкании вида (n) .

Сопротивление $\Delta X^{(n)}$ зависит от вида короткого замыкания и параметров схем замещения обратной и нулевой последовательностей. Его значение при несимметричных коротких замыканиях разных видов приведены в табл. 8.2.

Формула (8.39) показывает, что расчет тока прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании отличается от расчета тока трехфазного короткого замыкания только тем, что в первом случае необходимо к эквивалентному сопротивлению схемы замещения прямой последовательности добавить дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, т.е. удалить точку короткого замыкания от реальной точки на это сопротивление и считать, что за этим сопротивлением произошло трехфазное короткое замыкание.

Таблица 8.1

**Расчетные выражения
для определения симметричных составляющих токов
и напряжений, а также фазных токов и напряжений
в месте несимметричных коротких замыканий разных видов**

| Расчетная величина | Расчетное выражение при коротком замыкании | | |
|----------------------------|--|---|--|
| | двухфазном | однофазном | двухфазном на землю |
| Ток \dot{I}_{KA1} | $\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}})}$ | $\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})}$ | $\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j[X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}/(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})]}$ |
| Ток \dot{I}_{KA2} | $-\dot{I}_{KA1}$ | \dot{I}_{KA1} | $-\frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}$ |
| Ток \dot{I}_{K0} | 0 | \dot{I}_{KA1} | $-\frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}$ |
| Ток \dot{I}_{KA} | 0 | $3\dot{I}_{KA1}$ | 0 |
| Ток \dot{I}_{KB} | $-j\sqrt{3}\dot{I}_{KA1}$ | 0 | $\left(a^2 - \frac{X_{2\text{ЭК}} + aX_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\right) \dot{I}_{KA1}$ |
| Ток \dot{I}_{KC} | $j\sqrt{3}\dot{I}_{KA1}$ | 0 | $\left(a - \frac{X_{2\text{ЭК}} + a^2X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\right) \dot{I}_{KA1}$ |
| Напряжение \dot{U}_{KA1} | $jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $j(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})\dot{I}_{KA1}$ | $j\frac{X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\dot{I}_{KA1}$ |
| Напряжение \dot{U}_{KA2} | $jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $-jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $j\frac{X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\dot{I}_{KA1}$ |
| Напряжение \dot{U}_{K0} | 0 | $-jX_{0\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $j\frac{X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\dot{I}_{KA1}$ |
| Напряжение \dot{U}_{KA} | $2jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | 0 | $3j\frac{X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}\dot{I}_{KA1}$ |
| Напряжение \dot{U}_{KB} | $-jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $[\sqrt{3}X_{2\text{ЭК}} + j(a^2 - 1)X_{0\text{ЭК}}]\dot{I}_{KA1}$ | 0 |
| Напряжение \dot{U}_{KC} | $-jX_{2\text{ЭК}}\dot{I}_{KA1}$ | $[-\sqrt{3}X_{2\text{ЭК}} + j(a - 1)X_{0\text{ЭК}}]\dot{I}_{KA1}$ | 0 |

**Выражения для определения дополнительного сопротивления $\Delta X^{(n)}$
и коэффициента $m^{(n)}$ при несимметричных коротких
замыканиях разных видов**

| Вид короткого замыкания | Выражение для $\Delta X^{(n)}$ | Значение $m^{(n)}$ или выражение для его определения |
|--------------------------|---|---|
| Двухфазное Однофазное | $X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}$ | $\frac{\sqrt{3}}{3}$ |
| Двухфазное на землю | $\frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}$ | $\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}$ |

Таким образом ток прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании можно определить как ток эквивалентного трехфазного короткого замыкания в точке, удаленной от фактической точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, которое не зависит от расчетного момента времени и определяется только параметрами схем замещения обратной и нулевой последовательностей. Это положение, известное как *правило эквивалентности тока прямой последовательности*, позволяет расчет тока прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании свести к расчету тока эквивалентного трехфазного короткого замыкания.

Как показывают выведенные ранее выражения и данные табл. 8.1, при любом несимметричном коротком замыкании модуль тока поврежденной фазы и найденный ток прямой последовательности связаны простым соотношением, которое в обобщенном виде можно представить так:

$$\left| \dot{I}_K^{(n)} \right| = m^{(n)} \left| \dot{I}_{K1} \right|, \quad (8.40)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания; его значения при двухфазном и однофазном коротких замыканиях и формула для его определения при двухфазном коротком замыкании на землю приведены в табл. 8.2.

Важной величиной при расчете несимметричных коротких замыканий является напряжение прямой последовательности в точке короткого замыкания. Его можно определить по формуле (8.1). Однако удобнее использовать выражение

$$U_{K41}^{(n)} = j\Delta X^{(n)} I_{K41}^{(n)}, \quad (8.41)$$

которое показывает, что напряжение прямой последовательности в точке любого несимметричного короткого замыкания численно равно падению напряжения от тока прямой последовательности в сопротивлении $\Delta X^{(n)}$, определяющем удаленность точки эквивалентного трехфазного короткого замыкания от действительной точки несимметричного короткого замыкания.

8.6. Расчет токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях разными методами

В соответствии с правилом эквивалентности тока прямой последовательности для расчета тока прямой последовательности, пропорциональных ему полных токов поврежденных фаз и других величин при несимметричном коротком замыкании любого вида могут быть применены все методы расчета токов трехфазного короткого замыкания. Поскольку ток прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании определяется как ток эквивалентного трехфазного короткого замыкания, удаленного от действительной точки короткого замыкания на $\Delta X^{(n)}$, то напряжение прямой последовательности в любой точке исходной расчетной схемы при несимметричном коротком замыкании оказывается выше, чем при трехфазном коротком замыкании в той же точке. Поэтому влияние асинхронных электродвигателей и других нагрузок на ток несимметричного короткого замыкания проявляется слабее, чем на ток трехфазного короткого замыкания, вследствие чего при расчете токов несимметричных коротких замыканий допустимо учитывать только мощные электродвигатели, подключенные непосредственно вблизи точки короткого замыкания.

Дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, используемое при расчете тока прямой последовательности несимметричного короткого замыкания, не зависит ни от применяемого метода расчета, ни от расчетного момента времени, поэтому в начале расчета тока любого несимметричного короткого замыкания необходимо составить схемы замещения обратной и нулевой (при расчете токов и напряжений при однофазном и двухфазном коротких замыканиях на землю) последовательностей, преобразовать эти схемы относительно точки короткого замыкания, определить эквивалентные сопротивления $X_{2\text{ЭК}}$ и $X_{0\text{ЭК}}$ и найти $\Delta X^{(n)}$.

Определение тока прямой последовательности с использованием расчетных формул

В том случае, когда исходная расчетная схема содержит только один синхронный генератор, то при неучете влияния его демпферных контуров и допущении, что постоянная времени системы возбуждения T_e близка к нулю, для расчета тока прямой последовательности несимметричного короткого замыкания может быть использована формула (6.19). Если все сопротивления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей выражены в относительных единицах и за базисную мощность принята полная номинальная мощность генератора, а за базисное напряжение той ступени напряжения, где находится генератор, – его номинальное напряжение, то расчетная формула для определения тока прямой последовательности имеет вид:

$$I_{1пт} = \frac{E_{гпр}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{X'_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} - \frac{E_{гпр}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \leq \frac{U_{ном}}{X_{вщ} + \Delta X^{(n)}}, \quad (8.42)$$

где

$$T'_d = T_{f0} \frac{X'_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} = T'_f. \quad (8.43)$$

Как видно из (8.42), ток прямой последовательности $I_{1пт}$ не может быть больше тока, определяемого выражением

$$I_{1пт} \leq \frac{U_{ном}}{X_{вщ} + \Delta X^{(n)}},$$

так как напряжение прямой последовательности на выводах генератора

$$U_1 = (X_{вщ} + \Delta X^{(n)}) I_{1пт}$$

не может быть больше номинального.

Определив по формуле (8.42) ток прямой последовательности, легко найти полный ток поврежденной фазы (поврежденных фаз) в заданный момент времени.

Расчет тока прямой последовательности с учетом влияния демпферных контуров синхронного генератора и неучете поперечной составляющей его тока якоря следует вести с использованием формулы (5.57), которая в соответствии с правилом эквивалентности тока прямой последовательности принимает вид:

$$\begin{aligned}
 I_{1nt} = & \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} + \left(\frac{E'_{q0}}{X'_{1d} + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} - \right. \\
 & \left. - \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \left(\frac{E''_{q0}}{X''_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} - \right. \\
 & \left. - \frac{E'_{q0}}{X'_{1d} + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \left(\frac{E_{qp} - E_{q(0)}}{X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}} \right) \times \\
 & \times \left(1 - \frac{T_d^{(n)} - T_{\sigma 1d}}{T_d^{(n)} - T_d^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \frac{T_d^{(n)} - T_{\sigma 1d}}{T_d^{(n)} - T_d^{(n)}} e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} \right) \leq \frac{U_{НОМ}}{X_{вн} + \Delta X^{(n)}},
 \end{aligned} \tag{8.44}$$

где

$$T_d^{(n)} \approx T_f^{(n)} + T'_{1d}; \tag{8.45}$$

$$T_d^{(n)} \approx \sigma'^{(n)} \frac{T_f^{(n)} T'_{1d}}{T_f^{(n)} + T'_{1d}}; \tag{8.46}$$

$$X'_{1d} \approx X_d \frac{T_f^{(n)} + T'_{1d}}{T_{y0} + T'_{1d}}, \tag{8.47}$$

причем

$$T_f^{(n)} = \frac{X_f^{(n)}}{\omega R_f} = \frac{X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}}}{\omega R_f}, \tag{8.48}$$

$$T'_{1d} = \frac{X'_{1d}}{\omega R'_{1d}} = \frac{X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}}}{\omega R'_{1d}}, \tag{8.49}$$

$$\sigma'^{(n)} = 1 - \frac{(X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}) X_{ad}^2}{\left[X_f (X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}) - X_{ad}^2 \right] \times \left[X_{1d} (X_d + X_{вн} + \Delta X^{(n)}) - X_{ad}^2 \right]}. \tag{8.50}$$

Расчет с использованием метода типовых кривых

Порядок расчета токов поврежденных фаз при несимметричных коротких замыканиях (как и токов при трехфазных коротких замыканиях) с использованием метода типовых кривых зависит от исходной расчетной схемы. Если эта схема содержит только один синхронный генератор (синхронный компенсатор), то расчет тока поврежденной фазы в заданный момент времени при любом несимметричном коротком замыкании ведут в следующей последовательности.

1. Составляют схему замещения прямой последовательности для определения начального значения тока прямой последовательности (т.е. синхронный генератор учитывают сверхпереходным сопротивлением по продольной оси и сверхпереходной ЭДС, найденной с учетом предшествующей нагрузки генератора), а также схемы замещения обратной и нулевой последовательностей и определяют их параметры, выражая, как правило, все сопротивления в относительных единицах.

2. Преобразуют все схемы замещения относительно точки короткого замыкания и находят эквивалентные сопротивления $X_{*1\text{ЭК}(\delta)}$, $X_{*2\text{ЭК}(\delta)}$ и $X_{*0\text{ЭК}(\delta)}$.

3. В зависимости от вида несимметричного короткого замыкания определяют дополнительное сопротивление $\Delta X_{*(\delta)}^{(n)}$ и начальное значение тока прямой последовательности при выбранных базисных условиях

$$I_{* \text{лп}0(\delta)} = \frac{E_{* (\delta)}''}{X_{*1\text{ЭК}(\delta)} + \Delta X_{* (\delta)}^{(n)}}.$$

4. Находят начальное значение тока прямой последовательности генератора, отнесенное к его полной номинальной мощности и номинальному напряжению, т.е.

$$I_{* \text{лп}0(\text{НОМ})} = I_{* \text{лп}0(\delta)} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\delta}}. \quad (8.51)$$

5. Если найденный ток $I_{* \text{лп}0(\text{НОМ})} \geq 2$, то подбирают соответствующую типовую кривую и для заданного момента времени определяют коэффициент γ_{1t} .

6. Определяют искомое значение периодической составляющей тока поврежденной фазы (поврежденных фаз) в расчетный момент времени, используя формулу

$$I_{\text{пт}} = m^{(n)} \gamma_{\text{пт}} I_{* \text{лп0(б)}} I_{\text{б}}. \quad (8.52)$$

В том случае, когда исходная расчетная схема содержит несколько однотипных и одинаково удаленных от точки короткого замыкания синхронных генераторов (синхронных компенсаторов), то расчет периодической составляющей тока поврежденной фазы (поврежденных фаз) в заданный момент времени при несимметричном коротком замыкании производят в том же порядке, только при нахождении тока $I_{* \text{лп0(ном)}}$, определяющего удаленность точки эквивалентного трехфазного короткого замыкания от синхронного генератора, учитывают суммарную мощность всех генераторов.

Если исходная расчетная схема содержит неодинаково удаленные от точки короткого замыкания генераторы и энергетическую систему, то при преобразовании схемы замещения прямой последовательности отдельно выделяют генератор, для которого расчетное короткое замыкание предполагается близким, а остальные генераторы объединяют с системой. Однако даже при радиальной схеме связи выделенного генератора с энергосистемой и несимметричном коротком замыкании в какой-либо промежуточной точке делить эту схему на две независимые части, как это делается при трехфазном коротком замыкании, нельзя, так как при несимметричном коротком замыкании напряжение в месте повреждения не равно нулю и дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, за которым находится точка эквивалентного трехфазного короткого замыкания, оказывается общим для выделенного генератора и системы (см. рис. 8.11,а). Если же несимметричное короткое замыкание происходит на ответвлении с сопротивлением X_K , которое в схеме замещения прямой последовательности образует отдельную ветвь (см. рис. 8.11,б), то точка эквивалентного трехфазного короткого замыкания оказывается еще более удаленной от генератора.

Расчет тока поврежденной фазы (поврежденных фаз) в заданный момент времени при рассматриваемых исходных расчетных схемах и несимметричном коротком замыкании любого вида с использованием метода типовых кривых производят в следующей последовательности.

1. Составляют схему замещения прямой последовательности для определения начального значения тока прямой последовательности, а также схемы замещения обратной и нулевой последовательностей, и определяют их параметры.

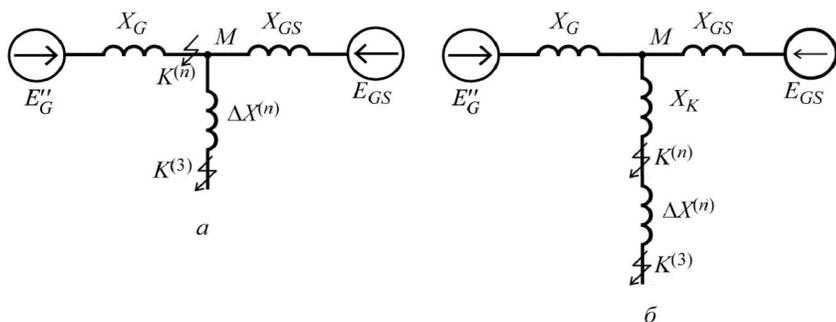


Рис. 8.11. Расчетные схемы для определения начального значения тока прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании:

а – при радиальной схеме связи генератора с энергосистемой;
б – при коротком замыкании на ответвлении

2. Преобразуют схему замещения прямой последовательности относительно точки короткого замыкания так, чтобы ближайший к этой точке синхронный генератор (или группа одинаково удаленных генераторов) был выделен в отдельную ветвь, а схемы замещения обратной и нулевой последовательностей преобразуют полностью, определяя эквивалентные сопротивления $X_{*2\text{эк}(\text{б})}$ и $X_{*0\text{эк}(\text{б})}$.

3. В зависимости от вида несимметричного короткого замыкания определяют дополнительное сопротивление $\Delta X_{*}^{(n)}$ и составляют схему, подобную представленной на рис. 8.11,*а* или рис. 8.11,*б*.

4. Определяют эквивалентную ЭДС $E_{* \text{эк}(\text{б})}$ и эквивалентное сопротивление прямой последовательности $X_{* \text{лр}(\text{б})}$.

5. Находят начальное значение тока прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$I_{* \text{лр}0(\text{б})} = \frac{E_{* \text{эк}(\text{б})}}{X_{* \text{лр}(\text{б})} + \Delta X_{*}^{(n)}}$$

и начальное значение тока прямой последовательности в ветви генератора

$$I_{* \text{лр}0(\text{б})} = \frac{E_{* G(\text{б})}'' - (X_{* K(\text{б})} + \Delta X_{*}^{(n)}) I_{* \text{лр}0(\text{б})}}{X_{* G(\text{б})}}.$$

6. По формуле (8.51) определяют начальное значение тока прямой последовательности генератора (генераторов), отнесенное к

его (их) полной номинальной мощности и номинальному напряжению, т.е. $I_{*1G0(\text{ном})}$, а также определяют отношение $I_{*1G(\beta)} / I_{*1k0(\beta)}$.

7. Если $I_{*1G0(\text{ном})} \geq 2$ и $I_{*1G(\beta)} / I_{*1k0(\beta)} \geq 0,5$, то подбирают соответствующую типовую кривую и для заданного момента времени определяют коэффициент γ_{1t} , а затем по найденному отношению $I_{*1G(\beta)} / I_{*1k0(\beta)}$ подбирают соответствующую кривую зависимости $\gamma_{kt} = f(\gamma_t)$ и, зная γ_{1t} , находят коэффициент γ_{1kt} .

8. Определяют искомое значение периодической составляющей тока поврежденной фазы (поврежденных фаз) в месте короткого замыкания в расчетный момент времени

$$I_{kt} = m^{(n)} \gamma_{1kt} I_{*1k0(\beta)} I_{\beta}. \quad (8.53)$$

В тех случаях, когда хотя бы одно из условий п. 7 не выполняется, то типовые кривые не требуются, так как принимают $I_{kt} = I_{k0}$.

8.7. Расчет тока в произвольной ветви и напряжения в произвольном узле при несимметричных коротких замыканиях

Как было показано выше, если при несимметричном коротком замыкании любого вида найден ток прямой последовательности в месте короткого замыкания, то определение токов обратной и нулевой последовательностей, полных токов поврежденных фаз, симметричных составляющих напряжения и полных напряжений отдельных фаз в месте короткого замыкания не встречает затруднений, так как все эти величины пропорциональны току прямой последовательности в месте короткого замыкания. Однако соответствующие соотношения справедливы только для точки короткого замыкания. Если же требуется найти ток в произвольной ветви исходной расчетной схемы или напряжение в произвольном узле этой схемы, необходимо отдельно найти каждую симметричную составляющую тока этой ветви и каждую симметричную составляющую напряжения в заданном узле, используя с этой целью схемы замещения соответствующих последовательностей. При этом следует учитывать, что только схемы замещения обратной и нулевой последовательностей являются пассивными, поэтому задача распределения токов в этих схемах при предварительно найденных токах и напряжениях обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания решается элемен-

тарно (токи в таких схемах распределяются обратнопропорционально сопротивлением их ветвей).

Что касается вопроса определения токов прямой последовательности в ветвях схемы замещения прямой последовательности и напряжений в различных ее узлах, то он является более сложным, так как схема замещения прямой последовательности является активной, причем ЭДС разных источников в общем случае неодинаковы. Поставленный вопрос решается путем использования известных методов расчета линейных электрических цепей.

После определения всех симметричных составляющих тока в заданной ветви исходной расчетной схемы и составляющих напряжения в заданном узле результирующий ток и результирующее напряжение особой фазы и других фаз определяются путем геометрического суммирования всех симметричных составляющих фазных токов и напряжений.

Чтобы дать представление о том, как изменяются различные симметричные составляющие напряжений особой фазы и других фаз по мере удаления от точки повреждения при несимметричных коротких замыканиях разных видов, на рис. 8.12 представлены эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы (без учета номера группы соединения трансформатора, но с учетом того, что его обмотки высшего напряжения соединены в звезду с заземленной нейтралью, а обмотки низшего напряжения соединены в треугольник) и векторные диаграммы напряжений в месте короткого замыкания, на выводах обмотки высшего напряжения трансформатора и на выводах синхронного генератора при простейшей исходной схеме, содержащей синхронный генератор, повышающий трансформатор и воздушную линию электропередачи (см. рис. 8.12,а, на котором занимаемая трансформатором зона обозначена римскими цифрами I–II).

Из эпюр напряжения видно, что при несимметричном коротком замыкании любого вида по мере удаления от точки повреждения в сторону источника энергии напряжение прямой последовательности увеличивается, а напряжения обратной и нулевой последовательностей по модулю уменьшаются, что приводит к уменьшению коэффициента несимметрии по напряжению $k_U = U_2/U_1$ и соответствующему уменьшению искажения векторных диаграмм напряжений.

При двухфазном коротком замыкании напряжения прямой и обратной последовательностей вдоль линии электропередачи изменяются так (см. рис. 8.12,б), что их сумма, равная результирующему напряжению на неповрежденной фазе линии электропередачи, остается неизменной. А при двухфазном коротком замыкании на землю (см. рис. 8.12,в) неизменной вдоль линии электропередачи остается сумма напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

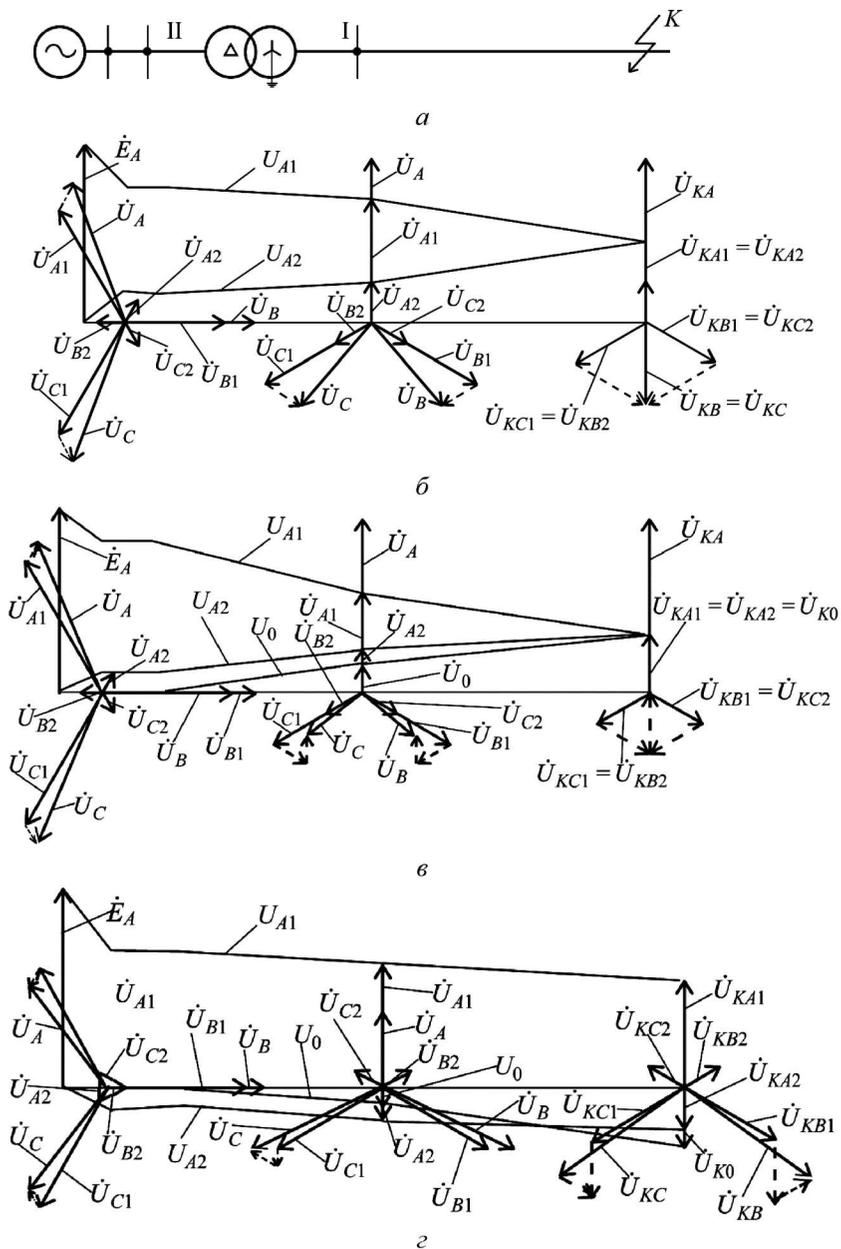


Рис. 8.12. Исходная схема (а) и эпюры распределения симметричных составляющих напряжений при двухфазном (б), двухфазном на землю (6) и однофазном (2) коротких замыканиях

При однофазном коротком замыкании (см. рис. 8.12,з) падения напряжения прямой и обратной последовательностей в линии электропередачи (и трансформаторе) по модулю одинаковы (линии эпюр параллельны) вследствие равенства сопротивлений прямой и обратной последовательностей линии электропередачи (трансформатора) и равенства токов этих последовательностей, а падение напряжения нулевой последовательности в линии электропередачи значительно больше, чем падения напряжения прямой (обратной) последовательности, так как сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи значительно превышает ее сопротивление прямой последовательности, а токи нулевой и прямой последовательностей одинаковы. Падения напряжения всех последовательностей в трансформаторе одинаковы.

Следует отметить, что эпюры напряжений со стороны обмотки высшего напряжения трансформатора характеризуют не только значения (в определенном масштабе), но и фазу симметричных составляющих напряжения особой фазы в разных точках. Что же касается эпюр напряжений со стороны обмотки низшего напряжения трансформатора, то они дают только относительные значения симметричных составляющих напряжения (без учета коэффициента трансформации и группы соединения обмоток трансформатора). А чтобы определить фактические фазы симметричных составляющих напряжения, необходимо учитывать группу соединения обмоток трансформатора. Нетрудно показать, что если несимметричное короткое замыкание происходит на стороне обмотки высшего напряжения трансформатора, то при переходе через трансформатор на сторону обмотки низшего напряжения векторы токов и напряжений прямой последовательности поворачиваются на угол $-\frac{\pi}{6}N$ (т.е. по часовой стрелке), а векторы токов и напряжений обратной последовательности – на угол $+\frac{\pi}{6}N$ (т.е. против часовой стрелки); здесь N – номер группы соединения обмоток трансформатора. При переходе через трансформатор в обратном направлении (т.е. со стороны обмотки низшего напряжения на сторону обмотки высшего напряжения) угол поворота симметричных составляющих токов и напряжений меняет свой знак на противоположный.

На рис. 8.12,б–г векторные диаграммы напряжений на выводах генератора построены применительно к трансформатору с группой соединения обмоток Y_0/Δ -11.

8.8. Соотношение токов короткого замыкания разных видов при замыканиях в одной и той же точке

Обычно при проверке проводников и электрических аппаратов по условиям короткого замыкания в качестве расчетного вида принимают трехфазное короткое замыкание. Однако не всегда при повреждении в заданной точке ток трехфазного короткого замыкания является наибольшим. Все зависит от вида короткого замыкания, его продолжительности и от соотношения параметров прямой, обратной и нулевой последовательностей исходной расчетной схемы относительно точки короткого замыкания.

Модуль отношения токов любого несимметричного (n) и трехфазного (3) коротких замыканий в произвольной, но одной и той же точке исходной расчетной схемы определяется выражением

$$\begin{aligned}
 K^{(n/3)} &= \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \cdot \frac{X_{1\text{ЭК}}}{X_{1\text{ЭК}} + \Delta X^{(n)}} = \\
 &= m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta X^{(n)}}{X_{1\text{ЭК}}}}, \quad (8.54)
 \end{aligned}$$

где $E^{(n)}$ и $E^{(3)}$ – ЭДС синхронной машины соответственно при несимметричном ($K^{(n)}$) и трехфазном ($K^{(3)}$) коротких замыканиях в рассматриваемый момент времени; $m^{(n)}$ и $\Delta X^{(n)}$ – коэффициент и дополнительное сопротивление, определяемые по табл. 8.2.

В произвольный момент времени $E^{(n)}$ и $E^{(3)}$ различны и могут быть приближенно определены только в схеме с одной машиной. Поэтому ограничимся лишь начальным моментом и установившимся режимом короткого замыкания и будем считать, что к моменту любого короткого замыкания синхронная машина работала с определенной нагрузкой, т.е. имела определенную сверхпереходную ЭДС, а в установившемся режиме короткого замыкания работала с предельным возбуждением.

В начальный момент двухфазного и трехфазного короткого замыкания в одной и той же точке эквивалентные сопротивления прямой и обратной последовательностей составляют $X_{1\text{ЭК}} = X'_d + X_{\text{вн}}$ и $X_{2\text{ЭК}} = X_2 + X_{\text{вн}}$, где $X_{\text{вн}}$ – сопротивление внешней по отношению к генератору цепи до расчетной точки короткого замыкания. По мере увеличения этого сопротивления отношение $X_{2\text{ЭК}}/X_{1\text{ЭК}}$ стремится к единице и $K^{(2/3)} \approx \sqrt{3}/2$. В установившемся ре-

жиме короткого замыкания $X_{1\text{ЭК}} > X_{2\text{ЭК}}$ и разница между ними минимальна при удаленном коротком замыкании и максимальна при повреждении на выводах синхронной машины, так как в этом случае $X_{1\text{ЭК}} = X_{\text{д}}$, а $X_{2\text{ЭК}} = X_2$. При этом $X_{1\text{ЭК}}$ превышает $X_{2\text{ЭК}}$ в 5 – 8 раз. Таким образом, в установившемся режиме в указанном случае $K^{(2/3)}$ близко к $\sqrt{3}$. Поэтому двухфазное короткое замыкание обычно является расчетным при проверке токопроводов, связывающих синхронные машины со сборными шинами или с трансформаторами, на термическую стойкость при коротком замыкании.

На основании сказанного можно сделать следующий вывод: в зависимости от удаленности расчетной точки короткого замыкания от генератора и расчетной продолжительности короткого замыкания $K^{(2/3)}$ находится в пределах $\sqrt{3}/2 < K^{(2/3)} < \sqrt{3}$.

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности расчетной схемы $X_{0\text{ЭК}}$ относительно расчетной точки короткого замыкания может значительно отличаться от $X_{1\text{ЭК}}$, колеблясь от $X_{0\text{ЭК}} \ll X_{1\text{ЭК}}$ (в сетях напряжением 110 кВ и выше, особенно при наличии автотрансформаторов с обмоткой низшего напряжения, соединенной в треугольник) до $X_{0\text{ЭК}} = \infty$ (в сетях 6 – 35 кВ). Поэтому отношение токов однофазного и трехфазного короткого замыкания в одной и той же точке, если считать ЭДС синхронной машины неизменной и $X_{1\text{ЭК}} \approx X_{2\text{ЭК}}$, находится в пределах $0 \leq K^{(1/3)} < 1,5$; вследствие этого в электрических сетях напряжением 110 кВ и выше ток однофазного короткого замыкания часто оказывается больше тока трехфазного короткого замыкания, с чем приходится считаться и принимать меры по ограничению токов однофазного короткого замыкания.

Отношение тока двухфазного короткого замыкания на землю к току трехфазного короткого замыкания $K^{(1,1/3)}$ в одной и той же точке при изменении $X_{0\text{ЭК}}$ от малых значений, когда $X_{0\text{ЭК}} \ll X_{1\text{ЭК}}$, до $X_{0\text{ЭК}} = \infty$ изменяется практически в таких же пределах, что и $K^{(2/3)}$. Это объясняется тем, что при $X_{0\text{ЭК}} \ll X_{1\text{ЭК}}$ коэффициент $m^{(1,1)}$ близок к $\sqrt{3}$ и отношение $\Delta X^{(1,1)}/X_{1\text{ЭК}}$ значительно меньше единицы, поэтому в соответствии с (8.55) коэффициент $K^{(1,1/3)}$ близок к $\sqrt{3}$, а при $X_{0\text{ЭК}} \gg X_{1\text{ЭК}}$ и, следовательно, $X_{0\text{ЭК}} \gg X_{2\text{ЭК}}$ коэффициент $m^{(1,1)}$ также приближается к $\sqrt{3}$ и отношение $\Delta X^{(1,1)}/X_{1\text{ЭК}}$ приближается к единице, вследствие чего коэффициент $K^{(1,1/3)}$ стремится к $\sqrt{3}/2$. При $X_{0\text{ЭК}} = \infty$ (т.е. при отсутствии в сети заземленных нейтралей) двухфазное короткое замыкание на землю переходит в двухфазное короткое замыкание, при этом $m^{(1,1)} = m^{(2)} = \sqrt{3}$ и $\Delta X^{(1,1)} = X_{2\text{ЭК}} \approx X_{1\text{ЭК}}$ и $K^{(1,1/3)} = K^{(2/3)} = \sqrt{3}/2$.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

9.1. Общие замечания

Несимметричные режимы, вызванные продольной несимметрией, в отличие от режимов при несимметричных коротких замыканиях могут быть продолжительными (например, при обрыве провода воздушной линии электропередачи). Это негативно влияет на электрические машины.

Все электрические машины проектируются и предназначаются для работы при симметричной нагрузке, когда токи во всех фазах одинаковы, поэтому допускают лишь небольшую несимметрию токов. Особенно нежелательны несимметричные режимы для турбогенераторов, что объясняется следующим. Магнитное поле, обусловленное током обратной последовательности якоря, наводит ЭДС двойной частоты не только в обмотке возбуждения, но и в массиве ротора. При столь высокой частоте магнитные потоки и вызванные ими токи не могут проникнуть глубоко в толщу ротора, поэтому все электромагнитные переходные процессы, связанные с наличием в машине обратнорвращающегося магнитного поля, совершаются в тонком внешнем слое «бочки» и деталей ротора, что приводит к большим потерям энергии и нагреву поверхности ротора.

Еще более опасным является нагрев пазовых клиньев ротора. Если в основной части ротора токи двойной частоты направлены вдоль зубцов, т.е. параллельно оси ротора, то вблизи его торцов эти токи, образуя замкнутый контур, изменяют направление и пересекают поверхности соприкосновения пазовых клиньев с зубцами ротора. Сопротивление некоторых контактов может оказаться большим, чем остальных, поэтому энергия от токов двойной частоты будет выделяться в основном в этих контактах, что приведет к высоким местным нагревам пазовых клиньев, их размягчению и опасности «вытекания» из пазов под действием центробежных сил.

Выделение тепла на поверхности ротора вызывает также дополнительный нагрев обмотки возбуждения турбогенератора, что в ряде случаев приводит к необходимости снижать ток возбуждения и соответственно нагрузку генератора.

Сказанным, однако, не ограничивается отрицательное влияние токов обратной последовательности на синхронные генераторы. Как у турбогенераторов, так и гидрогенераторов при несимметрии токов якоря одна из его фаз оказывается перегруженной. Например, при обрыве провода одной из фаз воздушной линии электропередачи и связи этой линии с генератором с помощью трансформатора, имеющего группу соединения обмоток Y/Δ -11, перегруженной оказывается фаза генератора, следующая по порядку за оборванной. Кроме этого, появление в якоре синхронного генератора тока обратной последовательности приводит к механическим вибрациям машины, что является следствием магнитной и электрической несимметрии ее ротора. Особенно существенно вибрации проявляются в гидрогенераторах.

Таким образом задача расчета тока обратной последовательности при продольной несимметрии и выбора мер по его уменьшению является весьма важной.

Ниже рассмотрены способы расчета токов и напряжений при продольной несимметрии, вызванной обрывом одной или двух фаз трехфазной цепи и включением в эту цепь несимметричного элемента. При этом приняты следующие исходные условия:

- несимметрия возникает между двумя частями G и F расчетной схемы (см. рис. 9.1), причем индуктивные сопротивления всех элементов этой схемы известны, а их активные сопротивления незначительны и не учитываются;

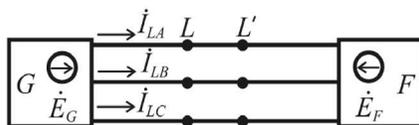


Рис. 9.1. Исходная расчетная схема

- обрыв фазы (фаз) или включение несимметричного элемента происходит между точками L и L' , расстояние между которыми до появления продольной несимметрии бесконечно мало (т.е. сопротивление соответствующей части проводника можно принимать равным нулю);

- расчетные токи положительны, если они направлены от G к F (т.е. $E_G > E_F$);

- при возникновении продольной несимметрии имеются условия для циркуляции токов нулевой последовательности.

Поскольку ЭДС обратной и нулевой последовательностей синхронной машины равны нулю, то симметричные составляющие падений напряжения в месте несимметрии связаны с симметричными составляющими токов соотношениями (они справедливы как для особой, так и для любой другой фазы):

$$\Delta \dot{U}_{L\Delta 1} = \dot{E}_{\Sigma K} - jX_{L1\Sigma K} \dot{I}_{L\Delta 1}; \quad (9.1)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = 0 - jX_{L2эк} \dot{I}_{LA2}; \quad (9.2)$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = 0 - jX_{L0эк} \dot{I}_{L0}, \quad (9.3)$$

где $X_{L1эк}$, $X_{L2эк}$, $X_{L0эк}$ – эквивалентные сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Для составления других уравнений, необходимых для определения симметричных составляющих токов и падений напряжения, как и при анализе несимметричных коротких замыканий, целесообразно использовать граничные условия, характерные для конкретных видов несимметрии.

9.2. Обрыв одной фазы

При обрыве одной фазы граничные условия (см. рис. 9.2) таковы:

$$\dot{I}_{LA} = 0; \quad (9.4)$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0; \quad (9.5)$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (9.6)$$

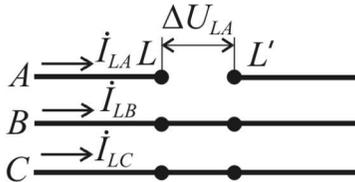


Рис. 9.2. Обрыв одной фазы

Условие (9.4), выраженное через симметричные составляющие тока особой фазы, имеет вид:

$$\dot{I}_{LA} = \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0} = 0. \quad (9.7)$$

Падение напряжения прямой последовательности между точками L и L' оборванной фазы

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \frac{1}{3} \left(\Delta \dot{U}_{LA} + a \Delta \dot{U}_{LB} + a^2 \Delta \dot{U}_{LC} \right),$$

или, с учетом (9.5) и (9.6),

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}.$$

Аналогичные расчеты для $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и $\Delta \dot{U}_{L0}$ дают:

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}$$

и

$$\Delta \dot{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}.$$

Таким образом

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}. \quad (9.8)$$

В соответствии с (9.8) можно приравнять правые части уравнений (9.2) и (9.3):

$$X_{L2эк} \dot{I}_{LA2} = X_{L0эк} \dot{I}_{L0},$$

откуда

$$\dot{I}_{L0} = \frac{X_{L2эк}}{X_{L0эк}} \dot{I}_{LA2}. \quad (9.9)$$

Подстановка этого выражения в (9.7) дает:

$$\dot{I}_{LA1} + \left(1 + \frac{X_{L2эк}}{X_{L0эк}} \right) \dot{I}_{LA2} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = - \frac{\dot{I}_{LA1}}{\left(1 + \frac{X_{L2эк}}{X_{L0эк}} \right)} = - \frac{X_{L0эк}}{X_{L2эк} + X_{L0эк}} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.10)$$

Если подставить последнее выражение в (9.9), то получим:

$$\dot{I}_{L0} = -\frac{X_{L2\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.11)$$

Чтобы получить искомое расчетное выражение для тока прямой последовательности \dot{I}_{LA1} , следует в соответствии с (9.8) приравнять правые части уравнений (9.1) и (9.2) и в полученном равенстве ток \dot{I}_{LA2} выразить через \dot{I}_{LA1} , используя выражение (9.10):

$$\dot{E}_{\varepsilon\kappa} - jX_{L1\varepsilon\kappa} \dot{I}_{LA1} = j \frac{X_{L2\varepsilon\kappa} X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{LA1}.$$

Откуда

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\varepsilon\kappa}}{j \left(X_{L1\varepsilon\kappa} + \frac{X_{L2\varepsilon\kappa} X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \right)}, \quad (9.12)$$

где верхний индекс (1) обозначает обрыв одной фазы.

Последнее выражение показывает, что для определения тока прямой последовательности при обрыве одной фазы следует в каждую фазу в месте обрыва (т.е. между точками L и L') включить дополнительный трехфазный элемент с сопротивлением $\Delta X_L^{(1)}$, равным сопротивлению параллельно соединенных эквивалентных схем замещения обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва, т.е.

$$\Delta X_L^{(1)} = \frac{X_{L2\varepsilon\kappa} X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}}. \quad (9.13)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы, как видно из (9.10) и (9.11), направлены против тока \dot{I}_{LA1} и в сумме с ним дают нуль.

Векторная диаграмма токов при обрыве одной фазы представлена на рис. 9.3.

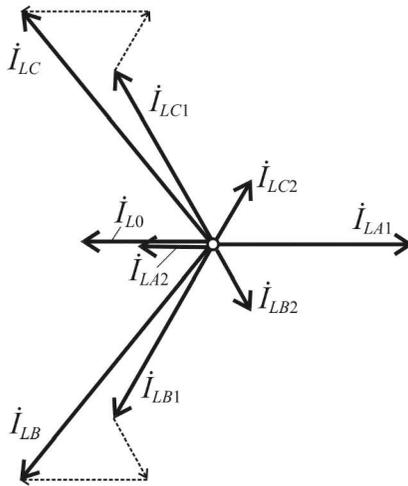


Рис. 9.3. Векторная диаграмма токов в месте обрыва одной фазы

Для определения падения напряжения прямой последовательности особой фазы в месте ее обрыва можно воспользоваться формулой (9.1). Однако чаще используют формулу, получаемую путем исключения из указанной формулы ЭДС $E_{\text{ЭК}}$ с помощью (9.12). При этом искомая формула принимает вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = j \frac{X_{L2\text{ЭК}} X_{L0\text{ЭК}}}{X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1} = j \Delta X_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.14)$$

Чтобы построить векторные диаграммы напряжений в точках обрыва L и L' , следует, используя схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (см. рис. 9.4 а, б, в) и, зная значения и направления токов соответствующих последовательностей особой фазы, найти симметричные составляющие напряжения этой фазы в точке L или точке L' .

Для этого, исходя из нулевого потенциала в начале схемы замещения любой последовательности, следует идти к точке L слева, учитывая в схеме замещения прямой последовательности ЭДС источника E_G и падение напряжения в эквивалентном сопротивлении прямой последовательности левой части схемы X_{G1} , или к точке L' справа, учитывая в схеме замещения прямой последовательности ЭДС источника E_F и падение напряжения в эквивалентном сопротивлении прямой последовательности правой части схемы X_{F1} , а в схемах обратной и нулевой последовательностей – падения напряжений в сопротивлениях X_{G2} и X_{G0} или X_{F2} и X_{F0} .

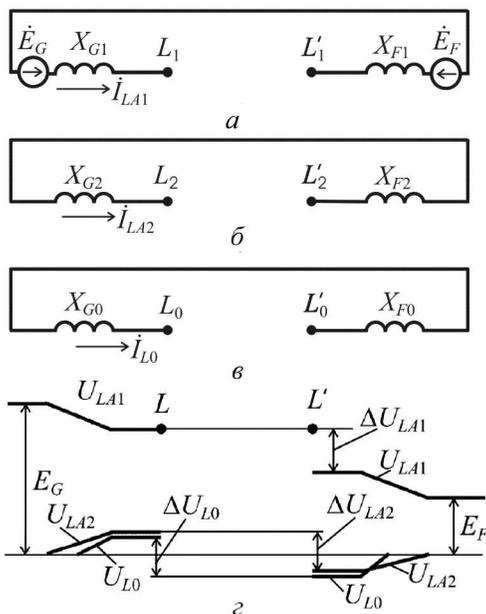


Рис. 9.4. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей и эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы (г)

Затем, учитывая симметричные составляющие падения напря-

жения в месте обрыва для особой фазы $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и $\Delta \dot{U}_{L0}$, определить симметричные составляющие напряжения этой фазы с другой стороны обрыва. При этом удобно пользоваться эпюрами распределения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, показанными на рис. 9.4,г (эпюр распределения напряжения нулевой последовательности условно показан короче других, так как обычно схема замещения нулевой последовательности содержит меньше элементов, чем схемы замещения прямой и обратной последовательностей). Как видно из рис. 9.4,г, при переходе от точки L к точке L' или от L' к L составляющие напряжений обратной и нулевой последовательностей особой фазы изменяют знак на противоположный (со стороны большей ЭДС они положительны, а со стороны меньшей ЭДС отрицательны). Полученные указанным способом векторные диаграммы напряжений в точках L и L' представлены на рис. 9.5. Из этих диаграмм и формулы (9.8) видно, что при переходе от точки L к точке L' напряжение оборванной фазы \dot{U}_{LA} уменьшается на $\Delta \dot{U}_{LA} = 3\Delta \dot{U}_{LA1}$, а напряжения неповрежденных фаз \dot{U}_{LB} и \dot{U}_{LC} остаются неизменными.

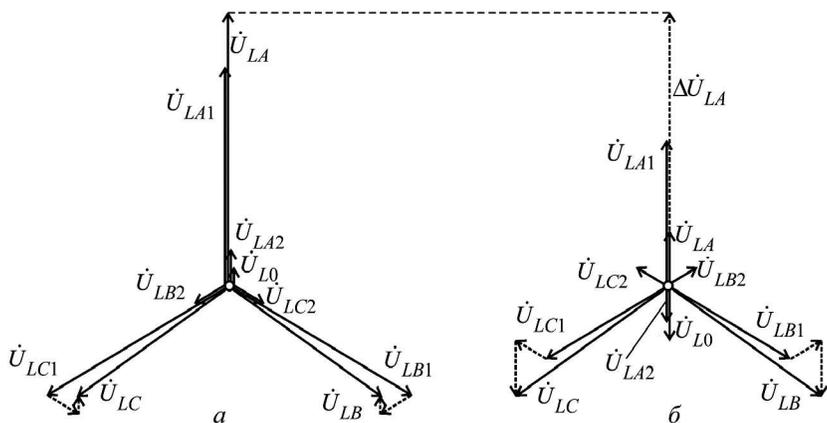


Рис. 9.5. Векторные диаграммы напряжений в точках L (а) и L' (б)

Комплексную схему замещения, в которой выполнялись бы все соотношения для симметричных составляющих токов и падения напряжения, характерных при обрыве одной фазы, получить путем непосредственного соединения схем замещения разных последовательностей невозможно, так как потенциалы в точках L_1 , L_2 и L_0 , а также в точках L'_1 , L'_2 и L'_0 , как видно из эпюр распределения напряжений (см. рис. 9.4,з), неодинаковы. Чтобы обеспечить выполнение соотношений (9.7) и (9.8) и не смещать потенциалы в схемах обратной и нулевой последовательностей, необходимо схемы замещения разных последовательностей связать по месту обрыва фазы с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентом трансформации $n = 1/1$, как показано на рис. 9.6. Связывающая часть схемы, включающая вторичные обмотки идеальных трансформаторов, обеспечивает равенство симметричных составляющих падения напряжения в месте обрыва и равенство нулю суммы симметричных составляющих тока оборванной фазы.

Более широкое применение, однако, находит упрощенная комплексная схема замещения, которая представлена на рис. 9.7. Она получена непосредственным соединением между собой точек L_1 , L_2 и L_0 , а также точек L'_1 , L'_2 и L'_0 . При этом потенциалы во всех точках схем замещения обратной и нулевой последовательностей, в том числе и в началах схем, оказываются смещенными, поэтому такая комплексная схема замещения справедлива только для симметричных составляющих токов.

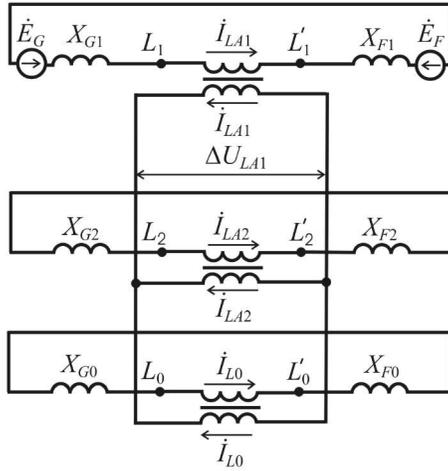


Рис. 9.6. Комплексная схема замещения при обрыве одной фазы

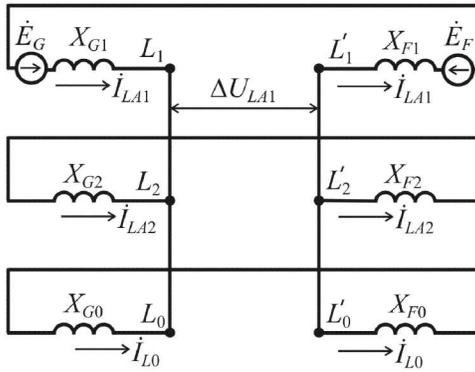


Рис. 9.7. Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве одной фазы

9.3. Обрыв двух фаз

При обрыве двух фаз граничные условия (см. рис. 9.8) выражаются следующим образом:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = 0; \quad (9.15)$$

$$\dot{I}_{LB} = 0; \quad (9.16)$$

$$\dot{I}_{LC} = 0. \quad (9.17)$$

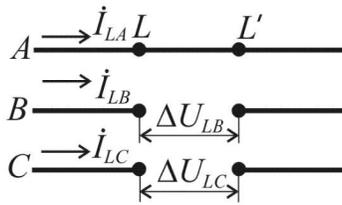


Рис. 9.8. Обрыв двух фаз

Условие (9.15), выраженное через симметричные составляющие падения напряжения между точками L и L' особой фазы, можно представить так:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = \Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = 0. \quad (9.18)$$

Используя формулы для определения симметричных составляющих тока фазы A по значениям полных токов разных фаз и принимая во внимание условия (9.16) и (9.17), получим:

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{L0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{LA}. \quad (9.19)$$

Чтобы найти расчетное выражение для определения тока прямой последовательности неповрежденной фазы \dot{I}_{LA1} , следует сложить левые и правые части уравнений (9.1) – (9.3) и принять во внимание (9.18) и (9.19):

$$0 = \dot{E}_{\text{эк}} - j(X_{L1\text{эк}} + X_{L2\text{эк}} + X_{L0\text{эк}}) \dot{I}_{LA1},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\text{эк}}}{j(X_{L1\text{эк}} + X_{L2\text{эк}} + X_{L0\text{эк}})}, \quad (9.20)$$

где верхний индекс (2) обозначает обрыв двух фаз.

Таким образом, чтобы определить ток прямой последовательности неповрежденной фазы при обрыве двух фаз, необходимо в каждую фазу в месте обрыва (т.е. между точками L и L') включить дополнительный трехфазный элемент с сопротивлением $\Delta X_L^{(2)}$, равным сопротивлению последовательно соединенных эквивалентных схем замещения обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва, т.е.

$$\Delta X_L^{(2)} = X_{L2\text{эк}} + X_{L0\text{эк}}. \quad (9.21)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей, как видно из (9.19), равны току прямой последовательности, совпадают с ним по

фазе и составляют 1/3 от полного тока неповрежденной фазы I_{LA} . В соответствии с этим векторная диаграмма токов при обрыве двух фаз имеет вид, как показано на рис. 9.9.

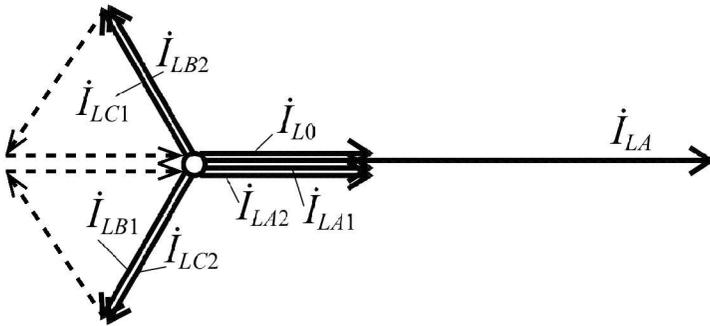


Рис. 9.9. Векторная диаграмма токов в месте обрыва двух фаз

Падение напряжения прямой последовательности в особой фазе между точками L и L' может быть определено или по формуле (9.1), или по формуле, получаемой путем исключения из (9.1) ЭДС $E_{эк}$, используя с этой целью формулу (9.20). В результате формула для падения напряжения прямой последовательности фазы A приобретает вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = j(X_{L,2эк} + X_{L,0эк}) \dot{I}_{LA1} = j\Delta X_L^{(2)} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.22)$$

Соответствующие падения напряжения обратной и нулевой последовательностей в особой фазе определяют по формулам (9.2) и (9.3).

Чтобы построить векторные диаграммы напряжений в точках обрыва двух фаз L и L' , необходимо, как и при обрыве одной фазы, предварительно найти симметричные составляющие напряжений особой фазы или в точке L , или в точке L' . Затем, учитывая симметричные составляющие падения напряжения в месте обрыва для особой фазы, определяемые по формулам (9.22), (9.2) и (9.3), найти симметричные составляющие напряжения этой фазы с другой стороны обрыва. Поскольку при обрыве двух фаз не только ток прямой последовательности, но и токи обратной и нулевой последовательностей положительны (и численно равны друг другу), то со стороны большей ЭДС напряжения обратной и нулевой последовательностей от начала схемы до точки L отрицательные, а при переходе от точки L к точке L' изменяют знак, т.е. становятся положительными и совпадают по фазе с напряжением прямой последовательности особой фазы (при этом следует иметь в виду, что, как видно из формулы

$$(9.18), \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = -\Delta \dot{U}_{LA1}).$$

Характер эпюр распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы при обрыве двух фаз показан на рис. 9.10,

а векторные диаграммы напряжений в точках обрыва L и L' представлены на рис. 9.11. Очевидно, при переходе от точки L к точке L' остается неизменным только напряжение неповрежденной фазы.

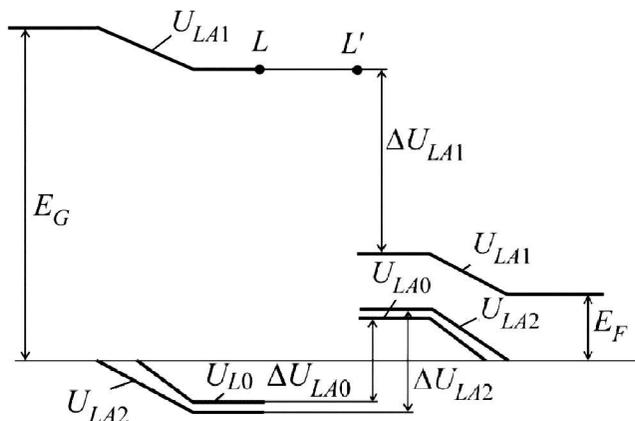


Рис. 9.10. Эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы при обрыве двух фаз

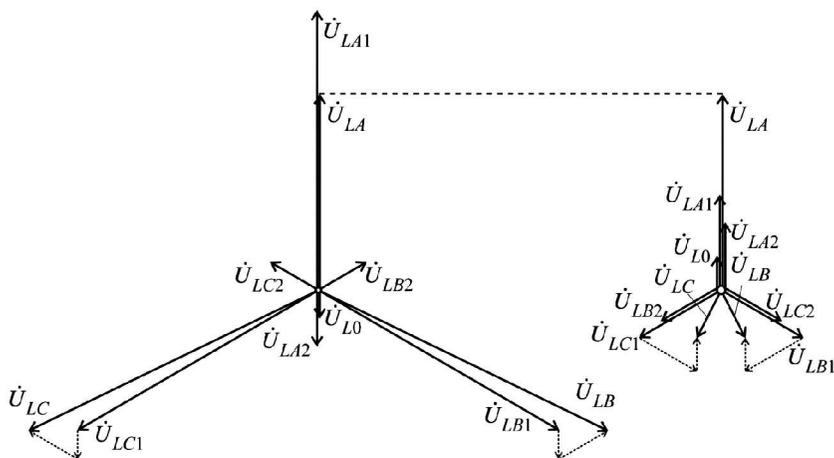


Рис. 9.11. Векторные диаграммы напряжений в точках L (а) и L' (б)

Комплексная схема замещения, в которой выполняются все соотношения, характерные для симметричных составляющих токов и напряжений различных последовательностей при обрыве двух фаз, без смещения потенциалов в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей, возможна как и при обрыве одной фазы только при использовании для связи схем замещения различных последова-

тельностью идеальных трансформаторов с коэффициентом трансформации $n = 1/1$. Такая схема приведена на рис. 9.12. В ней связывающая часть, получаемая путем последовательного соединения вторичных обмоток идеальных трансформаторов, обеспечивает равенство симметричных составляющих тока здоровой фазы [(соотношение (9.19)] и равенство нулю суммы симметричных составляющих падения напряжения между точками L и L' [соотношение (9.18)].

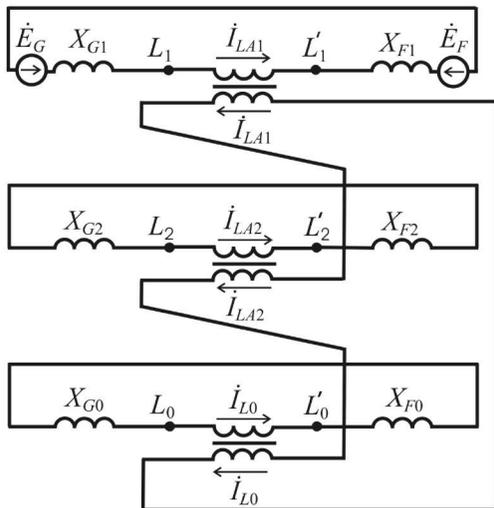


Рис. 9.12. Комплексная схема замещения при обрыве двух фаз

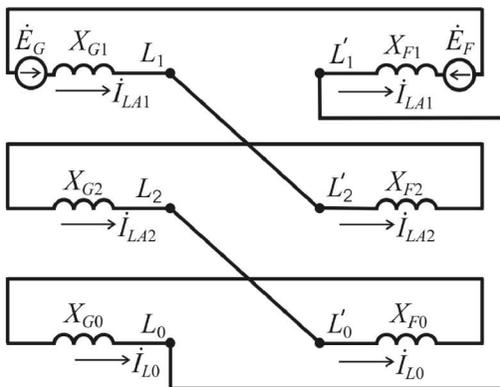


Рис. 9.13. Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве двух фаз

Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве двух фаз показана на рис. 9.13. Она получена путем непосредственного соединения между собой точек L_1 и L'_2 , L_2 и L'_0 , L_0 и L'_1 . При этом потенциалы во всех точках схем замещения обратной и нулевой последовательностей оказываются смещенными, но равенство симметричных составляющих токов неповрежденной фазы, определяемое соотношением (9.19), соблюдается. Таким образом, эта комплексная схема замещения справедлива только для токов.

9.4. Включение в одну из фаз элемента, обладающего сопротивлением

При включении элемента с сопротивлением Z в одну из фаз (фазу A) граничные условия, как следует из рис. 9.14, таковы:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = Z \dot{I}_{LA}; \quad (9.23)$$

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0; \quad (9.24)$$

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (9.25)$$

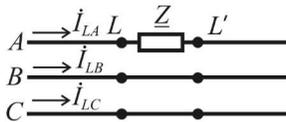


Рис. 9.14. Включение элемента с сопротивлением Z в фазу A

Поскольку при включении в фазу A элемента с сопротивлением Z второе и третье граничные условия те же, что и при обрыве этой фазы, то равенства (9.8) справедливы и в рассматриваемом случае. Справедливо и соотношение (9.9).

Граничное условие (9.23) с учетом соотношения (9.8) можно записать так:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = Z \left(\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0} \right) = 3 \Delta \dot{U}_{LA2},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0} = \frac{\Delta \dot{U}_{LA2}}{Z/3}.$$

Если с помощью (9.9) исключить из этого выражения \dot{I}_{L0} и учесть (9.2), то получим

$$\left(1 + \frac{jX_{L2эк}}{jX_{L0эк}} + j\frac{jX_{L2эк}}{\underline{Z}/3}\right) \dot{I}_{LA2} = -\dot{I}_{LA1},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{1}{jX_{L2эк} \left(\frac{1}{jX_{L2эк}} + \frac{1}{jX_{L0эк}} + \frac{1}{\underline{Z}/3} \right)} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.26)$$

Чтобы получить расчетное выражение для тока прямой последовательности, следует в соответствии с (9.8) приравнять правые части (9.1) и (9.2) и исключить из полученного равенства ток \dot{I}_{LA2} с помощью (9.26):

$$\dot{E}_{эк} - jX_{L1эк} \dot{I}_{LA1} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{L2эк}} + \frac{1}{jX_{L0эк}} + \frac{1}{\underline{Z}/3}} \dot{I}_{LA1}.$$

Из этого выражения следует, что ток прямой последовательности особой фазы (фазы *A*) при включении в нее элемента с сопротивлением \underline{Z} определяется как

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{эк}}{jX_{L1эк} + \frac{1}{\frac{1}{jX_{L2эк}} + \frac{1}{jX_{L0эк}} + \frac{1}{\underline{Z}/3}}} \quad (9.27)$$

или

$$\begin{aligned} \dot{I}_{LA1}^{(1)} &= \frac{\dot{E}_{эк}}{jX_{L1эк} + jX_{L2эк} // jX_{L0эк} // \underline{Z}/3} = \\ &= \frac{\dot{E}_{эк}}{jX_{L1эк} + \Delta \underline{Z}_L^{(1)}}, \end{aligned} \quad (9.27a)$$

где

$$\Delta Z_L^{(1)} = jX_{L2\text{ЭК}} // jX_{L0\text{ЭК}} // Z/3. \quad (9.28)$$

В выражениях (9.27), (9.27а) и (9.28) верхний индекс (I) обозначает включение в одну фазу элемента, обладающего сопротивлением.

Выражение (9.27а) показывает, что для определения тока прямой последовательности при включении в одну из фаз элемента с сопротивлением Z необходимо в каждую фазу между точками L и L' включить трехфазный симметричный элемент с сопротивлением, равным $\Delta Z_L^{(1)}$ и представляющим собой параллельно соединенные сопротивления $X_{L2\text{ЭК}}$, $X_{L0\text{ЭК}}$ и $Z/3$.

При найденном токе прямой последовательности ток обратной последовательности определяется по формуле (9.26), которую можно представить так:

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\Delta Z_L^{(1)}}{jX_{L2\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.29)$$

Ток нулевой последовательности в соответствии с формулами (9.9) и (9.29)

$$\dot{I}_{L0} = -\frac{\Delta Z_L^{(1)}}{jX_{L0\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.30)$$

Для определения падения напряжения прямой последовательности на сопротивлении Z можно использовать формулу (9.1) или формулу, получаемую исключением из (9.1) ЭДС $E_{\text{ЭК}}$ с помощью (9.27а):

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \left(jX_{L2\text{ЭК}} // jX_{L0\text{ЭК}} // Z/3 \right) \dot{I}_{LA1} = \Delta Z_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.31)$$

Зная параметры исходной расчетной схемы и значение сопротивления включаемого элемента, нетрудно определить симметричные составляющие токов особой фазы, симметричные составляющие потенциала в точке L или L' и падение напряжения прямой последовательности на сопротивлении Z . Это позволяет построить векторную диаграмму токов и векторные диаграммы напряжений с обеих сторон включенного сопротивления.

Комплексная схема замещения, справедливая как для симметричных составляющих токов, так и для симметричных составляющих напряжений, приведена на рис. 9.15. Она составлена с использованием идеальных трансформаторов. Упрощенная комплексная схема замещения, которая справедлива только для симметричных составляющих тока фазы A , но потенциалы в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей смещены, приведена на рис. 9.16.

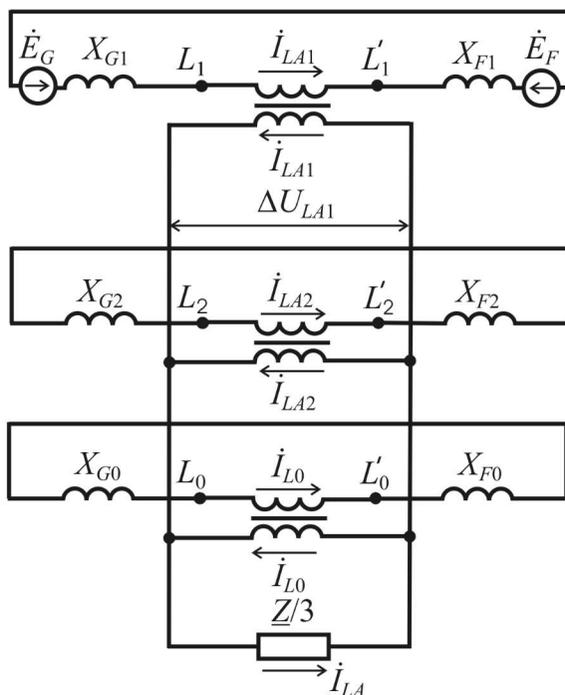


Рис. 9.15. Комплексная схема замещения при включении в фазу A элемента с сопротивлением Z

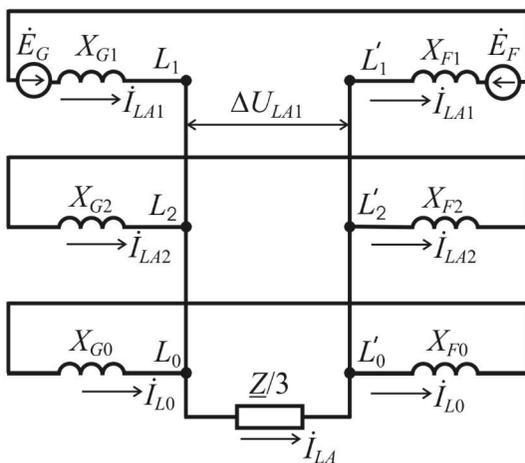


Рис. 9.16. Упрощенная комплексная схема замещения при включении в фазу A элемента с сопротивлением \underline{Z}

9.5. Включение в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением

В случае включения в фазы B и C элементов с одинаковым сопротивлением Z граничные условия (см. рис. 9.17) таковы:

$$\dot{U}_{LA} = 0; \quad (9.32)$$

$$\dot{U}_{LB} = \underline{Z} \dot{I}_{LB}; \quad (9.33)$$

$$\dot{U}_{LC} = \underline{Z} \dot{I}_{LC}. \quad (9.34)$$

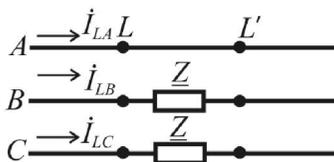


Рис. 9.17. Включение элементов с одинаковым сопротивлением \underline{Z} в фазы B и C

Первое условие, выраженное через симметричные составляющие падения напряжения, имеет вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{L0} = 0. \quad (9.35)$$

Составляющая падения напряжения прямой последовательности особой фазы (фазы A) с учетом (9.32) – (9.34) равна

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{1}{3} \left(\underline{Z} a \dot{I}_{LB} + \underline{Z} a^2 \dot{I}_{LC} \right) = \\ &= \frac{\underline{Z}}{3} \left[a \left(\dot{I}_{LB1} + \dot{I}_{LB2} + \dot{I}_{L0} \right) + a^2 \left(\dot{I}_{LC1} + \dot{I}_{LC2} + \dot{I}_{L0} \right) \right]. \end{aligned}$$

Входящие в это выражение симметричные составляющие токов фаз B и C целесообразно выразить через симметричные составляющие тока особой фазы:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{\underline{Z}}{3} \left[a \left(a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0} \right) + a^2 \left(a \dot{I}_{LA1} + a^2 \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{L0} \right) \right] = \\ &= \frac{\underline{Z}}{3} \left(2 \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{L0} \right). \end{aligned} \quad (9.36)$$

Таким же путем могут быть получены выражения для $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и $\Delta \dot{U}_{L0}$:

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{\underline{Z}}{3} \left(2 \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{L0} \right); \quad (9.37)$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = \frac{\underline{Z}}{3} \left(2 \dot{I}_{L0} - \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} \right). \quad (9.38)$$

Чтобы получить расчетное выражение для определения тока прямой последовательности особой фазы, необходимо предварительно токи обратной и нулевой последовательностей в (9.36) – (9.38) выразить через ток прямой последовательности. С этой целью следует в указанных выражениях симметричные составляющие падения напряжения $\Delta \dot{U}_{LA1}$, $\Delta \dot{U}_{LA2}$ и $\Delta \dot{U}_{L0}$ заменить их выражени-

ями, используя уравнения (9.1) – (9.3), и сначала найти разности левых (записанных указанным способом) и правых частей (9.36) и (9.37):

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{L1\text{ЭК}} \dot{I}_{LA1} + jX_{L2\text{ЭК}} \dot{I}_{LA2} = \underline{Z} \left(\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} \right),$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = - \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}} - \left(jX_{L1\text{ЭК}} + \underline{Z} \right) \dot{I}_{LA1}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}}. \quad (9.39)$$

А из разности левых и правых частей (9.36) и (9.38) следует:

$$\dot{I}_{L0} = - \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}} - \left(jX_{L1\text{ЭК}} + \underline{Z} \right) \dot{I}_{LA1}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}}. \quad (9.40)$$

Выражения (9.39) и (9.40) позволяют исключить из уравнений (9.2) и (9.3) токи \dot{I}_{LA2} и \dot{I}_{L0} . Если теперь сложить левые и правые части уравнений (9.1) – (9.3) и учесть (9.35), то после соответствующих преобразований получим следующую формулу для определения тока прямой последовательности при включении в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{LA1}^{(\text{II})} &= \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \frac{\left(\frac{jX_{L2\text{ЭК}} \underline{Z}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}} + \frac{jX_{L0\text{ЭК}} \underline{Z}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}} \right) \underline{Z}}{\frac{jX_{L2\text{ЭК}} \underline{Z}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}} + \frac{jX_{L0\text{ЭК}} \underline{Z}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}} + \underline{Z}} = \\ &= \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \left[\left(jX_{L2\text{ЭК}} // \underline{Z} + jX_{L0\text{ЭК}} // \underline{Z} \right) // \underline{Z} \right]}, \end{aligned} \quad (9.41)$$

или

$$\dot{I}_{LA1}^{(\text{II})} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \Delta \underline{Z}_L^{(\text{II})}}, \quad (9.42)$$

где

$$\Delta Z_L^{(II)} = \left[\left(jX_{L2\text{ЭК}} // Z + jX_{L0\text{ЭК}} // Z \right) \right] // Z. \quad (9.43)$$

В выражениях (9.41), (9.42) и (9.43) верхний индекс (II) обозначает включение элементов с одинаковым сопротивлением в две фазы.

Выражение (9.42) показывает, что для определения тока прямой последовательности особой фазы в случае включения элементов с одинаковым сопротивлением в две другие фазы необходимо в каждую из фаз трехфазной цепи между точками L и L' включить элемент с сопротивлением $\Delta Z_L^{(II)}$, определяемым по формуле (9.43).

Из выражений (9.39) и (9.40), определяющих токи обратной и нулевой последовательностей, целесообразно исключить ЭДС $E_{\text{ЭК}}$, используя с этой целью формулу (9.42). При этом формулы для определения \dot{I}_{LA2} и \dot{I}_{L0} принимают вид:

$$\dot{I}_{LA2} = \frac{Z - \Delta Z_L^{(II)}}{jX_{L2\text{ЭК}} + Z} \dot{I}_{LA1}; \quad (9.44)$$

$$\dot{I}_{L0} = \frac{Z - \Delta Z_L^{(II)}}{jX_{L0\text{ЭК}} + Z} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.45)$$

Падение напряжения прямой последовательности в особой фазе можно определить по формуле (9.1). Однако чаще используют выражение, полученное исключением из этой формулы ЭДС $E_{\text{ЭК}}$ с помощью (9.42):

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta Z_L^{(II)} \dot{I}_{LA1}. \quad (9.46)$$

Таким образом падение напряжения прямой последовательности между точками L и L' при включении в две фазы каких-либо элементов с одинаковым сопротивлением Z равно падению напряжения от тока прямой последовательности в элементе с сопротивлением $\Delta Z_L^{(II)}$, определяемом по формуле (9.43), если их включить между точками L и L' во все три фазы (убрав из фаз B и C элементы, вызвавшие несимметрию).

Падения напряжения обратной и нулевой последовательностей в особой фазе между точками L и L' определяют по формулам (9.2) и (9.3).

Комплексная схема замещения для расчета симметричных составляющих токов и падений напряжения при включении в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением, в которой схемы замещения разных последовательностей связаны между собой с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентом трансформации $n = 1/1$, приведена на рис. 9.18, а упрощенная комплексная схема замещения, в которой выполняются все характерные соотношения для симметричных составляющих токов, но потенциалы у схем замещения обратной и нулевой последовательностей смещены, представлена на рис. 9.19.

Как в первом, так и во втором случае $\Delta Z_L^{(II)}$ сохраняется, но во втором случае точка L_1 соединяется с точкой L'_2 , L_2 – с точкой L'_0 , L_0 – с точкой L'_1 , хотя на самом деле потенциалы связываемых между собой точек неодинаковы. Тем не менее упрощенная комплексная схема замещения позволяет сравнительно просто определить все симметричные составляющие искомых токов и падений напряжения в месте возникновения несимметрии.

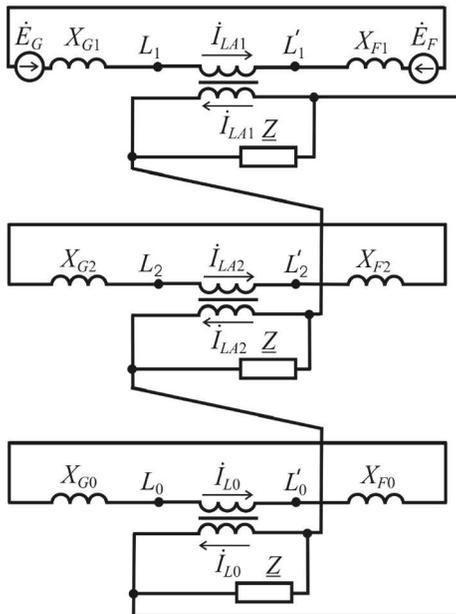


Рис. 9.18. Комплексная схема замещения при включении в фазы B и C элементов с одинаковым сопротивлением Z

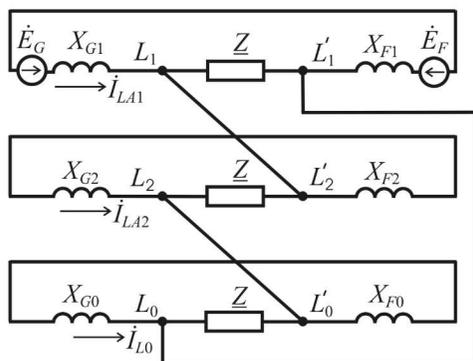


Рис. 9.19. Упрощенная комплексная схема замещения при включении в фазы *B* и *C* элементов с одинаковым сопротивлением \underline{Z}

9.6. Особенности расчета токов и напряжений при однократной продольной несимметрии

Формулы (9.12), (9.20), (9.27) и (9.41) для определения тока прямой последовательности при однократной продольной несимметрии разных видов имеют одинаковую структуру, поэтому могут быть представлены в обобщенном виде:

$$\dot{I}_{LA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{\text{эк}}}{jX_{L1\text{эк}} + \Delta \underline{Z}_L^{(n)}}, \quad (9.47)$$

где верхний индекс (*n*) обозначает вид однократной продольной несимметрии.

Входящее в формулу (9.47) сопротивление $\Delta \underline{Z}_L^{(n)}$ представляет собой сопротивление некоторого эквивалентного симметричного трехфазного элемента, включаемого между точками *L* и *L* вместо обрыва или вместо элемента с заданным сопротивлением \underline{Z} , вызывающего несимметрию. Таким образом при однократной продольной несимметрии ток прямой последовательности можно определить как ток эквивалентного симметричного режима, получаемого путем замены обрыва (обрывов) или включаемого несимметричного элемента трехфазным симметричным элементом, сопротивление которого при обрывах определяется только эквивалентными сопротивлениями схем замещения обратной и нулевой последовательно-

стей по отношению к месту несимметрии, а при включении несимметричного элемента – и его сопротивлением.

Это положение обычно называют *правилом эквивалентности тока прямой последовательности при однократной продольной несимметрии*. Оно позволяет расчет тока прямой последовательности при такой несимметрии свести к расчету тока симметричного режима.

Формулы (9.14), (9.22), (9.31) и (9.46) для определения падения напряжения прямой последовательности на особой фазе в месте возникновения продольной несимметрии разных видов отличаются только значением $\Delta \underline{Z}_L^{(n)}$ эквивалентного трехфазного симметричного элемента, поэтому они тоже могут быть представлены в обобщенном виде:

$$\Delta \dot{U}_{LA1}^{(n)} = \Delta \underline{Z}_L^{(n)} \dot{I}_{LA1}^{(n)}. \quad (9.48)$$

Таким образом при всех рассмотренных видах однократной продольной несимметрии падение напряжения прямой последовательности между точками L и L' , где возникла несимметрия, равно падению напряжения от тока прямой последовательности в эквивалентном трехфазном элементе, имеющем сопротивление $\Delta \underline{Z}_L^{(n)}$.

Выражения для определения сопротивления $\Delta \underline{Z}_L^{(n)}$, а также соотношения между токами прямой, обратной и нулевой последовательностей особой фазы и формулы для определения симметричных составляющих падения напряжения в месте однократной продольной несимметрии разных видов приведены в табл. 9.1.

В отличие от расчетных выражений для несимметричных коротких замыканий, которые дают возможность определить не только симметричные составляющие тока короткого замыкания, но и симметричные составляющие напряжения в точке короткого замыкания, расчетные выражения для однократной продольной несимметрии, полученные из уравнений (9.1) – (9.3) и уравнений, составленных с использованием граничных условий, позволяют определить лишь симметричные составляющие тока и симметричные составляющие падения напряжения в месте несимметрии. Для определения же симметричных составляющих напряжения в точке L или L' необходимо произвести дополнительные расчеты, используя схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и найденные значения симметричных составляющих токов особой фазы. При этом целесообразно использовать эпюры распределения симметричных составляющих напряжений. В случае сложной расчетной схемы

предварительно необходимо найти распределение токов по ветвям схем замещения разных последовательностей, учитывая при этом, что схема замещения прямой последовательности является активной.

Таблица 9.1

Формулы для определения значений различных величин при однократной продольной несимметрии разных видов

| Обозначение величины | Формула для определения значения расчётной величины | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| | при обрыве | | при включении элемента, обладающего сопротивлением \underline{Z} | |
| | одной фазы | двух фаз | в одну фазу | в две фазы |
| $\Delta \underline{Z}_L^{(n)}$ | $jX_{L2\text{ЭК}} // jX_{L0\text{ЭК}}$ | $jX_{L2\text{ЭК}} + jX_{L0\text{ЭК}}$ | $jX_{L2\text{ЭК}} // jX_{L0\text{ЭК}} // \underline{Z}/3$ | $(jX_{L2\text{ЭК}} // \underline{Z}_+ + jX_{L0\text{ЭК}} // \underline{Z}) // \underline{Z}_-$ |
| \dot{I}_{LA2} | $-\frac{X_{L0\text{ЭК}}}{X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}$ | \dot{I}_{LA1} | $-\frac{\Delta \underline{Z}_L^{(1)}}{jX_{L2\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}$ | $\frac{\underline{Z}_- - \Delta \underline{Z}_L^{(II)}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}_-} \dot{I}_{LA1}$ |
| \dot{I}_{L0} | $-\frac{X_{L2\text{ЭК}}}{X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}$ | \dot{I}_{LA1} | $-\frac{\Delta \underline{Z}_L^{(1)}}{jX_{L0\text{ЭК}}} \dot{I}_{LA1}$ | $\frac{\underline{Z}_- - \Delta \underline{Z}_L^{(II)}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}_-} \dot{I}_{LA1}$ |
| $\Delta \dot{U}_{LA1}$ | $j\Delta X_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $j\Delta X_L^{(2)} \dot{I}_{LA1}$ | $\Delta \underline{Z}_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $\Delta \underline{Z}_L^{(II)} \dot{I}_{LA1}$ |
| $\Delta \dot{U}_{LA2}$ | $j\Delta X_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $-jX_{L2\text{ЭК}} \dot{I}_{LA2}$ | $\Delta \underline{Z}_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $-jX_{L2\text{ЭК}} \frac{\underline{Z}_- - \Delta \underline{Z}_L^{(II)}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}_-} \dot{I}_{LA1}$ |
| $\Delta \dot{U}_{L0}$ | $j\Delta X_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $-jX_{L0\text{ЭК}} \dot{I}_{LA1}$ | $\Delta \underline{Z}_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}$ | $-jX_{L0\text{ЭК}} \frac{\underline{Z}_- - \Delta \underline{Z}_L^{(II)}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}_-} \dot{I}_{LA1}$ |

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

10.1. Общие замечания

В электроэнергетических системах возникают не только простые (однократные) поперечные и продольные несимметрии, но и сложные несимметрии. Значительная часть несимметрий такого вида – двойные несимметричные повреждения, к которым относятся различные комбинации отдельных несимметричных коротких замыканий в двух разных точках электрической сети; несимметричные короткие замыкания, сопровождающиеся обрывом одной или двух фаз трехфазной цепи; два одновременных обрыва фаз в различных местах; несимметричные короткие замыкания с включением в фазы элементов, обладающих сопротивлением, и т.д.

Обрывы фаз при коротком замыкании возможны как вследствие обрыва проводов, так и вследствие неодновременного расхождения контактов выключателя в отдельных фазах. В течение очень короткого времени неодновременный обрыв и короткое замыкание имеют место при отключении короткого замыкания, так как дуга гаснет сначала в одной фазе, в то время как в других фазах или в одной из них может сохраняться короткое замыкание. Таким образом двойные несимметричные нарушения режима могут происходить или одновременно, или в разное время. В последнем случае необходимо иметь в виду, что второе нарушение несимметрии происходит при особых начальных условиях. Ниже рассматриваются только двойные несимметричные повреждения, которые происходят одновременно.

При использовании для расчетов двойных несимметричных повреждений метода симметричных составляющих оказываются неизвестными значения 12 величин – по три симметричных составляющих тока и по три составляющих напряжения в месте каждого повреждения. Для их определения применяют различные способы:

- с использованием комплексных схем замещения;
- путем составления и решения системы расчетных уравнений, связывающих симметричные составляющие определяемых токов и напряжений (шесть уравнений составляют на основании граничных условий, характерных для отдельных видов повреждений, и шесть других – из схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей);
- с использованием так называемых производных (эквивалентных) схем замещения прямой последовательности.

Ниже рассмотрены все эти способы.

10.2. Использование комплексных схем замещения

Расчет токов и напряжений при сложных несимметричных повреждениях с использованием комплексных схем замещения дает возможность сравнительно просто выявлять влияние параметров различных элементов расчетной схемы на симметричные составляющие токов и напряжений, определять значения этих величин, строить векторные диаграммы токов и напряжений и т.д.

Любое сложное несимметричное повреждение можно разложить на отдельные простые (однократные) несимметричные повреждения, поэтому комплексная схема замещения для сложного повреждения может быть составлена из известных комплексных схем замещения для простых несимметричных повреждений. Однако такие схемы с точки зрения возможности их многократного использования при составлении комплексной схемы замещения для сложного несимметричного повреждения можно разделить на две группы:

- комплексные схемы, в которых объединены только эквипотенциальные точки и напряжение любой последовательности в каждой точке может быть определено относительно общей точки с нулевым потенциалом всей комплексной схемы (к таким схемам относятся комплексные схемы для двухфазного короткого замыкания и двухфазного короткого замыкания на землю), а также комплексные схемы, полученные с использованием промежуточных идеальных трансформаторов;
- комплексные схемы, в которых соединение схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей производится путем искусственного смещения потенциалов всех точек схем обратной и нулевой последовательностей и по этой причине справедливы только для токов.

Если комплексные схемы замещения для простых несимметричных повреждений первой группы можно многократно использовать при составлении комплексной схемы замещения для сложного несимметричного повреждения, то объединение, т.е. использование комплексных схем замещения второй группы при двух и более одновременных несимметричных повреждениях недопустимо, так как наличие смещения потенциалов в схемах обратной и нулевой последовательностей, в общем случае различного для отдельных простых несимметричных повреждений, вызывает появление в объединенной комплексной схеме замещения токов, которых на самом деле не должно быть.

В качестве примеров на рис. 10.1 показана объединенная комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания на землю фаз *B* и *C* в точке *K* (на рис. 10.1 точке *K* соответствуют точки *K*₁, *K*₂, *K*₀ на схемах разных последовательностей) и двухфазного короткого замыкания этих же фаз в точке *M* (точки *M*₁, *M*₂, *M*₀), а на рис. 10.2 – комплексная схема замещения для случая однофазного короткого замыкания фазы *A* в точке *K* и двухфазного короткого замыкания на землю фаз *B* и *C* в точке *M*. Здесь электрическое соединение схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей осуществлено только в месте двухфазного короткого замыкания на землю, а в месте однофазного короткого замыкания связь этих схем выполнена с помощью идеальных промежуточных трансформаторов с коэффициентом трансформации 1/1.

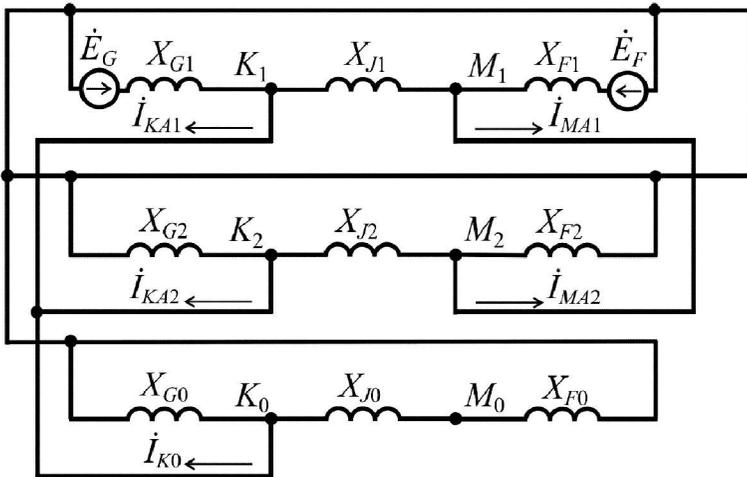


Рис. 10.1. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю фаз *B* и *C* в точке *K* и двухфазном коротком замыкании тех же фаз в точке *M*

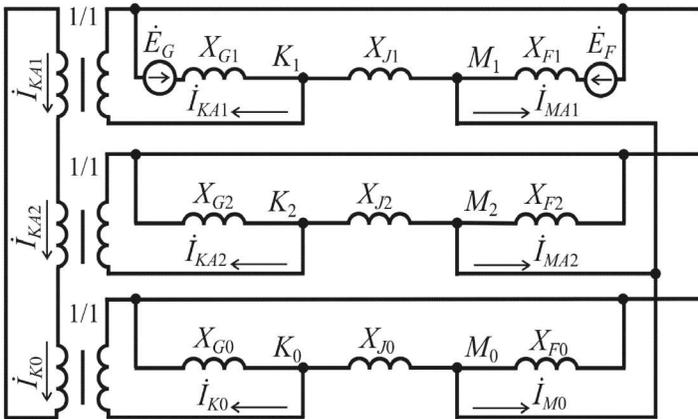


Рис. 10.2. Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании фазы A в точке K и двухфазном коротком замыкании на землю фаз B и C в точке M

При сложных несимметричных повреждениях комплексная схема замещения, как и при однократных повреждениях строится для одной фазы, условно называемой фазой A . Однако при сложном несимметричном повреждении не всегда возможно за исходную выбрать такую фазу, которая позволила бы применить обычные комплексные схемы замещения для однократного повреждения. Например, при двухфазном коротком замыкании на землю в точке M фаз B и C и однофазном коротком замыкании в точке K одной из фаз, оказавшейся поврежденной в точке M (допустим, фазы B) желательно бы для двухфазного короткого замыкания на землю за исходную принять неповрежденную фазу (фазу A), а для однофазного короткого замыкания – поврежденную фазу (фазу B). В этом случае для связи схем замещения разных последовательностей необходимы такие идеальные промежуточные трансформаторы, которые не только изолируют друг от друга эти схемы, но и поворачивают на угол $+2\pi/3$ или $-2\pi/3$ фазы токов и напряжений, т.е. трансформаторы, коэффициент трансформации которых выражается комплексным числом, модуль которого равен единице (такой коэффициент трансформации обычно называют *комплексным*). Использование таких идеальных промежуточных трансформаторов позволяет комплексную схему замещения при любом сложном несимметричном повреждении составлять для одной фазы (фазы A). При этом комплексные коэффициенты трансформации для промежуточных трансформаторов выбирают такими, чтобы в связывающей части, образуемой путем соответствующего соединения их вторичных обмоток, токи и напряжения соответство-

вали токам и напряжениям той фазы, для которой возможна комплексная схема замещения без поворота фаз токов и напряжений. В качестве примера на рис. 10.3 приведена комплексная схема замещения для упомянутого выше случая двойного несимметричного повреждения – двухфазного короткого замыкания на землю фаз *B* и *C* в точке *M* и однофазного короткого замыкания фазы *B* в точке *K*. Чтобы обеспечить условие равенства симметричных составляющих токов фазы *B* в месте однофазного короткого замыкания, характерного для такого повреждения, идеальные промежуточные трансформаторы должны иметь комплексные коэффициенты трансформации: $1/a^2$; $1/a$ и $1/1$ (единица перед дробной чертой относится к обмотке, обращенной к схеме замещения соответствующей последовательности).

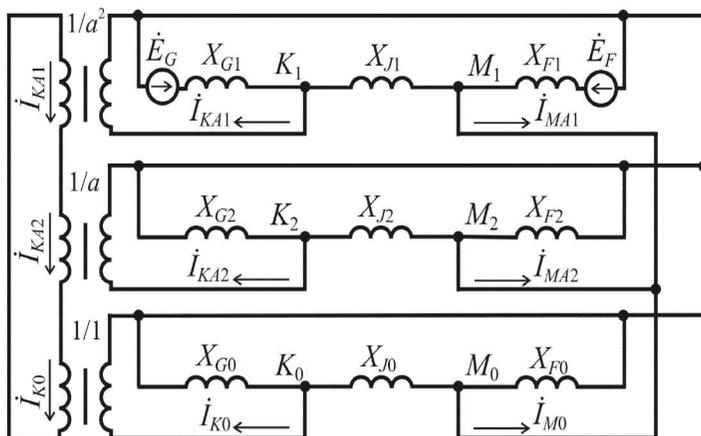


Рис. 10.3. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю фаз *B* и *C* в точке *M* и однофазном коротком замыкании фазы *B* в точке *K*

10.3. Двойное несимметричное повреждение, вызванное обрывом провода одной фазы воздушной линии электропередачи и однофазным коротким замыканием на землю той же фазы

Комплексная схема замещения для поврежденной фазы представлена на рис. 10.4. В нее с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентами трансформации $1/1$ введены две промежуточные цепи. Первая из них обеспечивает равенство токов прямой, обратной

и нулевой последовательности в месте однофазного короткого замыкания и равенство нулю суммы симметричных составляющих напряжения в месте этого короткого замыкания. Вторая обеспечивает равенство падений напряжений в месте обрыва и равенство нулю суммы симметричных составляющих токов в оборванной фазе.

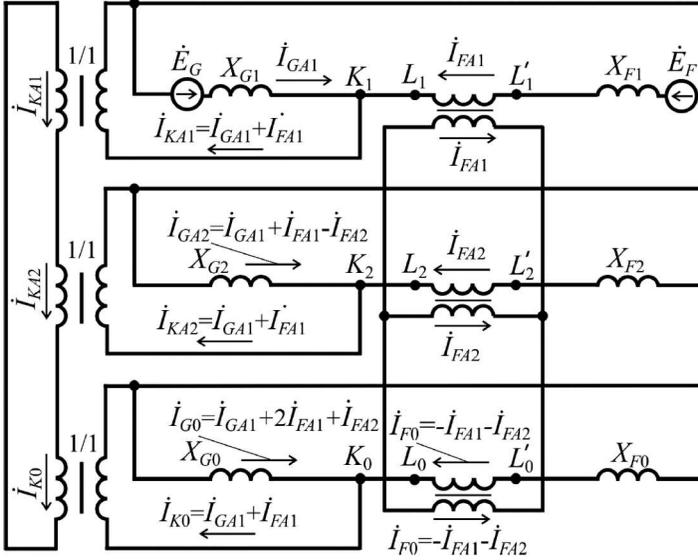


Рис. 10.4. Комплексная схема замещения при обрыве одной фазы с одновременным замыканием одного конца на землю

За положительное направление симметричных составляющих токов принято направление к месту короткого замыкания, а в качестве независимых токов приняты токи \dot{I}_{GA1} , \dot{I}_{FA1} и \dot{I}_{FA2} . При этом симметричные составляющие токов в месте короткого замыкания, остальные симметричные составляющие токов в обеих частях воздушной линии (то есть с обеих сторон от места повреждения), а также симметричные составляющие напряжения в месте короткого замыкания и падения напряжения в месте обрыва провода, выраженные через принятые независимые токи, определяются по формулам:

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0}; \quad (10.1)$$

$$\dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{FA2} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2}; \quad (10.2)$$

$$\dot{I}_{F0} = -\dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2}; \quad (10.3)$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{G0} &= \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{F0} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{F0} = \\ &= \dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2};\end{aligned}\quad (10.4)$$

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{GA} - jX_{G1} \dot{I}_{GA1}; \quad (10.5)$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - jX_{G2} \dot{I}_{GA2} = -jX_{G2} \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right); \quad (10.6)$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - jX_{G0} \dot{I}_{G0} = -jX_{G0} \left(\dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right); \quad (10.7)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{GA} - \dot{E}_{FA} - jX_{G1} \dot{I}_{GA1} + jX_{F1} \dot{I}_{FA1}; \quad (10.8)$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{LA2} &= -jX_{G2} \dot{I}_{GA2} + jX_{F2} \dot{I}_{FA2} = \\ &= -jX_{G2} \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right) + jX_{F2} \dot{I}_{FA2};\end{aligned}\quad (10.9)$$

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{L0} &= -jX_{G0} \dot{I}_{G0} + jX_{F0} \dot{I}_{F0} = \\ &= -jX_{G0} \left(\dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right) - jX_{F0} \left(\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right).\end{aligned}\quad (10.10)$$

Приведенные формулы позволяют составить три расчетных выражения для определения независимых токов $\dot{I}_{GA1}, \dot{I}_{FA1}, \dot{I}_{FA2}$. Одним из них является уравнение, получаемое путем сложения правых частей уравнений (10.5), (10.6) и (10.7) и приравнивания полученной суммы нулю (так как при однофазном коротком замыкании $\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0$):

$$\begin{aligned}\dot{E}_{GA} &= j(X_{G1} + X_{G2} + X_{G0}) \dot{I}_{GA1} + j(X_{G2} + 2X_{G0}) \dot{I}_{FA1} - \\ &- j(X_{G2} - X_{G0}) \dot{I}_{FA2} = jk_1 \dot{I}_{GA1} + jl_1 \dot{I}_{FA1} + jm_1 \dot{I}_{FA2},\end{aligned}\quad (10.11)$$

где k_1, l_1, m_1 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_1 = X_{G1} + X_{G2} + X_{G0}; \quad (10.12)$$

$$l_1 = X_{G2} + 2X_{G0}; \quad (10.13)$$

$$m_1 = -(X_{G2} - X_{G0}). \quad (10.14)$$

Двумя другими являются расчетные уравнения, получаемыми приравнением правых частей уравнений (10.8) и (10.9), а также (10.9) и (10.10) (так как при обрыве провода одной фазы $\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0}$). В результате преобразований имеем:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{GA} - \dot{E}_{FA} &= j(X_{G1} - X_{G2}) \dot{I}_{GA1} - j(X_{G2} + X_{F1}) \dot{I}_{FA1} + \\ &+ j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{FA2} = jk_2 \dot{I}_{GA1} + jl_2 \dot{I}_{FA1} + jm_2 \dot{I}_{FA2}, \end{aligned} \quad (10.15)$$

где k_2, l_2, m_2 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_2 = X_{G1} - X_{G2}; \quad (10.16)$$

$$l_2 = -(X_{G2} + X_{F1}); \quad (10.17)$$

$$m_2 = X_{G2} + X_{F2}; \quad (10.18)$$

$$\begin{aligned} 0 &= j(X_{G2} - X_{G0}) \dot{I}_{GA1} + j(X_{G2} - 2X_{G0} - X_{F0}) \dot{I}_{FA1} - \\ &- j(X_{G2} + X_{G0} + X_{F2} + X_{F0}) \dot{I}_{FA2} = \\ &= jk_3 \dot{I}_{GA1} + jl_3 \dot{I}_{FA1} + m_3 \dot{I}_{FA2}, \end{aligned} \quad (10.19)$$

где k_3, l_3, m_3 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_3 = X_{G2} - X_{G0}; \quad (10.20)$$

$$l_3 = X_{G2} - 2X_{G0} - X_{F0}; \quad (10.21)$$

$$m_3 = -(X_{G2} + X_{G0} + X_{F2} + X_{F0}). \quad (10.22)$$

Если принять, что $X_{G2} = X_{G1}$ и $X_{F2} = X_{F1}$, то расчетные коэффициенты $k_1, l_1, m_1, k_2, l_2, m_2, k_3, l_3, m_3$ заменяются коэффициентами $k'_1, l'_1, m'_1, k'_2, l'_2, m'_2, k'_3, l'_3, m'_3$, вычисляемыми по формулам:

$$k'_1 = 2X_{G1} + X_{G0}; \quad (10.23)$$

$$l'_1 = X_{G1} + 2X_{G0}; \quad (10.24)$$

$$m'_1 = -(X_{G1} - X_{G0}); \quad (10.25)$$

$$k'_2 = X_{G1} - X_{G1} = 0; \quad (10.26)$$

$$l'_2 = -(X_{G1} + X_{F1}); \quad (10.27)$$

$$m'_2 = X_{G1} + X_{F1} = -l'_2; \quad (10.28)$$

$$k'_3 = X_{G1} - X_{G0} = -m'_1; \quad (10.29)$$

$$l'_3 = X_{G1} - 2X_{G0} - X_{F0}; \quad (10.30)$$

$$m'_3 = -(X_{G1} + X_{G0} + X_{F1} + X_{F0}). \quad (10.31)$$

При этом значения токов, принятых в качестве независимых, определяются по формулам:

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{\begin{vmatrix} E_{GA} & l'_1 & m'_1 \\ E_{GA} - E_{FA} & l'_2 & m'_2 \\ 0 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ k'_2 & l'_2 & m'_2 \\ k'_3 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} E_{GA} & l'_1 & m'_1 \\ E_{GA} - E_{FA} & l'_2 & -l'_2 \\ 0 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ 0 & l'_2 & -l'_2 \\ -m'_1 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.32)$$

или

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{E_{GA}l'_2(l'_3 + m'_3) + (E_{GA} - E_{FA})(l'_3m'_1 - l'_1m'_3)}{l'_2[k'_1(l'_3 + m'_3) + m'_1(l'_1 + m'_1)]}; \quad (10.33)$$

$$\dot{I}_{FA1} = \frac{\begin{vmatrix} k'_1 & E_{GA} & m'_1 \\ 0 & E_{GA} - E_{FA} & -l'_2 \\ -m'_1 & 0 & m'_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ 0 & l'_2 & -l'_2 \\ -m'_1 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.34)$$

или

$$\dot{I}_{FA1} = \frac{E_{GA}l'_2m'_1 + (E_{GA} - E_{FA})(k'_1m'_3 + m_1'^2)}{l'_2[k'_1(l'_3 + m'_3) + m'_1(l'_1 + m'_1)]}; \quad (10.35)$$

$$\dot{I}_{FA2} = \frac{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & E_{GA} \\ 0 & l'_2 & E_{GA} - E_{FA} \\ -m'_1 & l'_3 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ 0 & l'_2 & -l'_2 \\ -m'_1 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.36)$$

или

$$\dot{I}_{FA2} = \frac{E_{GA} l'_2 m'_1 - (E_{GA} - E_{FA})(l'_1 m'_1 + k'_1 l'_3)}{l'_2 [k'_1 (l'_3 + m'_3) + m'_1 (l'_1 + m'_1)]}. \quad (10.37)$$

Если принять $E_{GA} = E_{FA}$, то формулы (10.33), (10.35) и (10.37) еще больше упрощаются:

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{E_{GA} (l'_3 + m'_3)}{k'_1 (l'_3 + m'_3) + m'_1 (l'_1 + m'_1)}; \quad (10.38)$$

$$\dot{I}_{FA1} = \dot{I}_{FA2} = \frac{E_{GA} m'_1}{k'_1 (l'_3 + m'_3) + m'_1 (l'_1 + m'_1)}. \quad (10.39)$$

Остальные токи определяются так: ток обратной последовательности \dot{I}_{GA2} – по формуле (10.2), токи нулевой последовательности \dot{I}_{G0} и \dot{I}_{F0} – соответственно по формулам (10.4) и (10.3), симметричные составляющие тока в месте короткого замыкания – по формуле (10.1), а симметричные составляющие напряжения в месте короткого замыкания – по формулам (10.5), (10.6) и (10.7).

10.4. Двойное несимметричное повреждение, вызванное обрывом провода одной фазы воздушной линии электропередачи и однофазным коротким замыканием на землю другой фазы

При данном несимметричном повреждении за особую фазу принята оборванная фаза A , а замкнутой на землю – фаза B . Комплексная схема замещения, соответствующая рассматриваемому двойному несимметричному повреждению, имеет вид, представлен-

ный на рис. 10.5. Для связи схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей по месту обрыва провода применены идеальные трансформаторы с коэффициентом трансформации $1/1$, а их вторичные обмотки соединены параллельно. Для связи схем замещения разных последовательностей по месту короткого замыкания применены идеальные трансформаторы с коэффициентами трансформации $1/a^2$, $1/a$ и $1/1$, а их вторичные обмотки соединены последовательно.

В качестве независимых токов приняты токи \dot{I}_{GA1} , \dot{I}_{FA1} и \dot{I}_{FA2} . Тогда

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1}. \quad (10.40)$$

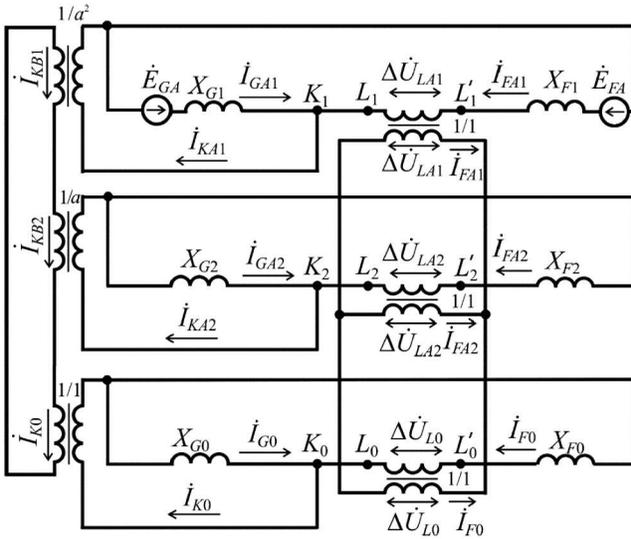


Рис. 10.5. Комплексная схема замещения при обрыве провода одной фазы и замыкании на землю другой фазы

При замыкании на землю фазы B справедливо условие:

$$\dot{I}_{KB1} = \dot{I}_{KB2} = \dot{I}_{K0}, \text{ т.е. } a^2 \dot{I}_{KA1} = a \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0}, \text{ откуда следует, что}$$

$$\dot{I}_{KA2} = a \dot{I}_{KA1} = a \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} \right); \quad (10.41)$$

$$\dot{I}_{K0} = a^2 \dot{I}_{KA1} = a^2 \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} \right). \quad (10.42)$$

Остальные симметричные составляющие токов определяются следующим образом. Поскольку при обрыве провода фазы A $\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} + \dot{I}_{F0} = 0$, то

$$\dot{I}_{F0} = -\dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2}. \quad (10.43)$$

Токи \dot{I}_{GA2} и \dot{I}_{G0} равны соответственно

$$\dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{FA2} = a \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} \right) - \dot{I}_{FA2}; \quad (10.44)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{G0} &= \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{F0} = a^2 \left(\dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} \right) + \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} = \\ &= a^2 \dot{I}_{GA1} - a \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2}. \end{aligned} \quad (10.45)$$

Симметричные составляющие напряжения замкнутой на землю фазы в точке короткого замыкания, выраженные через независимые токи:

$$\dot{U}_{KB1} = a^2 \dot{U}_{KA1} = a^2 \dot{E}_{GA} - ja^2 X_{G1} \dot{I}_{GA1}; \quad (10.46)$$

$$\dot{U}_{KB2} = a \dot{U}_{KA2} = -ja X_{G2} \dot{I}_{GA2} = \quad (10.47)$$

$$= -ja^2 X_{G2} \dot{I}_{GA1} - ja^2 X_{G2} \dot{I}_{FA1} + ja X_{G2} \dot{I}_{FA2};$$

$$\dot{U}_{K0} = -j X_{G0} \dot{I}_{G0} = -ja^2 X_{G0} \dot{I}_{GA1} + \quad (10.48)$$

$$+ ja X_{G0} \dot{I}_{FA1} - j X_{G0} \dot{I}_{FA2}.$$

Симметричные составляющие падения напряжения в фазе A в месте обрыва провода этой фазы, выраженные через независимые токи

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{GA} - \dot{E}_{FA} - j X_{G1} \dot{I}_{GA1} + j X_{F1} \dot{I}_{FA1}; \quad (10.49)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -jX_{G2} \dot{I}_{GA2} + jX_{F2} \dot{I}_{FA2} = -jaX_{G2} \dot{I}_{GA1} - \quad (10.50)$$

$$-jaX_{G2} \dot{I}_{FA1} + j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{FA2};$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{L0} &= -jX_{G0} \dot{I}_{G0} + jX_{F0} \dot{I}_{F0} = \\ &= -jX_{G0} \left(a^2 \dot{I}_{GA1} - a \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right) - jX_{F0} \dot{I}_{FA1} - \end{aligned} \quad (10.51)$$

$$-jX_{F0} \dot{I}_{FA2} = -ja^2 X_{G0} \dot{I}_{GA1} + j(aX_{G0} - X_{F0}) \dot{I}_{FA1} -$$

$$-j(X_{G0} + X_{F0}) \dot{I}_{FA2}.$$

Сумма правых частей уравнений (10.46), (10.47) и (10.48) равна нулю. Если все члены этой суммы умножить на комплекс a , то после преобразования полученного выражения найдем:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{GA} &= j(X_{G1} + X_{G2} + X_{G0}) \dot{I}_{GA1} + \\ &+ j(X_{G2} - a^2 X_{G0}) \dot{I}_{FA1} - j(a^2 X_{G2} - aX_{G0}) \dot{I}_{FA2} = \end{aligned} \quad (10.52)$$

$$= jk_1 \dot{I}_{GA1} + jl_1 \dot{I}_{FA1} + jm_1 \dot{I}_{FA2},$$

где k_1, l_1, m_1 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_1 = X_{G1} + X_{G2} + X_{G0}; \quad (10.53)$$

$$l_1 = X_{G2} - a^2 X_{G0}; \quad (10.54)$$

$$m_1 = -a(aX_{G2} - X_{G0}). \quad (10.55)$$

Симметричные составляющие падения напряжения в месте обрыва провода равны между собой. Поэтому для получения двух дополнительных уравнений следует приравнять правые части уравнений (10.49) и (10.50), а также (10.50) и (10.51). В результате преобразований получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{GA} - \dot{E}_{FA} &= j(X_{G1} - aX_{G2}) \dot{I}_{GA1} - \\ &- j(aX_{G2} + X_{F1}) \dot{I}_{FA1} + j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{FA2} = \end{aligned} \quad (10.56)$$

$$= jk_2 \dot{I}_{GA1} + jl_2 \dot{I}_{FA1} + jm_2 \dot{I}_{FA2},$$

где k_2, l_2, m_2 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_2 = X_{G1} - aX_{G2}; \quad (10.57)$$

$$l_2 = -(aX_{G2} + X_{F1}); \quad (10.58)$$

$$m_2 = X_{G2} + X_{F2}; \quad (10.59)$$

$$\begin{aligned} 0 &= ja(X_{G2} - aX_{G0})\dot{I}_{GA1} + \\ &+ j[a(X_{G2} + X_{G0}) - X_{F0}]\dot{I}_{FA1} - \\ &- j(X_{G2} + X_{G0} + X_{F2} + X_{F0})\dot{I}_{FA2} = \\ &= jk_3\dot{I}_{GA1} + jl_3\dot{I}_{FA1} + jm_3\dot{I}_{FA2}, \end{aligned} \quad (10.60)$$

где k_3, l_3, m_3 – расчетные коэффициенты, вычисляемые по формулам:

$$k_3 = a(X_{G2} - aX_{G0}); \quad (10.61)$$

$$l_3 = a(X_{G2} + X_{G0}) - X_{F0}; \quad (10.62)$$

$$m_3 = -(X_{G2} + X_{G0} + X_{F2} + X_{F0}). \quad (10.63)$$

Приняв равенства $X_{G2} = X_{G1}$ и $X_{F2} = X_{F1}$, получим расчетные коэффициенты $k'_1, l'_1, m'_1, k'_2, l'_2, m'_2, k'_3, l'_3, m'_3$, вычисляемые по формулам:

$$k'_1 = 2X_{G1} + X_{G0}; \quad (10.64)$$

$$l'_1 = X_{G1} - a^2X_{G0}; \quad (10.65)$$

$$m'_1 = -a(aX_{G1} - X_{G0}); \quad (10.66)$$

$$k'_2 = (1 - a)X_{G1}; \quad (10.67)$$

$$l'_2 = -(aX_{G1} + X_{F1}); \quad (10.68)$$

$$m'_2 = X_{G1} + X_{F1}; \quad (10.69)$$

$$k'_3 = a(X_{G1} - aX_{G0}); \quad (10.70)$$

$$l'_3 = a(X_{G1} + X_{G0}) - X_{F0}; \quad (10.71)$$

$$m'_3 = -(X_{G1} + X_{G0} + X_{F1} + X_{F0}). \quad (10.72)$$

При этом формулы для определения токов, принятых в качестве основных, имеют вид:

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{\begin{vmatrix} E_{GA} & l'_1 & m'_1 \\ E_{GA} - E_{FA} & l'_2 & m'_2 \\ 0 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ k'_2 & l'_2 & m'_2 \\ k'_3 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.73)$$

или

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{E_{GA}(l'_2 m'_3 - l'_3 m'_2) + (E_{GA} - E_{FA})(l'_3 m'_1 - l'_1 m'_3)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}; \quad (10.74)$$

$$\dot{I}_{FA1} = \frac{\begin{vmatrix} k'_1 & E_{GA} & m'_1 \\ k'_2 & E_{GA} - E_{FA} & m'_2 \\ k'_3 & 0 & m'_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ k'_2 & l'_2 & m'_2 \\ k'_3 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.75)$$

или

$$\dot{I}_{FA1} = \frac{E_{GA}(k'_3 m'_2 - k'_2 m'_3) + (E_{GA} - E_{FA})(k'_1 m'_3 - k'_3 m'_1)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}; \quad (10.76)$$

$$\dot{I}_{FA2} = \frac{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & E_{GA} \\ k'_2 & l'_2 & E_{GA} - E_{FA} \\ k'_3 & l'_3 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k'_1 & l'_1 & m'_1 \\ k'_2 & l'_2 & m'_2 \\ k'_3 & l'_3 & m'_3 \end{vmatrix}} \quad (10.77)$$

или

$$\dot{I}_{FA2} = \frac{E_{GA}(k'_2 l'_3 - k'_3 l'_2) + (E_{GA} - E_{FA})(k'_3 l'_2 - k'_1 l'_3)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}. \quad (10.78)$$

Формулы (10.74), (10.76) и (10.78) существенно упрощаются, если принять $E_{GA} = E_{FA}$:

$$\dot{I}_{GA1} = \frac{E_{GA} (l'_2 m'_3 - l'_3 m'_2)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}; \quad (10.79)$$

$$\dot{I}_{FA1} = \frac{E_{GA} (k'_3 m'_2 - k'_2 m'_3)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}; \quad (10.80)$$

$$\dot{I}_{FA2} = \frac{E_{GA} (k'_2 l'_3 - k'_3 l'_2)}{k'_1 l'_2 m'_3 + k'_2 l'_3 m'_1 + k'_3 l'_1 m'_2 - k'_1 l'_3 m'_2 - k'_2 l'_1 m'_3 - k'_3 l'_2 m'_1}. \quad (10.81)$$

Определив токи, принятые за независимые, по формулам (10.40), (10.41) и (10.42) находятся симметричные составляющие токов в месте короткого замыкания, по формулам (10.43), (10.44) и (10.45) – остальные симметричные составляющие токов в различных частях поврежденной линии, по формулам (10.46), (10.47) и (10.48) – симметричные составляющие напряжения в месте короткого замыкания, а по формуле (10.49) – симметричные составляющие падений напряжения на оборванном проводе, имея в виду, что

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0}.$$

10.5. Расчет двойных коротких замыканий на землю

При расчете двойных коротких замыканий на землю разноименных фаз трехфазной электрической сети, возникающих в разных, но электрически связанных между собой точках этой сети, например, точках K и M (см. рис. 10.6) как обычно полагают, что особой фазой является фаза A , а поврежденными являются фаза B (в точке K) и фаза C (в точке M).

Метод расчета рассматриваемых двойных несимметричных повреждений зависит от способа заземления нейтралей трансформаторов и другого электрооборудования, имеющего нейтрали. В этом отношении все электрические сети напряжением свыше 1 кВ делят на две группы. К первой группе относят электрические сети с заземленной (глухозаземленной) и эффективно заземленной нейтралью, т.е. сети, нейтрали электрооборудования которых соединены с заземляющими устройствами непосредственно или так, что коэффициент

замыкания на землю, равный отношению напряжений неповрежденных фаз относительно земли при однофазном коротком замыкании к номинальному фазному напряжению сети, не превышает нормированного значения (обычно он принимается равным 1,4). Ко второй группе относят электрические сети с изолированной или компенсированной нейтралью, то есть сети, нейтрали электрооборудования которых не присоединены к заземляющему устройству или заземлены через дугогасящие реакторы.

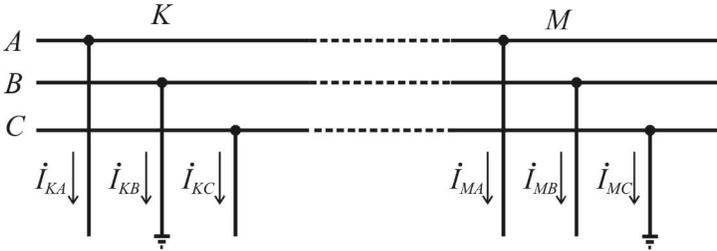


Рис. 10.6. Исходная расчетная схема

Случай, когда нейтрали трансформаторов глухо заземлены и обеспечена возможность циркуляции по ним токов нулевой последовательности

Исходные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей такой электрической сети без учета активных сопротивлений различных ее элементов приведены на рис. 10.7. Обычно эти схемы приводят к схемам звезды, как показано на рис. 10.8.

При этом ЭДС \dot{E}_{KA} и \dot{E}_{MA} определяют по формулам:

$$\dot{E}_{KA} = \frac{\dot{E}_{GA}(X_{F1} + X_{J1}) + \dot{E}_{FA}X_{G1}}{X_{G1} + X_{J1} + X_{F1}}; \quad (10.82)$$

$$\dot{E}_{MA} = \frac{\dot{E}_{FA}(X_{G1} + X_{J1}) + \dot{E}_{GA}X_{F1}}{X_{G1} + X_{J1} + X_{F1}}, \quad (10.83)$$

а сопротивления X_{K1} , X_{M1} , X_{H1} и другие – с использованием обычного метода преобразования треугольника сопротивлений в звезду.

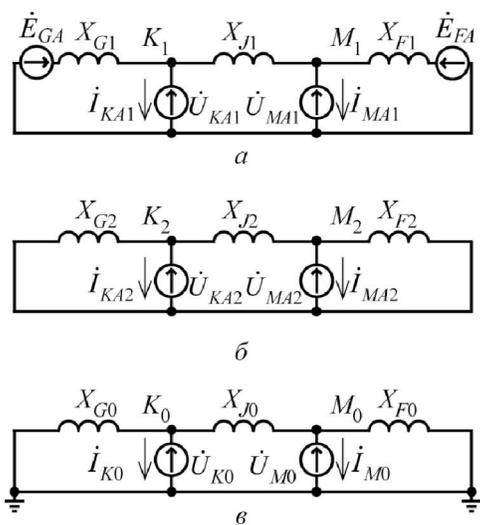


Рис. 10.7. Исходные схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей электрической сети первой группы

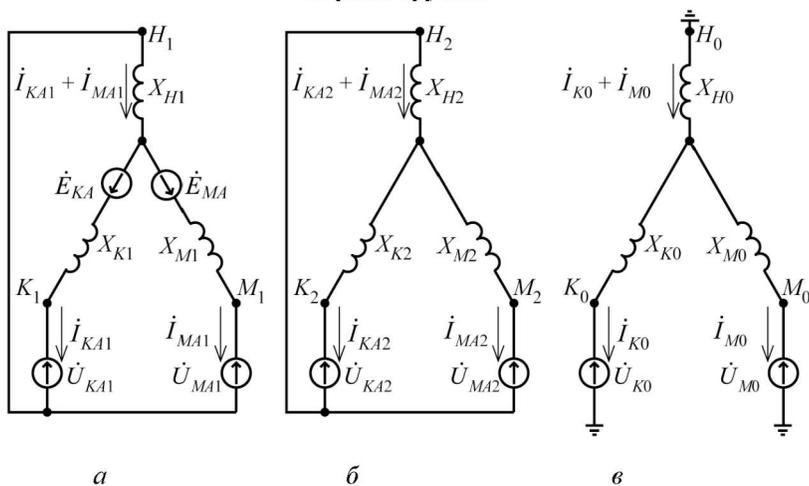


Рис. 10.8. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей, преобразованные в трехлучевую звезду

Если ЭДС \dot{E}_{GA} и \dot{E}_{FA} совпадают по фазе и равны по модулю, то $\dot{E}_{KA} = \dot{E}_{MA}$, поэтому в этом случае в схему рис. 10.8,а целесооб-

разно вводить только одну ЭДС $\dot{E}_{HA} = \dot{E}_{GA}$, включая ее в ветвь с сопротивлением X_{H1} .

При замыканиях на землю фаз B и C граничные условия, как видно из рис. 10.6, таковы:

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (10.84)$$

$$\dot{I}_{KC} = 0; \quad (10.85)$$

$$\dot{U}_{KB} = 0; \quad (10.86)$$

$$\dot{I}_{MA} = 0; \quad (10.87)$$

$$\dot{I}_{MB} = 0; \quad (10.88)$$

$$\dot{U}_{MC} = 0. \quad (10.89)$$

Граничным условиям (10.84) и (10.85) соответствует следующее соотношение между симметричными составляющими тока поврежденной фазы B в точке K :

$$\dot{I}_{KB1} = \dot{I}_{KB2} = \dot{I}_{K0} = \frac{\dot{I}_{KB}}{3}, \quad (10.90)$$

а граничным условиям (10.87) и (10.88) – аналогичное соотношение между симметричными составляющими тока поврежденной фазы C в точке M :

$$\dot{I}_{MC1} = \dot{I}_{MC2} = \dot{I}_{M0} = \frac{\dot{I}_{MC}}{3}. \quad (10.91)$$

Граничные условия (10.86) и (10.89) можно представить так:

$$\dot{U}_{KB1} + \dot{U}_{KB2} + \dot{U}_{K0} = 0; \quad (10.92)$$

$$\dot{U}_{MC1} + \dot{U}_{MC2} + \dot{U}_{M0} = 0. \quad (10.93)$$

Формулы (10.90) – (10.93) целесообразно представить через симметричные составляющие токов и напряжений фазы A :

$$a^2 \dot{I}_{KA1} = a \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0} = \frac{\dot{I}_{KB}}{3}; \quad (10.94)$$

$$a\dot{I}_{MA1} = a^2 \dot{I}_{MA2} = \dot{I}_{M0} = \frac{\dot{I}_{MC}}{3}; \quad (10.95)$$

$$a^2 \dot{U}_{KA1} + a\dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0; \quad (10.96)$$

$$a\dot{U}_{MA1} + a^2 \dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{M0} = 0. \quad (10.97)$$

Дополнительные уравнения, устанавливающие связь между токами и напряжениями одноименной последовательности, легко получить из схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, представленных на рис. 10.8:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{KA} - j(X_{H1} + X_{K1})\dot{I}_{KA1} - jX_{H1}\dot{I}_{MA1}; \quad (10.98)$$

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - jX_{H1}\dot{I}_{KA1} - j(X_{H1} + X_{M1})\dot{I}_{MA1}; \quad (10.99)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -j(X_{H2} + X_{K2})\dot{I}_{KA2} - jX_{H2}\dot{I}_{MA2}; \quad (10.100)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -jX_{H2}\dot{I}_{KA2} - j(X_{H2} + X_{M2})\dot{I}_{MA2}; \quad (10.101)$$

$$\dot{U}_{K0} = -j(X_{H0} + X_{K0})\dot{I}_{K0} - jX_{H0}\dot{I}_{M0}; \quad (10.102)$$

$$\dot{U}_{M0} = -jX_{H0}\dot{I}_{K0} - j(X_{H0} + X_{M0})\dot{I}_{M0}. \quad (10.103)$$

Подставив (10.98), (10.100), (10.102) в (10.96) и (10.99), (10.101), (10.103) в (10.97), получим два уравнения:

$$\begin{aligned} a^2 \dot{E}_{KA} &= j(X_{H1} + X_{K1})a^2 \dot{I}_{KA1} + jX_{H1}a^2 \dot{I}_{MA1} + \\ &+ j(X_{H2} + X_{K2})a \dot{I}_{KA2} + jX_{H2}a \dot{I}_{MA2} + \\ &+ j(X_{H0} + X_{K0})\dot{I}_{K0} + jX_{H0}\dot{I}_{M0}; \end{aligned} \quad (10.104)$$

$$\begin{aligned} a\dot{E}_{MA} &= jX_{H1}a \dot{I}_{KA1} + j(X_{H1} + X_{M1})a \dot{I}_{MA1} + \\ &+ jX_{H2}a^2 \dot{I}_{KA2} + j(X_{H2} + X_{M2})a^2 \dot{I}_{MA2} + \\ &+ jX_{H0}\dot{I}_{K0} + j(X_{H0} + X_{M0})\dot{I}_{M0}. \end{aligned} \quad (10.105)$$

Учитывая (10.94) и (10.95), исключим из уравнений (10.104) и (10.105) токи \dot{I}_{KA2} , \dot{I}_{K0} и \dot{I}_{MA2} , \dot{I}_{M0} , выразив их соответственно через \dot{I}_{KA1} и \dot{I}_{MA1} :

$$a^2 \dot{E}_{KA} = j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0})a^2 \dot{I}_{KA1} + \\ + j(a^2 X_{H1} + X_{H2} + aX_{H0})\dot{I}_{MA1}; \quad (10.106)$$

$$a \dot{E}_{MA} = j(aX_{H1} + X_{H2} + a^2 X_{H0})\dot{I}_{KA1} + \\ + j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0})a \dot{I}_{MA1}. \quad (10.107)$$

Если умножить все члены уравнения (10.106) на комплекс a^2 , а уравнения (10.107) на комплекс a , получим:

$$a \dot{E}_{KA} = j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0})a \dot{I}_{KA1} + \\ + j(aX_{H1} + a^2 X_{H2} + X_{H0})\dot{I}_{MA1} = \underline{k}_1 a \dot{I}_{KA1} + \underline{m}_1 \dot{I}_{MA1}; \quad (10.108)$$

$$a^2 \dot{E}_{MA} = j(a^2 X_{H1} + aX_{H2} + X_{H0})\dot{I}_{KA1} + \\ + j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0})a^2 \dot{I}_{MA1} = \\ = \underline{k}_2 \dot{I}_{KA1} + \underline{m}_2 a^2 \dot{I}_{MA1}. \quad (10.109)$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

$$\underline{k}_1 = j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0});$$

$$\underline{m}_1 = j(aX_{H1} + a^2 X_{H2} + X_{H0});$$

$$\underline{k}_2 = j(a^2 X_{H1} + aX_{H2} + X_{H0});$$

$$\underline{m}_2 = j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0}).$$

Из уравнений (10.108) и (10.109) следует:

$$I_{KA1} = \frac{\begin{vmatrix} aE_{KA} & \underline{m}_1 \\ a^2 E_{MA} & \underline{m}_2 a^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \underline{k}_1 a & \underline{m}_1 \\ \underline{k}_2 & \underline{m}_2 a^2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{KA} \underline{m}_2 - a^2 E_{MA} \underline{m}_1}{\underline{k}_1 \underline{m}_2 - \underline{k}_2 \underline{m}_1}; \quad (10.110)$$

$$I_{MA1} = \frac{\begin{vmatrix} \underline{k}_1 a & aE_{KA} \\ \underline{k}_2 & a^2 E_{MA} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \underline{k}_1 a & \underline{m}_1 \\ \underline{k}_2 & \underline{m}_2 a^2 \end{vmatrix}} = \frac{E_{MA} \underline{k}_1 - a E_{KA} \underline{k}_2}{\underline{k}_1 \underline{m}_2 - \underline{k}_2 \underline{m}_1}. \quad (10.111)$$

Определив по этим выражениям токи прямой последовательности \dot{I}_{KA1} и \dot{I}_{MA1} и учитывая соотношения (10.94) и (10.95), легко найти искомые полные токи поврежденных фаз в местах замыканий на землю. Симметричные составляющие напряжений особой фазы в местах повреждений определяются по формулам (10.98) – (10.103).

Обычно эквивалентные сопротивления схем замещения обратной и прямой последовательностей одинаковы или отличаются друг от друга на доли процента, поэтому в формулах для определения \underline{m}_1 и \underline{k}_2 можно принять, что $X_{H1} = X_{H2}$.

При этом $\underline{k}_2 = \underline{m}_1 = j(X_{H0} - X_{H1})$. Если еще учесть, что по абсолютной величине \underline{k}_1 и \underline{m}_2 значительно больше соответственно \underline{m}_1 и \underline{k}_2 , то коэффициентами \underline{m}_1 и \underline{k}_2 в формулах (10.110) и (10.111) можно пренебречь (т.е. принять их равными нулю). Это приводит к существенному упрощению указанных формул:

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{KA}}{\underline{k}_1} = \frac{\dot{E}_{KA}}{j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0})}; \quad (10.112)$$

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{\dot{E}_{MA}}{\underline{m}_2} = \frac{\dot{E}_{MA}}{j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0})}. \quad (10.113)$$

Как видно из (10.112) и (10.113), если ЭДС \dot{E}_{KA} и \dot{E}_{MA} совпадают по фазе, то токи прямой последовательности особой фазы \dot{I}_{KA1} и \dot{I}_{MA1} также совпадают по фазе. Зная эти токи, нетрудно, используя формулы (10.94) и (10.95), построить векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю. Такие диаграммы представлены на рис. 10.9. Они показывают, что в местах повреждений токи обратной последовательности особой фазы и токи нулевой последовательности сдвинуты по фазе на угол $2\pi/3$. Также на угол $2\pi/3$ сдвинуты по фазе полные токи поврежденных фаз.

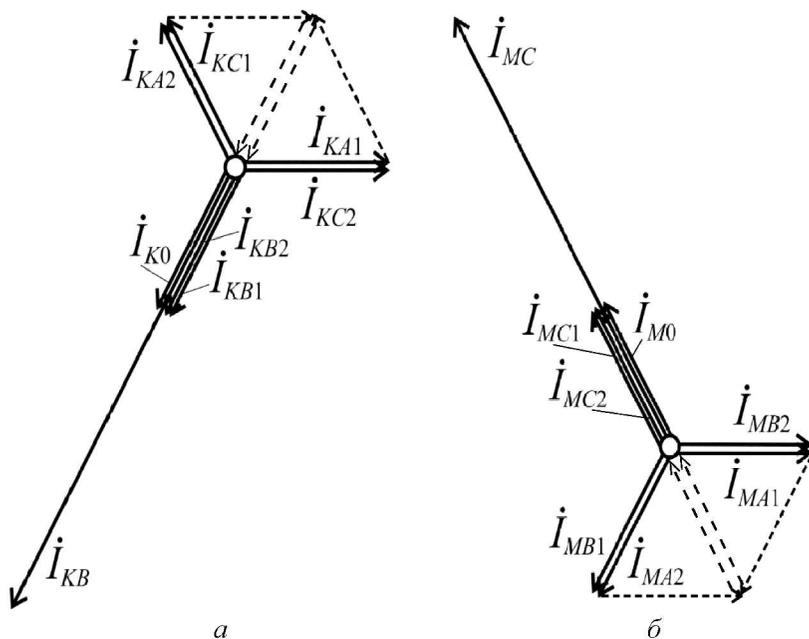


Рис. 10.9. Векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю фазы B (а) и фазы C (б) в сети с глухозаземленными нейтральными трансформаторов

Случай, когда нейтрали всех трансформаторов не заземлены

При этом схема замещения нулевой последовательности (см. рис. 10.7в) превращается в двухполосник, сопротивление которого составляет X_{J0} , т.е. численно равно сопротивлению нулевой последовательности части электрической цепи, заключенной между точками замыканий на землю K и M .

Очевидно, при отсутствии заземленных нейтралей остаются справедливыми соотношения (10.94) и (10.95), а также уравнения (10.98) – (10.101). А уравнения (10.102) и (10.103) оказываются непригодными. Поэтому вместо них необходимо составить два других уравнения, учитывающих особенности режима при отсутствии у трансформаторов заземленных нейтралей. Одним из них является соотношение, устанавливающее связь между напряжениями нулевой последовательности в точках K и M :

$$\dot{U}_{K0} - \dot{U}_{M0} = -jX_{J0} \dot{I}_{K0}. \quad (10.114)$$

В этом выражении за положительное направление тока \dot{I}_{K0} принято направление от точки M к точке K .

Дополнительное уравнение целесообразно составить исходя из условия, что при отсутствии в сети, где происходит двойное короткое замыкание на землю, заземленных нейтралей трансформаторов справедливо соотношение:

$$\dot{I}_{KB} + \dot{I}_{MC} = 0$$

или

$$\dot{I}_{KB} = -\dot{I}_{MC}.$$

При этом, как видно из тождеств (10.94) и (10.95),

$$\dot{I}_{K0} = -\dot{I}_{M0}. \quad (10.115)$$

Очевидно, и остальные члены тождества (10.95) отличаются от членов тождества (10.94) только знаком, что позволяет все симметричные составляющие тока в точке замыкания K (т.е. \dot{I}_{KA2} и \dot{I}_{K0}), а также и тока в точке замыкания M выразить через ток \dot{I}_{KA1} :

$$\dot{I}_{KA2} = a \dot{I}_{KA1}; \quad (10.116)$$

$$\dot{I}_{K0} = a^2 \dot{I}_{KA1}; \quad (10.117)$$

$$\dot{I}_{MA1} = -a \dot{I}_{KA1}; \quad (10.118)$$

$$\dot{I}_{MA2} = -\dot{I}_{KA1}; \quad (10.119)$$

$$\dot{I}_{M0} = -a^2 \dot{I}_{KA1}. \quad (10.120)$$

Это дает возможность выражения (10.98) – (10.101) представить в виде функций тока \dot{I}_{KA1} :

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{KA} - j(X_{H1} + X_{K1})\dot{I}_{KA1} + jX_{H1}a\dot{I}_{KA1}; \quad (10.121)$$

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - jX_{H1}\dot{I}_{KA1} + j(X_{H1} + X_{M1})a\dot{I}_{KA1}; \quad (10.122)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -j(X_{H2} + X_{K2})a\dot{I}_{KA1} + jX_{H2}\dot{I}_{KA1}; \quad (10.123)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -jX_{H2}a\dot{I}_{KA1} + j(X_{H2} + X_{M2})\dot{I}_{KA1}. \quad (10.124)$$

Теперь найдем разность левых частей уравнений (10.96) и (10.97) и в полученное соотношение вместо \dot{U}_{KA1} , \dot{U}_{MA1} , \dot{U}_{KA2} и \dot{U}_{MA2} подставим выражения (10.121) – (10.124), а разность $\dot{U}_{K0} - \dot{U}_{M0}$ представим как функцию \dot{I}_{KA1} , используя с этой целью выражения (10.114) и (10.117):

$$\begin{aligned} & a^2 \dot{E}_{KA} - a \dot{E}_{MA} - \\ & - j(2X_{H1} + 2X_{H2} + X_{K1} + X_{M1} + X_{K2} + X_{M2})a^2 \dot{I}_{KA1} + \\ & + jX_{H1}(1+a)\dot{I}_{KA1} + jX_{H2}(1+a)\dot{I}_{KA1} - jX_{J0}a^2 \dot{I}_{KA1} = 0. \end{aligned}$$

Если теперь умножить все члены этого уравнения на комплекс a и учесть, что $a + a^2 = -1$, то получим

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{KA} - a^2 \dot{E}_{MA}}{j(3X_{F1} + 3X_{F2} + X_{K1} + X_{M1} + X_{K2} + X_{M2} + X_{j0})}. \quad (10.125)$$

Остальные симметричные составляющие токов в местах замыканий на землю определяются по формулам (10.116) – (10.120). На рис. 10.10 приведены векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю. Как видно, токи поврежденных фаз в местах замыканий на землю сдвинуты по фазе на угол π и составляют

$$\dot{I}_{KB} = -\dot{I}_{MC} = 3a^2 \dot{I}_{KA1}.$$

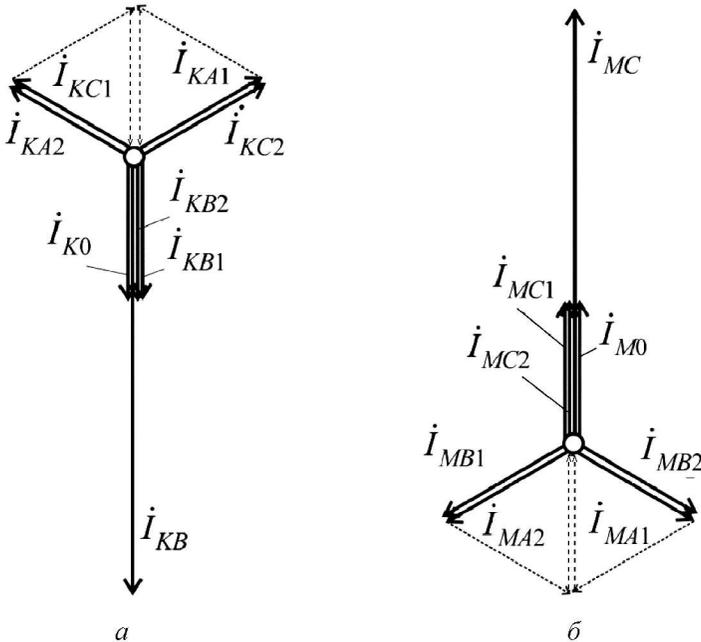


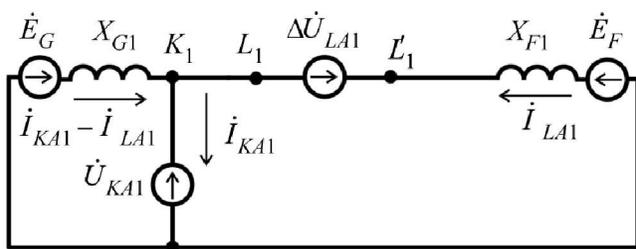
Рис. 10.10. Векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю фазы B (а) и фазы C (б) в сети с незаземленными нейтральными трансформаторов

Искомые напряжения прямой и обратной последовательностей неповрежденной фазы A в точках K и M определяются по формулам (10.121) – (10.124), а напряжения нулевой последовательности – из формул (10.96) и (10.97).

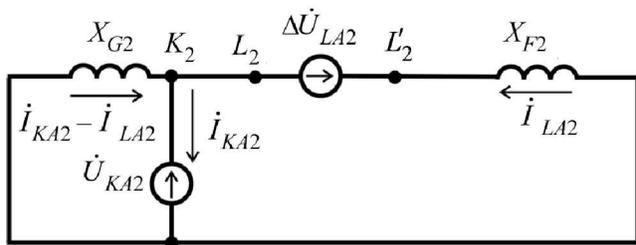
10.6. Расчет несимметрии при обрыве проводника одной фазы и одновременном однофазном коротком замыкании с использованием производной схемы прямой последовательности

Для расчета сложной несимметрии такого вида как обрыв проводника одной фазы линии электропередачи, при котором один его конец соединяется с землей, а второй конец оказывается изолированным, обычно применяют метод, основанный на замене в основной схеме замещения прямой последовательности обоих повреждений (т.е. \dot{U}_{KA1} и $\Delta\dot{U}_{LA1}$) так называемой *производной* или *эквивалентной* схемой прямой последовательности. Причем параметры этой схемы определяются только параметрами схем замещения обратной и нулевой последовательностей. Этот метод позволяет расчет токов и напряжений в схеме замещения прямой последовательности свести к расчету эквивалентного трехфазного короткого замыкания. Чтобы составить производную схему, необходимо кроме *собственных* уравнений прямой последовательности, которые связывают напряжения и токи прямой последовательности в местах короткого замыкания и обрыва через параметры схемы замещения прямой последовательности, составить также так называемые *особые* или *несобственные* уравнения прямой последовательности, которые связывают напряжения и токи прямой последовательности в местах несимметрии через параметры схем замещения обратной и нулевой последовательностей. Сущность этого метода изложена ниже.

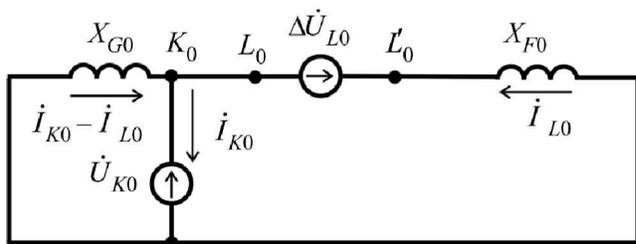
На рис. 10.11 показаны основная схема замещения прямой последовательности (*а*), а также схемы замещения обратной (*б*) и нулевой (*в*) последовательностей применительно к рассматриваемой несимметрии. За положительное направление токов принято, как обычно, направление к месту короткого замыкания, за положительное направление ЭДС – от нейтралей источников энергии в сеть, а за положительное направление падения напряжения (точнее разности напряжений) в месте обрыва – направление, противоположное положительному направлению тока в ветви, где произошел обрыв.



a



б



в

Рис. 10.11. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при обрыве фазы и однофазном коротком замыкании

Исходя из приведенных на рис. 10.11 схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и выбранных положительных направлений токов и напряжений можно составить следующие уравнения:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{G1} - jX_{G1} \left(\dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right); \quad (10.126)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{GA} - jX_{F1} \dot{I}_{LA1} + jX_{G1} \left(\dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right); \quad (10.127)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -jX_{G2} \left(\dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} \right); \quad (10.128)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -jX_{F2} \dot{I}_{LA2} + jX_{G2} \left(\dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} \right); \quad (10.129)$$

$$\dot{U}_{K0} = -jX_{G0} \left(\dot{I}_{K0} - \dot{I}_{L0} \right); \quad (10.130)$$

$$\Delta \dot{U}_{L0} = -jX_{F0} \dot{I}_{L0} + jX_{G0} \left(\dot{I}_{K0} - \dot{I}_{L0} \right). \quad (10.131)$$

Уравнения (10.126) и (10.127) являются упомянутыми выше собственными уравнениями прямой последовательности.

В случае рассматриваемой сложной несимметрии справедливы все соотношения для симметричных составляющих токов и напряжений, следующих из граничных условий как для однофазного короткого замыкания [уравнения (8.19) и (8.20)], так и несимметрии, связанной с обрывом проводника одной фазы [уравнения (9.7) и (9.8)].

Если из уравнений (10.128) – (10.131), (8.19), (9.7) и соотношений (8.20) и (9.8) исключить токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей, можно получить два уравнения, связывающие токи и напряжения прямой последовательности (особые или несобственные уравнения) в виде

$$\dot{U}_{KA1} = jX_K \dot{I}_{KA1} + jX_{KL} \dot{I}_{LA1}; \quad (10.132)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = jX_{LK} \dot{I}_{KA1} + jX_L \dot{I}_{LA1}, \quad (10.133)$$

где X_K и X_L – собственные сопротивления; X_{KL} и X_{LK} – взаимные сопротивления между точкой короткого замыкания и местом обрыва.

Для определения этих сопротивлений сначала найдем связь между током нулевой последовательности в месте обрыва \dot{I}_{L0} и токами прямой последовательности \dot{I}_{KA1} и \dot{I}_{LA1} . С этой целью в соответствии с (9.8) приравняем правые части (10.129) и (10.131):

$$\begin{aligned}
& jX_{G_2} \dot{I}_{K_{A2}} - j(X_{G_2} + X_{F_2}) \dot{I}_{LA_2} = \\
& = jX_{G_0} \dot{I}_{K_0} - j(X_{G_0} + X_{F_0}) \dot{I}_{L_0} .
\end{aligned} \tag{10.134}$$

Но в соответствии с (9.7)

$$\dot{I}_{LA_2} = -\dot{I}_{LA_1} - \dot{I}_{L_0},$$

поэтому

$$\begin{aligned}
& jX_{G_2} \dot{I}_{K_{A2}} + j(X_{G_2} + X_{F_2}) \dot{I}_{LA_1} = \\
& = jX_{G_0} \dot{I}_{K_0} - j(X_{G_2} + X_{F_2} + X_{G_0} + X_{F_0}) \dot{I}_{L_0} .
\end{aligned}$$

Учитывая (8.20), находим

$$\dot{I}_{L_0} = \frac{j(X_{G_0} - X_{G_2}) \dot{I}_{K_{A1}} - j(X_{G_2} + X_{F_2}) \dot{I}_{LA_1}}{j(X_{G_2} + X_{F_2} + X_{G_0} + X_{F_0})} . \tag{10.135}$$

Найдем также связь между током \dot{I}_{LA_2} и токами прямой последовательности $\dot{I}_{K_{A1}}$ и \dot{I}_{LA_1} . С этой целью в соответствии с (9.7) ток \dot{I}_{L_0} в (10.134) представим как

$$\dot{I}_{L_0} = -\dot{I}_{LA_1} - \dot{I}_{LA_2} .$$

Тогда выражение (10.134) примет вид:

$$\begin{aligned}
& jX_{G_2} \dot{I}_{K_{A2}} - j(X_{G_2} + X_{F_2}) \dot{I}_{LA_2} = \\
& = jX_{G_0} \dot{I}_{K_0} - j(X_{G_0} + X_{F_0}) \left(-\dot{I}_{LA_1} - \dot{I}_{LA_2} \right) .
\end{aligned}$$

Учитывая (8.20), получим:

$$\begin{aligned}
& j(X_{G_2} - X_{G_0}) \dot{I}_{K_{A1}} - j(X_{G_0} + X_{F_0}) \dot{I}_{LA_1} = \\
& = j(X_{G_2} + X_{F_2} + X_{G_0} + X_{F_0}) \dot{I}_{LA_2} ,
\end{aligned}$$

откуда

$$\dot{I}_{LA_2} = \frac{j(X_{G_2} - X_{G_0}) \dot{I}_{K_{A1}} - j(X_{G_0} + X_{F_0}) \dot{I}_{LA_1}}{j(X_{G_2} + X_{F_2} + X_{G_0} + X_{F_0})} . \tag{10.136}$$

Согласно уравнению (8.19) напряжение \dot{U}_{KA1} связано с \dot{U}_{KA2} и \dot{U}_{K0} соотношением

$$\dot{U}_{KA1} = -\dot{U}_{KA2} - \dot{U}_{K0}$$

или, в соответствии с (10.128) и (10.130)

$$\dot{U}_{KA1} = j(X_{G2} + X_{G0})\dot{I}_{KA1} - jX_{G2}\dot{I}_{LA2} - jX_{G0}\dot{I}_{L0}.$$

Если с помощью (10.135) и (10.136) исключить из этого соотношения токи \dot{I}_{LA2} и \dot{I}_{L0} , то получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KA1} &= j(X_{G2} + X_{G0})\dot{I}_{KA1} - \\ &- jX_{G2} \frac{j(X_{G2} - X_{G0})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G0} + X_{F0})\dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} - \\ &- jX_{G0} \frac{j(X_{G0} - X_{G2})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G2} + X_{F2})\dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} = \\ &= j \left[X_{G2} + X_{G0} - \frac{(X_{G2} - X_{G0})^2}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \right] \dot{I}_{KA1} + \\ &+ j \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{LA1} = \\ &= jX_K \dot{I}_{KA1} + jX_{KL} \dot{I}_{LA1}, \end{aligned} \quad (10.137)$$

где

$$X_K = X_{G2} + X_{G0} - \frac{(X_{G2} - X_{G0})^2}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}}; \quad (10.138)$$

$$X_{KL} = \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}}. \quad (10.139)$$

Найдем сопротивления X_{LK} и X_L , входящие в уравнение (10.133). В соответствии с (9.8), (10.129) и (8.20)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = jX_{G2}\dot{I}_{KA1} - j(X_{G2} + X_{F2})\dot{I}_{LA2}.$$

Если с помощью (10.136) исключить отсюда ток \dot{I}_{LA1} , то получим:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{U}_{LA1} &= jX_{G2} \dot{I}_{KA1} - \\
 &- j(X_{G2} + X_{F2}) \frac{j(X_{G2} - X_{G0}) \dot{I}_{KA1} - j(X_{G0} + X_{F0}) \dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} = \\
 &= j \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{KA1} + \quad (10.140) \\
 &+ j \frac{(X_{G2} + X_{F2})(X_{G0} + X_{F0})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{LA1} = \\
 &= jX_{LK} \dot{I}_{KA1} + jX_L \dot{I}_{LA1},
 \end{aligned}$$

где

$$X_{LK} = \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}}, \quad (10.141)$$

$$X_L = \frac{(X_{G2} + X_{F2})(X_{G0} + X_{F0})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}}. \quad (10.142)$$

Выражения (10.139) и (10.141) показывают, что при обрыве проводника какой-либо фазы и одновременном однофазном коротком замыкании той же фазы взаимные сопротивления X_{KL} и X_{LK} равны. При этом условии уравнения (10.132) и (10.133) можно представить в виде:

$$\dot{U}_{KA1} = -jX_{KL} \left(\dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right) + j(X_K + X_{KL}) \dot{I}_{KA1}; \quad (10.143)$$

$$\dot{U}_{LA1} = -(-jX_{KL}) \left(\dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right) + j(X_L + X_{KL}) \dot{I}_{LA1}. \quad (10.144)$$

Этим уравнениям соответствует простая производная или эквивалентная схема замещения прямой последовательности, которая представлена на рис. 10.12 (обведена пунктирной линией) совместно с основной схемой замещения прямой последовательности.

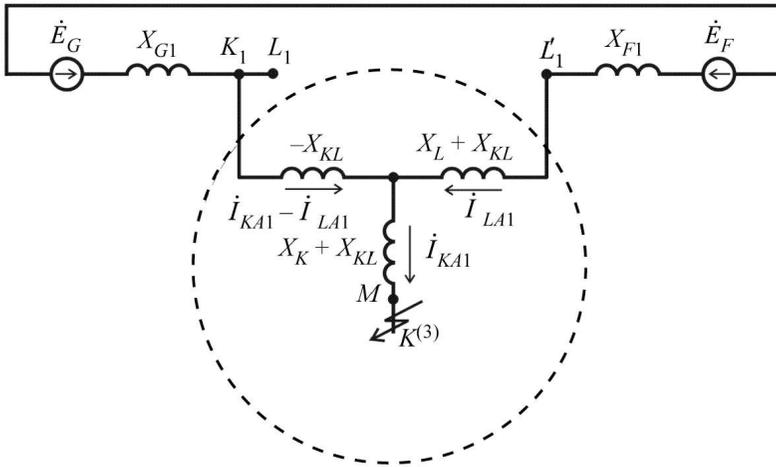


Рис. 10.12. Основная и производная (эквивалентная) схемы замещения прямой последовательности

Совмещение производной схемы замещения прямой последовательности, параметры которой определяются только параметрами схем замещения обратной и нулевой последовательностей, с основной схемой замещения прямой последовательности позволяет расчет токов и напряжений прямой последовательности при сложной несимметрии свести к расчету этих величин при эквивалентном

трехфазном коротком замыкании в точке M . Очевидно, ток \dot{I}_{KA1} равен току эквивалентного трехфазного короткого замыкания на конце производной схемы замещения, а разность напряжений прямой последовательности в месте обрыва (т.е. между точками L_1 и L'_1) определяется суммой падений напряжений в сопротивлении $-X_{KL}$ от тока $\dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1}$ и в сопротивлении $X_L + X_{KL}$ от тока \dot{I}_{LA1} .

Следует отметить, что производная схема замещения прямой последовательности оказывается сравнительно простой только при выполнении принципа взаимности, т.е. при $X_{KL} = X_{LK}$. В общем же случае при сложных несимметричных повреждениях принцип взаимности не соблюдается, т.е. $X_{KL} \neq X_{LK}$. При этом производная схема замещения прямой последовательности усложняется. Например, при расчете двойных замыканий на землю с использованием производной схемы прямой последовательности в последнюю приходится включать дополнительный источник тока.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТОКАМ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

11.1. Влияние конструктивных особенностей различных элементов электроэнергетической системы на их сопротивления обратной и нулевой последовательностей

Сопротивление любого элемента трехфазной (многофазной) электрической цепи по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей обычно для краткости называют сопротивлением прямой, обратной и нулевой последовательности.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей отдельных элементов электрических цепей электроэнергетических систем в зависимости от конструктивного выполнения этих элементов могут быть одинаковыми или разными. С этой точки зрения все элементы можно разделить на три группы:

- статические элементы (т.е. элементы без вращающихся частей), у которых отсутствует взаимная индуктивность между фазами;
- статические элементы, обладающие взаимной индуктивностью между отдельными фазами;
- вращающиеся электрические машины.

Индуктивное сопротивление статических элементов электрических цепей, фазы которых не связаны между собой магнитными потоками взаимоиндукции, определяется только потоками самоиндукции, поэтому сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности этих элементов одинаковы. К таким элементам обычно относят токоограничивающие реакторы, так как у них магнитная связь между фазами незначительна.

Особенность статических элементов, обладающих взаимной индуктивностью между фазами, состоит в том, что при равенстве

собственных индуктивностей отдельных фаз и взаимных индуктивностей между каждой парой фаз одинаковыми являются только сопротивления прямой и обратной последовательностей. А индуктивное сопротивление нулевой последовательности фаз больше, чем прямой (обратной) последовательности. Это объясняется тем, что при токах нулевой последовательности ЭДС взаимоиндукции в каждой фазе от тока любой другой фазы совпадает по фазе с ЭДС самоиндукции, тогда как при токах прямой (обратной) последовательности ЭДС самоиндукции в каждой фазе и результирующая ЭДС взаимоиндукции от токов двух других фаз находятся в противофазе.

Индуктивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей вращающихся электрических машин неодинаковы, так как различны физические процессы, имеющие место в таких машинах при системах напряжений и токов разных последовательностей. Это связано с особенностями конструктивного выполнения вращающихся электрических машин, а у синхронных машин и с наличием собственного вращающегося магнитного поля. Система токов прямой последовательности создает дополнительное магнитное поле, вращающееся в ту же сторону, что и собственное магнитное поле машины. Система токов обратной последовательности вызывает появление магнитного поля, вращающегося в обратном направлении. А система токов нулевой последовательности создает в машине пульсирующее магнитное поле, которое имеет особое распределение в магнитной системе машины. Магнитные потоки, созданные токами нулевой последовательности, одновременно во всех трех фазах направлены к ротору или от него и вынуждены замыкаться от ротора к якорю в торцевых частях машины не по стали.

11.2. Синхронные машины

Сопротивление обратной последовательности синхронной машины не является в полном смысле константой машины, а может принимать разные значения. Это объясняется магнитной и электрической несимметрией ее ротора и связанным с этим неравенством параметров по продольной и поперечной осям ротора. Следствием магнитной несимметрии ротора является неравенство сопротивлений взаимоиндукции между обмоткой якоря и контурами ротора по продольной и поперечной осям X_{ad} и X_{aq} , а следствием электрической несимметрии – неравенство индуктивных сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений продольного и поперечного демпферных контуров. Обмотка возбуждения, оказывая влияние только на продольное магнитное поле, увеличивает электрическую несимметрию ротора.

Особенность сопротивления обратной последовательности синхронной машины заключается и в том, что его значение зависит от причины появления токов обратной последовательности.

Токи обратной последовательности создают в машине обратно-вращающееся магнитное поле, наличие которого приводит (см. гл. 11) к появлению в контурах ротора токов двойной частоты, а в обмотке якоря – ЭДС обратной последовательности основной частоты и ЭДС прямой последовательности тройной частоты. Влияние последней зависит от условий возникновения тока обратной последовательности в машине. В отечественной и зарубежной литературе существует три подхода определения значения X_2 , дающих хотя и разные, но близкие результаты. Эти три подхода заключаются в следующем.

1. Через обмотку якоря машины пропускается синусоидальный ток обратной последовательности I_2 промышленной частоты от источника тока, т.е. при сопротивлении внешней цепи (по отношению к якору машины) $X_{\text{вн}} = \infty$.

2. К обмотке якоря машины подводится синусоидальное напряжение обратной последовательности U_2 промышленной частоты от источника напряжения, т.е. при сопротивлении внешней цепи (по отношению к якору машины) $X_{\text{вн}} = 0$.

3. Появление токов обратной последовательности в машине вследствие тех или иных причин, возникших в сети системы и обусловивших несимметрию токов в якоре машины при $0 < X_{\text{вн}} < \infty$.

Рассмотрим сначала эти подходы без учета влияния демпферных контуров синхронной машины.

В первом случае – при подключении обмотки якоря синхронной машины к источнику синусоидального тока обратной последовательности в этой обмотке наводится ЭДС прямой последовательности тройной частоты. Но тока тройной частоты в обмотке якоря эта ЭДС не вызывает, так как $X_{\text{вн}} = \infty$. При этом напряжение обратной

последовательности \dot{U}_2 , напряжение прямой последовательности тройной частоты $\dot{U}_{1(3f)}$ и ток обратной последовательности \dot{I}_2 связаны соотношением

$$\dot{U}_2 e^{-j\omega t} + \dot{U}_{1(3f)} e^{j3\omega t} = -j \dot{I}_2 X_2, \quad (11.1)$$

причем в моменты совпадения магнитного поля тока обратной последовательности с продольной и поперечной осями ротора слагаемые левой части формулы (11.1) направлены соответственно одинаково и взаимнопротивоположно. Поэтому напряжение прямой последовательности тройной частоты практически не влияет на среднее напряжение на выводах машины. Вследствие несимметрии ротора

магнитное поле тока обратной последовательности периодически изменяется. Соответственно изменяется и напряжение обратной последовательности от $U_{2\min}$ – при совпадении магнитного поля тока обратной последовательности с продольной осью ротора, до $U_{2\max}$ – при совпадении указанного магнитного поля с поперечной осью ротора, причем эти значения связаны с током обратной последовательности якоря соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2\min} &= -jX'_d \dot{I}_2; \\ \dot{U}_{2\max} &= -jX_q \dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

Обычно напряжение обратной последовательности определяют как среднее арифметическое из минимального и максимального значений, т.е.

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{2\min} + \dot{U}_{2\max}}{2} = -j \frac{(X'_d + X_q)}{2} \dot{I}_2, \quad (11.3)$$

поэтому сопротивление обратной последовательности синхронной машины при подключении обмотки якоря к источнику синусоидального тока обратной последовательности определяют как модуль отношения среднего арифметического значения напряжения обратной последовательности к току якоря

$$X_2 = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{I}_2|} = \frac{X'_d + X_q}{2}. \quad (11.4)$$

Во втором случае – при подведении к обмотке якоря синхронной машины синусоидального напряжения обратной последовательности от источника напряжения – по отношению к наводимой ЭДС прямой последовательности тройной частоты обмотка якоря оказывается замкнутой накоротко ($X_{\text{вн}} = 0$). В результате этого в ней возникают такие токи прямой последовательности тройной частоты, при которых напряжение прямой последовательности тройной частоты на выводах обмотки становятся равными нулю.

Ток обратной последовательности \dot{I}_2 , ток прямой последовательности тройной частоты $\dot{I}_{1(3f)}$ и напряжение обратной последовательности \dot{U}_2 связаны между собой соотношением

$$\dot{I}_2 e^{-\omega t} + \dot{I}_{1(3f)} e^{3\omega t} = \frac{\dot{U}_2}{jX_2}, \quad (11.5)$$

при этом в моменты, когда магнитные поля токов обратной последовательности и прямой последовательности тройной частоты совпадают с продольной осью ротора, токи, определяемые слагаемыми левой части выражения (11.5), направлены одинаково, а когда поля совпадают с поперечной осью ротора, указанные токи направлены взаимно противоположно. Поэтому ток прямой последовательности тройной частоты практически не влияет на среднее значение тока обмотки якоря машины.

Вследствие несимметрии ротора магнитное поле тока обратной последовательности периодически изменяется. Соответственно изменяется и ток обратной последовательности от $I_{2\max}$ – при совпадении магнитного поля тока обратной последовательности с продольной осью ротора, до $I_{2\min}$ – при совпадении указанного магнитного поля с поперечной осью ротора, причем указанные значения тока обратной последовательности связаны с подведенным к машине напряжением обратной последовательности соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{2\max} &= -j \frac{\dot{U}_2}{X'_d}; \\ \dot{I}_{2\min} &= -j \frac{\dot{U}_2}{X_q} \end{aligned} \right\} \quad (11.6)$$

поэтому среднее арифметическое значение тока обратной последовательности

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_{2\min} + \dot{I}_{2\max}}{2} = -j \frac{\dot{U}_2}{2} \left(\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q} \right).$$

Сопротивление обратной последовательности синхронной машины при подведении к обмотке якоря синусоидального напряжения обратной последовательности от источника напряжения, определяемое как модуль отношения напряжения обратной последовательности к среднему значению тока обратной последовательности, составляет

$$X_2 = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right| = \frac{2}{\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q}} = \frac{2X'_d X_q}{X'_d + X_q}. \quad (11.7)$$

Выражению (11.7) соответствует эквивалентная схема, представленная на рис. 11.1. Значение тока левой ветви схемы с сопротивлением X'_d численно равно действующему значению тока обратной последовательности основной частоты, а модуль тока правой ветви с сопротивлением X'_d – действующему значению тока прямой последовательности тройной частоты (но схема на рис. 11.1 не отражает реальной частоты этого тока). Выражение (11.7) позволяет показать, что сопротивление обратной последовательности синхронной машины зависит от сопротивления внешней по отношению к машине цепи (с этой целью достаточно в указанном выражении к X'_d и X_q добавить $X_{вн}$ и из полученного эквивалентного сопротивления обратной последовательности машины и внешней цепи вычесть $X_{вн}$). Зависимость сопротивления обратной последовательности машины от сопротивления внешней цепи является следствием циркуляции в обмотке якоря машины тока тройной частоты, амплитуда которого является функцией этого сопротивления. В пределе, при стремлении последнего к бесконечности ток тройной частоты оказывается подавленным и сопротивление обратной последовательности стремится к значению, определяемому выражением (11.4). Соответствующее сопротивление обратной последовательности можно получить и из схемы на рис. 11.1, разорвав в ней правую ветвь с сопротивлением X'_d .

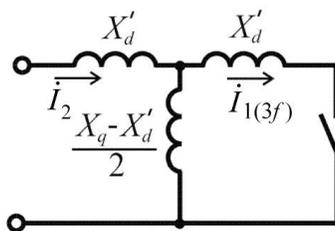


Рис. 11.1. Схема замещения, определяющая сопротивление обратной последовательности синхронной машины с учетом влияния тока прямой последовательности тройной частоты

В третьем случае – при появлении тока обратной последовательности в обмотке якоря вследствие каких-либо причин в сети энергосистемы (например несимметричное короткое замыкание при $0 < X_{вн} < \infty$), возникновение в этой обмотке тока прямой последовательности тройной частоты сопровождается появлением тока обратной последовательности той же частоты. В результате в обмотке возбуждения возникают токи частоты $4f$ и в обмотке якоря токи прямой последовательности частоты $5f$ и соответственно токи обратной

последовательности той же частоты и т.д. (см. гл. 11). Влияние всех нечетных гармонических составляющих тока якоря на сопротивление обратной последовательности синхронной машины в полной мере отражает бесконечная цепная схема замещения (рис. 11.2), состоящая из одинаковых Т-образных звеньев, горизонтальные ветви которых имеют сопротивление X'_d , а вертикальные — $\frac{X_q - X'_d}{2}$. Эквивалентное сопротивление этой схемы, равное сопротивлению обратной последовательности синхронной машины, составляет

$$X_2 = \sqrt{X'_d X'_q}. \quad (11.8)$$

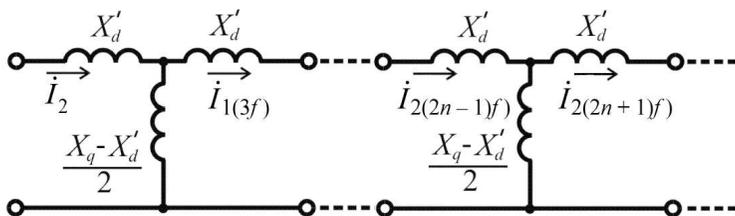


Рис. 11.2. Цепная схема замещения, определяющая сопротивление обратной последовательности синхронной машины с учетом влияния нечетных гармонических составляющих тока якоря

Очевидно, и найденное с использованием этой формулы сопротивление обратной последовательности синхронной машины зависит от сопротивления внешней цепи.

Формулы (11.4), (11.7) и (11.8) применимы также для определения сопротивления обратной последовательности синхронной машины с демпферными контурами, если в них заменить X'_d и X_q соответственно на X''_d и X''_q . Поскольку у синхронных машин с демпферными контурами и особенно у турбогенераторов несимметрия ротора выражена значительно слабее, чем у рассмотренных машин без демпферных контуров, то у них разница между X''_d и X''_q существенно меньше, чем между X'_d и X_q у машин без демпферных контуров. Вследствие этого у машин с демпферными контурами нечетные гармонические составляющие тока якоря при несимметричных коротких замыканиях проявляются значительно меньше, а результаты определения индуктивного сопротивления обратной последовательности, получаемые по разным формулам, оказываются близкими друг к другу.

Что касается сопротивления нулевой последовательности синхронных машин, то оно в значительной степени зависит от типа обмотки якоря. Токи нулевой последовательности разных фаз создают в синхронной машине пульсирующие магнитные поля, которые сдвинуты в пространстве на угол $2\pi/3$ и в зазоре машины компенсируются, исключая таким образом электромагнитную связь между якорем и ротором. Нескомпенсированными остаются только магнитные поля рассеяния фаз якоря. Однако эти поля не идентичны полям рассеяния от токов прямой или обратной последовательности: если при токах прямой (обратной) последовательности потокосцепление рассеяния фазы за счет влияния других фаз усиливается, то при токах нулевой последовательности – обычно ослабляется. Поэтому индуктивное сопротивление нулевой последовательности синхронной машины меньше сопротивления рассеяния якоря для токов прямой (обратной) последовательности и в зависимости от конструкции обмотки якоря колеблется в широких пределах.

11.3. Асинхронные электродвигатели

Если у асинхронного электродвигателя, ротор которого вращается со скольжением $s = \frac{\omega_{\text{синх}} - \omega}{\omega_{\text{синх}}}$ по отношению к магнитному потоку от токов прямой последовательности, поменять порядок чередования фаз подводимого напряжения, поддерживая при этом прежнюю скорость вращения (с помощью постороннего привода), то возникшие в обмотке статора токи обратной последовательности создадут магнитный поток, вращающийся с синхронной скоростью в сторону, противоположную направлению вращения ротора. По отношению к этому потоку скольжение ротора составит

$s_2 = \frac{-\omega_{\text{синх}} - \omega}{-\omega_{\text{синх}}} = 2 - s$, так как угловая скорость вращения ротора, выраженная через скольжение по отношению к потоку от тока прямой последовательности, составит $\omega = (1-s)\omega_{\text{синх}}$. Таким образом, сопротивление обратной последовательности асинхронной машины представляет собой ее сопротивление при скольжении $2 - s$. Очевидно, это сопротивление можно определить как эквивалентное сопротивление обычной схемы замещения асинхронной машины, если в ней заменить скольжение ротора по отношению к магнитному потоку от токов прямой последовательности s скольжением ротора относительно магнитного потока от токов обратной последовательности $s_2 = 2 - s$ (рис. 11.3).

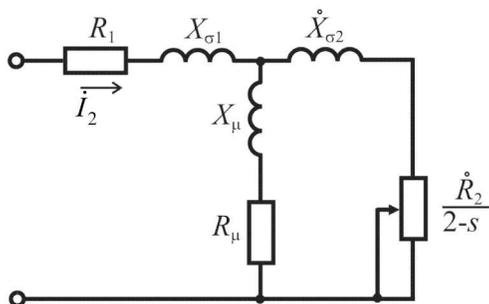


Рис. 11.3. Схема замещения, определяющая сопротивление обратной последовательности асинхронного электродвигателя

В тех случаях, когда на параметры обмотки ротора асинхронной машины существенное влияние оказывает эффект вытеснения тока в проводниках этой обмотки, исходные параметры предварительно должны быть пересчитаны на частоту токов в роторе, обусловленных током обратной последовательности. Эта частота равна $f(2 - s)$ и значительно больше частоты токов в роторе fs , обусловленных током прямой последовательности.

Нетрудно показать, что при изменении скольжения асинхронной машины от $s_1 = 1$ до $s_2 = 2 - s$ ее эквивалентное (входное) сопротивление изменяется незначительно. Поэтому сопротивление обратной последовательности асинхронной машины обычно принимают равным сопротивлению заторможенной машины, т.е. $Z_2 \approx Z_K$.

11.4. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы

Схемы замещения трансформаторов (автотрансформаторов) по отношению к токам нулевой и прямой (обратной) последовательностей, а также и параметры соответствующих схем в общем случае неодинаковы. Особенности схем замещения по отношению к токам нулевой последовательности обусловлены их зависимостью от схем соединения обмоток, а особенности параметров – их зависимостью от конструктивного выполнения трансформаторов (автотрансформаторов).

Для циркуляции токов нулевой последовательности в какой-либо обмотке трансформатора (автотрансформатора) в случае появления на ее выводах напряжения нулевой последовательности относительно земли (имеется в виду трехпроводная система) необходимо,

чтобы эта обмотка имела заземленную нейтраль. Таким образом, сопротивление нулевой последовательности трансформатора со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду с изолированной нейтралью, бесконечно велико. Что касается трансформаторов, у которых обмотка со стороны возможного появления напряжения нулевой последовательности соединена в звезду с заземленной нейтралью (назовем ее обмоткой 1), то их сопротивление нулевой последовательности зависит от схем соединения других обмоток.

Возможные схемы соединения обмоток двух- и трехобмоточных трансформаторов и соответствующие схемы замещения по отношению к токам нулевой последовательности таких трансформаторов приведены на рис. 11.4. На этих схемах U_0 – источник напряжения нулевой последовательности, X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки 1, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, X_2 и X_3 – сопротивления рассеяния обмоток 2 и 3, приведенные к обмотке 1, а $X_{\mu 0}$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания по отношению к токам нулевой последовательности (зависит от конструктивного исполнения трансформатора). У трехфазной группы из однофазных трансформаторов ток намагничивания не зависит от того, какой системой напряжений он обусловлен, поэтому $X_{\mu 0} = X_{\mu 1}$, где $X_{\mu 1}$ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания по отношению к токам прямой последовательности. Эти сопротивления по сравнению с сопротивлениями рассеяния обмоток можно считать бесконечно большими. Такое утверждение справедливо и для трехфазных трансформаторов с четырехстержневым и бронестержневым магнитопроводом. У трехфазных трехстержневых трансформаторов магнитные потоки нулевой последовательности разных стержней замыкаются вне магнитопровода – через изолирующую среду, стенки бака и различные конструктивные части. Вследствие малой магнитной проводимости изолирующей среды ток намагничивания нулевой последовательности оказывается значительно больше тока намагничивания прямой последовательности. Поэтому у таких трансформаторов индуктивное сопротивление нулевой последовательности ветви намагничивания $X_{\mu 0}$ существенно меньше, чем $X_{\mu 1}$. Обычно это сопротивление, выраженное в относительных единицах при номинальной мощности трансформатора, находится в пределах $X_{\mu 0(\text{ном})} = 0,3 \dots 1,0$.

Если обмотки двухобмоточного трансформатора соединены по схеме Y_0/Δ (рис. 11.4,а), то при появлении на выводах обмотки 1 напряжения нулевой последовательности по фазам обмотки 2, соединенной в треугольник, начинает циркулировать ток нулевой последовательности.

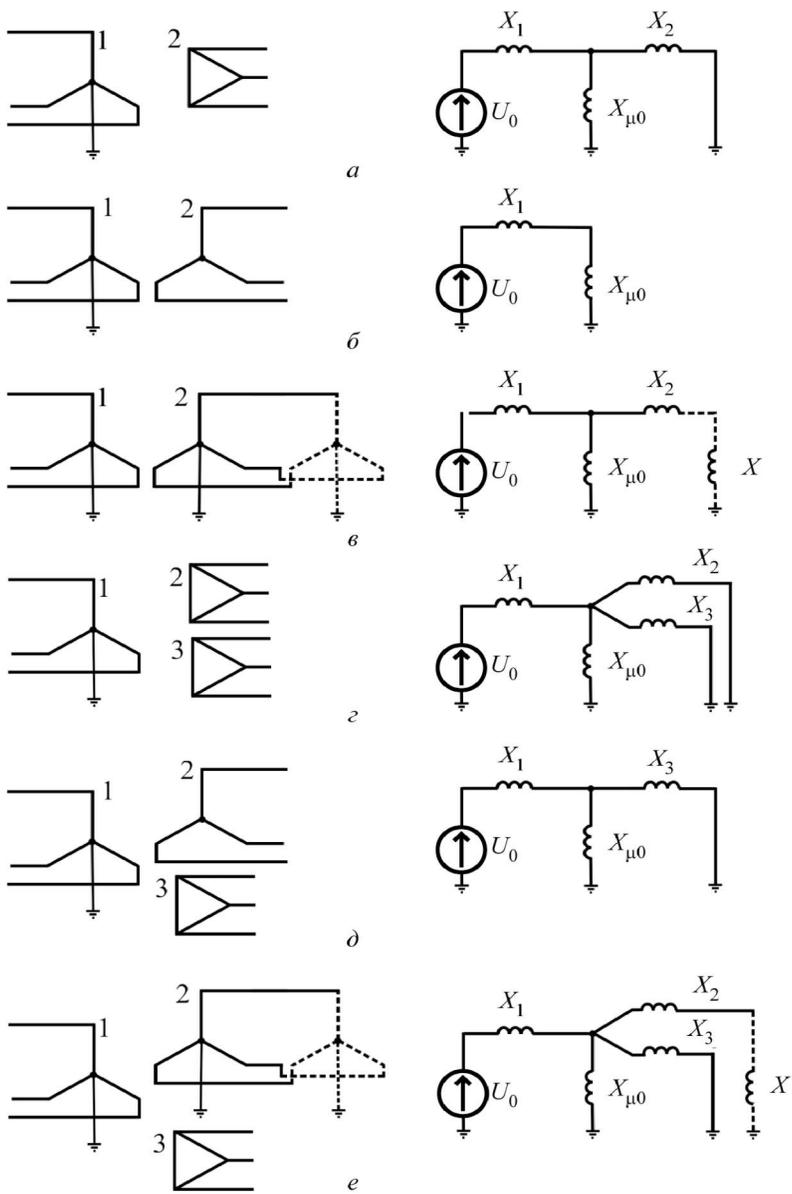


Рис. 11.4. Схемы соединения обмоток и схемы замещения по отношению к токам нулевой последовательности двухобмоточных (а – в) и трехобмоточных (з – е) трансформаторов

Его значение обусловлено условием, чтобы падение напряжения в обмотке каждой фазы было численно равно наводимой в ней ЭДС нулевой последовательности. Вследствие этого потенциалы линейных проводников оказываются равными нулю и ток в эти проводники не попадает. На этом основании на схеме замещения нулевой последовательности трансформатора с указанной схемой соединения обмоток точка, соответствующая линейным выводам обмотки 2, соединяется с точкой нулевого потенциала (с землей, см. правую часть рис. 11.4,а). Таким образом, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки, соединенной в треугольник, является крайним (начальным) элементом схемы замещения нулевой последовательности, независимо от того, какие другие элементы подключены к этой обмотке.

Поскольку при любом конструктивном исполнении трансформатора $X_{\mu 0} \gg X_2$, то $X_{\mu 0} // X_2 \approx X_2$, т.е. при соединении обмотки 2 в треугольник $X_{\mu 0}$ считают бесконечно большим и не учитывают при определении сопротивления нулевой последовательности трансформатора (иногда для трехфазных трехстержневых трансформаторов сопротивление нулевой последовательности принимают равным 0,85 ... 0,9 от сопротивления прямой последовательности).

При соединении обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y (рис. 11.4,б) токи нулевой последовательности в обмотку 2 не трансформируются, так как фазы этой обмотки не являются частью какого-либо замкнутого контура для таких токов. Поэтому схема замещения нулевой последовательности рассматриваемого трансформатора содержит только сопротивление рассеяния обмотки 1 и сопротивление $X_{\mu 0}$ (см. правую часть рис. 11.4,б). Учитывая, что $X_{\mu 0} \gg X_1$, сопротивление нулевой последовательности трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Y обычно принимают бесконечно большим.

В тех случаях, когда обмотки двухобмоточного трансформатора соединены по схеме Y_0/Y_0 (рис. 11.4,в), трансформация токов нулевой последовательности в обмотку 2 возможна лишь в том случае, когда фазы этой обмотки по отношению к указанным токам являются частью замкнутого контура, включающего в себя и землю. Для этого необходимо, чтобы во внешней сети, электрически связанной с обмоткой 2, был включен какой-либо элемент с заземленной нейтралью, например, трансформатор, у которого имеются условия для трансформации тока в другую его обмотку (см. рис. 11.4,в, на котором пунктирными линиями показаны соединенная в звезду с заземленной нейтралью обмотка внешнего элемента, а на схеме замещения нулевой последовательности ее индуктивное сопротивление X). Если же это условие не выполняется, то схема замещения нулевой последовательности рассматриваемого трансформатора оказывается такой же, как и трансформатора с соединением обмоток по схеме Y_0/Y , т.е. $X_0 = X_1 + X_{\mu 0}$.

У трехобмоточных трансформаторов с соединением обмотки 1 в звезду с заземленной нейтралью обмотка 2 как и у двухобмоточных трансформаторов может иметь разные схемы соединения, а дополнительная обмотка 3 (рис. 11.4,*z,d,e*) обычно соединена в треугольник. Поэтому схемы замещения трехобмоточных трансформаторов по отношению к токам нулевой последовательности отличаются от схем соответствующих двухобмоточных трансформаторов лишь тем, что в них параллельно ветви намагничивания включается ветвь с сопротивлением рассеяния обмотки 3 (см. правые части рис. 11.4,*z,d,e*). Поскольку ветвь намагничивания обладает сравнительно большим индуктивным сопротивлением, то ее часто исключают из схемы замещения, а в случае трехфазных трехстержневых трансформаторов, как было сказано выше, ее иногда учитывают, уменьшая сопротивление рассеяния обмотки, соединенной в треугольник.

Схемы замещения автотрансформаторов по отношению к токам нулевой последовательности при непосредственном (глухом) заземлении их нейтрали не отличаются от соответствующих схем трансформаторов, имеющих ту же схему соединения обмоток: у двухобмоточных автотрансформаторов обе обмотки имеют общую нейтраль, и их схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме замещения двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 (рис. 11.4,*б*); у трехобмоточных автотрансформаторов третья обмотка обычно соединена в треугольник, поэтому их схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме замещения трехобмоточного трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y_0/Y_0/\Delta$ (рис. 11.4,*в*).

Иногда нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов заземляют не непосредственно, а через какой-либо элемент, например, резистор, реактор и т.д. Поскольку этот элемент является частью контура, по которому возможна циркуляция токов нулевой последовательности, то он должен быть учтен в схеме замещения нулевой последовательности.

При включении упомянутого элемента в нейтраль обмотки 1 трехобмоточного трансформатора (рис. 11.5,*а*) этот элемент и три фазы обмотки 1 по отношению к токам нулевой последовательности оказываются включенными последовательно, при этом падение напряжения в сопротивлении элемента X_N от токов нулевой последовательности разных фаз в 3 раза больше, чем от тока одной фазы. Вследствие этого на схеме замещения нулевой последовательности указанный элемент включается последовательно с обмоткой 1 (рис. 11.5,*а*, правая часть) и учитывается утроенным сопротивлением.

Обмотки 1 и 2 автотрансформаторов (точнее – последовательная и общая обмотки) связаны между собой не только с помощью магнитного поля, но и электрически (рис. 11.5,*б,в*). Поэтому при заземлении нейтрали автотрансформатора, например, через реактор, обладающий индуктивным сопротивлением X_N , сопротивление нулевой последова-

тельности такого автотрансформатора с учетом реактора оказывается зависящим не только от сопротивлений $X_1, X_2, X_3, X_{\mu 0}$ и X_N , но и от номинальных напряжений обмоток 1 и 2, т.е. $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$. В частности, эквивалентное сопротивление нулевой последовательности (т.е. сопротивление с учетом X_N) двухобмоточного автотрансформатора, во вторичной цепи которого обеспечено условие для циркуляции тока нулевой последовательности (рис. 11.5, б, слева), составляет

$$X_{\text{эк0}} = X_{T0} + 3X_N(1 - n_T)^2, \quad (11.9)$$

где X_{T0} – сопротивление нулевой последовательности автотрансформатора при отсутствии в нейтрали реактора; $n_T = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$.

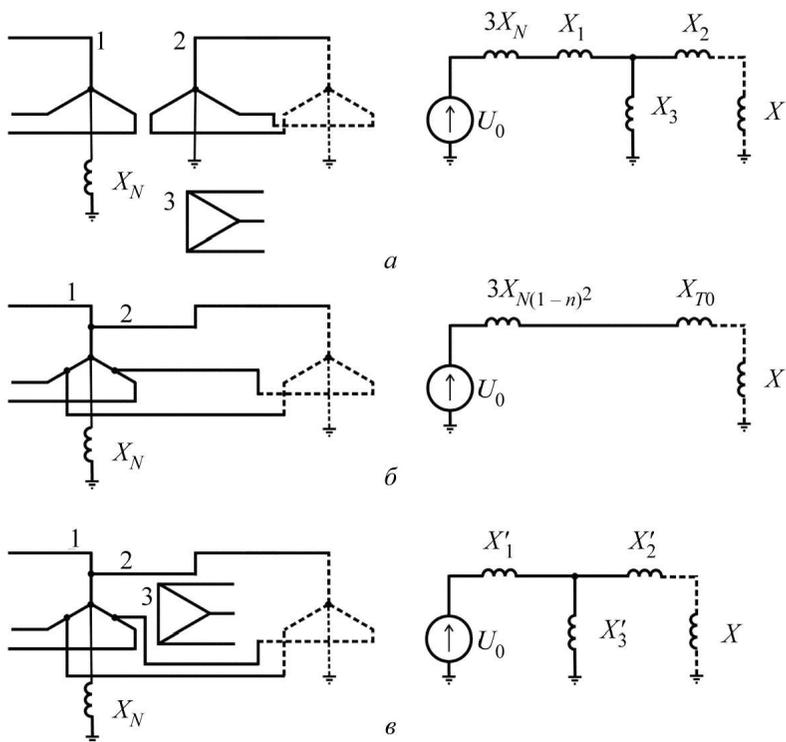


Рис. 11.5. Схемы соединения обмоток и схемы замещения по отношению к токам нулевой последовательности трехобмоточного трансформатора (а), двухобмоточного автотрансформатора (б) и трехобмоточного автотрансформатора (в) при заземлении нейтрали через индуктивное сопротивление

Эквивалентная схема замещения по отношению к токам нулевой последовательности трехобмоточного автотрансформатора, у которого нейтраль заземлена через реактор с сопротивлением X_N , а третья обмотка соединена в треугольник, представляет собой трехлучевую звезду (рис. 11.5,в, правая часть). Сопротивления лучей этой звезды, приведенные к обмотке 1, составляют

$$\left. \begin{aligned} X'_1 &= X_1 + 3X_N(1 - n_T); \\ X'_2 &= X_2 + 3X_N(n_T - 1)n_T; \\ X'_3 &= X_3 + 3X_N n_T, \end{aligned} \right\} \quad (11.10)$$

где X_1, X_2, X_3 – сопротивления лучей трехлучевой схемы замещения автотрансформатора (при отсутствии реактора в его нейтрали), приведенные к обмотке 1.

11.5. Факторы, определяющие полное сопротивление прямой (обратной) и нулевой последовательностей воздушных линий электропередачи

Чтобы понять методику определения индуктивных сопротивлений прямой (обратной) и нулевой последовательностей воздушных линий электропередачи, предварительно приведем некоторые сведения о зависимости индуктивного сопротивления проводов воздушных линий от различных факторов, в частности, от того, где ток каждого провода возвращается обратно – по другим проводам или по земле.

Рассмотрим сначала двухпроводную воздушную линию. Погонная (на единицу длины линии, обычно на 1 км) индуктивность и соответственно погонное индуктивное сопротивление обоих проводов двухпроводной линии при заданном токе определяется отнесенным к этому току магнитным потоком, пронизывающим петлю прямоугольной формы, ширина которой равна расстоянию D между осями прямого и обратного проводов (рис. 11.6,а).

Этот поток можно представить в виде суммы двух одинаковых магнитных потоков, создаваемых токами разных проводов (линии магнитного поля одного из потоков показаны на рис. 11.6,б). Поэтому погонное индуктивное сопротивление одного провода двухпроводной линии определяется магнитным потоком, создаваемым током данного провода и пронизывающим петлю прямоугольной формы длиной 1 км и шириной D . При этом часть линий магнитного поля замыкается в воздухе, а другая – внутри провода. Погонное индук-

тивное сопротивление провода, Ом/км, обусловленное внешним магнитным полем, определяется по формуле

$$X_{\text{вн}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r}, \quad (11.11)$$

где f – частота переменного тока; μ_0 – магнитная проницаемость пустоты; r – радиус поперечного сечения провода.

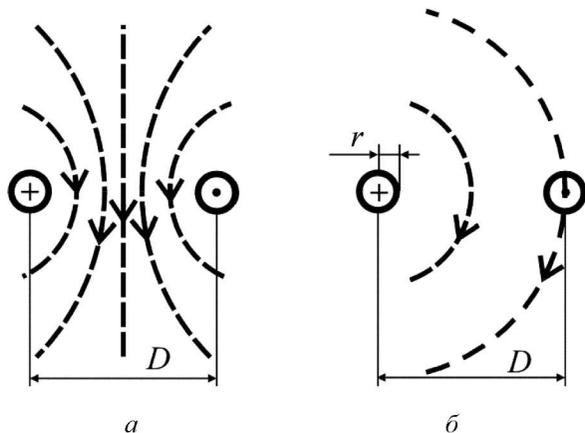


Рис. 11.6. Линии магнитного поля, создаваемого токами двух проводников (а) и током одного проводника (б) в пределах ширины петли

Определение индуктивного сопротивления провода от внутреннего потокоцепления является весьма сложной задачей, так как разные линии магнитного поля охватывают неодинаковые токи, причем вследствие эффекта вытеснения эти токи распределены по сечению провода неравномерно. Чтобы упростить задачу, обычно принимают плотность тока одинаковой по всему сечению провода. При таком допущении выражение для погонного индуктивного сопротивления провода от внутреннего потокоцепления, Ом/км, оказывается весьма простым:

$$X_{\text{вт}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{8\pi}. \quad (11.12)$$

Результирующее погонное индуктивное сопротивление провода определяется выражением

$$X = X_{\text{вн}} + X_{\text{вт}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \right). \quad (11.13)$$

Обычно при расчетах индуктивного сопротивления нулевой последовательности воздушных линий электропередачи выражение (11.13) представляют в более простом виде:

$$X = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_{\text{эк}}}, \quad (11.14)$$

где $r_{\text{эк}}$ – так называемый эквивалентный радиус поперечного сечения провода.

Связь между действительным и эквивалентным радиусами легко установить, приравняв правые части (11.13) и (11.14). При этом оказывается, что $r_{\text{эк}} = 0,779r$. Однако такое соотношение между $r_{\text{эк}}$ и r справедливо лишь для проводов сплошного сечения. Для витых проводов отношение $r_{\text{эк}}/r$ несколько меньше 0,779, а для витых сталеалюминиевых проводов $r_{\text{эк}}/r \approx 0,95$.

Физически переход от выражения (11.13) к (11.14) означает замену реальных проводов проводами, у которых отсутствует внутреннее магнитное поле. Это возможно лишь в том случае, когда весь ток распределен только по поверхности проводов, т.е. если провода выполнены из сверхпроводящего материала. Очевидно, чтобы при том же токе и отсутствии внутреннего магнитного поля создать поттокосцепление, равное сумме поттокосцеплений от внешнего и внутреннего магнитных полей реального провода, заменив таким образом внутренний магнитный поток таким же внешним, радиус поперечного сечения провода из сверхпроводящего материала должен быть соответственно уменьшен.

Выразив в (11.14) натуральный логарифм через десятичный и подставив в это выражение $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ Гн/км, получим

$$X = 2\pi f \cdot 4,6 \cdot 10^{-4} \lg \frac{D}{r_{\text{эк}}} = 2,9 \cdot 10^{-3} f \lg \frac{D}{r_{\text{эк}}}. \quad (11.15)$$

При частоте $f = 50$ Гц

$$X = 0,145 \lg \frac{D}{r_{\text{эк}}}, \quad (11.16)$$

а полное сопротивление провода

$$\underline{Z} = R_{\text{п}} + j0,145 \lg \frac{D}{r_{\text{эк}}}, \quad (11.16a)$$

где $R_{\text{п}}$ – активное сопротивление провода.

Если в качестве второго провода используется земля проводимость которой равна γ , то выражение для индуктивного сопротивления провода воздушной линии, Ом/км, при частоте тока $f = 10 \div 100$ Гц имеет вид:

$$X_3 = 2,9 \cdot 10^{-3} f \cdot \lg \frac{6593}{r_{\text{ЭК}} \sqrt{f \gamma}}. \quad (11.17)$$

Это выражение можно представить как

$$X_3 = 2,9 \cdot 10^{-3} f \cdot \lg \frac{D_3}{r_{\text{ЭК}}}, \quad (11.18)$$

где D_3 (в сантиметрах) составляет

$$D_3 = \frac{6593}{\sqrt{f \gamma}}. \quad (11.19)$$

Сравнивая формулы (11.15) и (11.18), легко увидеть, что они аналогичны, только в формулу (11.18) вместо расстояния между прямым и обратным проводами входит величина D_3 , определяемая выражением (11.19).

Таким образом, индуктивное сопротивление контура провод – земля, т.е. провода, при возврате тока по земле эквивалентно индуктивному сопротивлению некоторой фиктивной двухпроводной однофазной линии, у которой расстояние между действительным и фиктивным проводами равно D_3 (рис. 11.7). Вследствие этого D_3 называют глубиной залегания фиктивного обратного провода. При частоте тока 50 Гц и погонной проводимости земли $1 \cdot 10^{-4}$ См/см значение $D_3 \approx 935$ м.

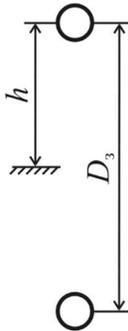


Рис. 11.7. Замена контура провод–земля двухпроводной линией

При частоте тока 50 Гц формула (11.18) имеет вид:

$$X_3 = 0,1451 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ЭК}}}. \quad (11.20)$$

Активное сопротивление контура провод – земля складывается из активного сопротивления провода $R_{\text{П}}$ и активного сопротивления

R_3 , учитывающего потери активной мощности в земле от распределенного в ней тока. Это сопротивление, Ом/км, может быть определено с помощью приближенного выражения

$$R_3 \approx \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (11.21)$$

При частоте тока 50 Гц значение $R_3 \approx 0,05$ Ом/км, поэтому полное сопротивление контура (линии) провод – земля, Ом/км, при частоте тока 50 Гц составляет

$$\underline{Z}_3 = R_{\Pi} + 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ЭК}}}. \quad (11.22)$$

Если вблизи рассматриваемой линии провод – земля имеется другая линия провод – земля, то индуктивное сопротивление каждой из них представляет собой геометрическую сумму собственного сопротивления и сопротивления взаимной индукции. Чтобы определить последнее, рассмотрим обычную двухпроводную линию. Токи в разных проводах такой линии численно равны и направлены в противоположные стороны (рис. 11.8,а). Такая линия по создаваемому ей магнитному полю и соответствующим индуктивным сопротивлениям эквивалентна двум линиям провод – земля (рис. 11.8,а), так как воображаемые обратные токи в земле компенсируют друг друга. Но каждую линию провод-земля, в свою очередь, можно заменить фиктивной двухпроводной линией, у которой обратный провод находится на расстоянии D_3 от действительного провода (рис. 11.8,б).

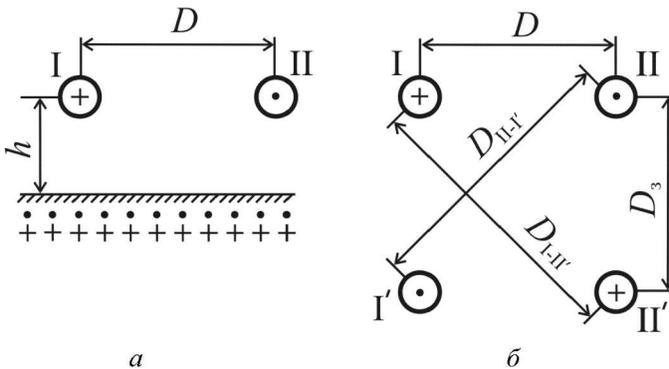


Рис. 11.8. Замена двухпроводной воздушной линии (а) двумя фиктивными двухпроводными линиями (б)

Замена двухпроводной линии I–II двумя двухпроводными линиями I–I' и II–II' позволяет рассматривать сопротивление одного провода исходной двухпроводной линии, например провода I, как геометрическую сумму собственного сопротивления провода линии I–I', определяемого по формуле (10.20), и искомого сопротивления взаимной индукции от соседней линии II–II'. Поскольку токи линий I–I' и II–II' численно равны и противоположны по знаку, то $X = X_3 - X_M$, откуда

$$X_M = X_3 - X. \quad (11.23)$$

Используя (11.20) и (11.16), найдем

$$X_M = 0,1451g \frac{D_3}{D}. \quad (11.24)$$

У трехфазной линии электропередачи расстояния между проводами разных фаз в общем случае неодинаковы. При этом из-за транспозиции проводов расстояние между проводами любой пары фаз не остается неизменным вдоль линии, так как провод каждой из фаз попеременно занимает положения 1, 2 и 3 (рис. 11.9). Чтобы в этих условиях упростить учет взаимной индукции проводников трехпроводных воздушных линий, вводят понятие среднего сопротивления взаимной индукции любой пары проводников.

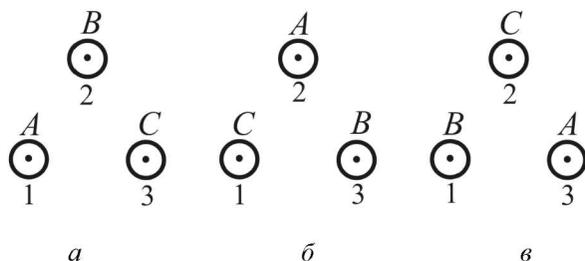


Рис. 11.9. Изменение положения проводов разных фаз при транспозиции

По аналогии с двухпроводной трехпроводную воздушную линию можно заменить тремя линиями провод – земля. Заменяя затем каждую линию провод – земля двухпроводной линией с расстоянием D_3 между действительным и соответствующим фиктивным проводом, приходим к выводу, что трехпроводная линия эквивалентна трем двухпроводным линиям.

Среднее сопротивление взаимной индукции любой пары проводов можно найти как среднее арифметическое из трех значений взаимной индукции, определяемых тремя относительными положениями про-

водов рассматриваемых двух фаз. Поэтому в соответствии с рис. 11.9 и выражением (11.24) имеем:

$$X_{\text{м}} = \frac{1}{3} \left(0,145 \lg \frac{D_3}{D_{12}} + 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{23}} + 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{31}} \right) =$$

$$= \frac{1}{3} 0,145 \lg \frac{D_3^3}{D_{12} D_{23} D_{31}} = 0,145 \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}, \quad (11.25)$$

где D_{12}, D_{23}, D_{31} – расстояния между соответствующими проводами; $\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами.

Введя обозначение

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}, \quad (11.26)$$

получим

$$X_{\text{м}} = 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}}. \quad (11.27)$$

Из (11.27) и (11.24) видно, что среднее сопротивление взаимной индукции двух проводов трехпроводной воздушной линии равно сопротивлению взаимной индукции двух линий провод – земля с расстоянием между осями проводов, равным среднему геометрическому расстоянию между проводами трехпроводной линии.

11.6. Сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов

Выражение для сопротивления нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи легко найти, используя (11.20) и (11.27). Если между каждым проводом трехфазной воздушной линии и землей приложить напряжение нулевой последовательности \dot{U}_0 , то при наличии условий для возврата тока по земле падение напряжения в каждом проводе и токи нулевой последовательности разных фаз будут связаны следующим соотношением:

$$\Delta \dot{U}_0 = X_3 \dot{I}_0 + X_{\text{м}} \dot{I}_0 + X_{\text{м}} \dot{I}_0 = (X_3 + 2X_{\text{м}}) \dot{I}_0, \quad (11.28)$$

откуда

$$X_0 = X_3 + 2X_M \quad (11.29)$$

или

$$X_0 = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк}}} + 2 \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} = 0,435 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ср}}}, \quad (11.30)$$

где $r_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_{\text{эк}} D_{\text{ср}}^2}$ – средний геометрический радиус системы из трех проводов линии.

Из (11.28) следует, что сопротивление нулевой последовательности провода одноцепной трехфазной воздушной линии численно равно напряжению, которое должно быть приложено между каждым проводом и землей для компенсации падения напряжения от токов нулевой последовательности, равных 1 А.

Чтобы иметь представление о соотношении сопротивлений нулевой и прямой последовательностей одноцепной трехфазной воздушной линии, найдем выражение для сопротивления прямой последовательности такой линии. Это сопротивление численно равно напряжению прямой последовательности, которое обеспечивает компенсацию падения напряжения в любом проводе трехфазной линии от токов прямой последовательности, равных 1 А. Поскольку трехфазную линию можно представить в виде трех линий провод – земля,

то при $\dot{I}_A = 1$, $\dot{I}_B = a^2$ и $\dot{I}_C = a$ имеем

$$\Delta \dot{U}_1 = jX_3 \dot{I}_A + jX_M \dot{I}_B + jX_M \dot{I}_C = jX_3 + jX_M a^2 + jX_M a,$$

откуда

$$X_1 = X_3 - X_M \quad (11.31)$$

или

$$X_1 = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк}}} - 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} = 0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{эк}}}. \quad (11.32)$$

Сравнивая это выражение с (11.16), нетрудно установить, что сопротивление прямой последовательности провода трехфазной воздушной линии численно равно сопротивлению провода двухпроводной линии, у которой расстояние между проводами равно среднему геометрическому расстоянию между проводами трехфазной линии.

Из (11.29) и (11.31) следует, что сопротивление нулевой последовательности трехфазной воздушной линии значительно больше сопротивления прямой последовательности, так как в отличие от магнитных потоков взаимоиндукции, вызванных токами прямой последовательности, магнитные потоки взаимоиндукции, обусловленные токами нулевой последовательности, по фазе совпадают с магнитными потоками самоиндукции, увеличивая индуктивное сопротивление проводов. В приближенных расчетах отношение индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей одноцепных трехфазных воздушных линий без заземленных молниезащитных тросов обычно принимают равным 3,5.

11.7. Сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами

Заземленные молниезащитные тросы существенно влияют на сопротивление нулевой последовательности линии. При коротком замыкании на землю в трехфазной цепи с заземленной нейтралью и заземленным на каждой опоре тросом часть тока нулевой последовательности замыкается по земле, а другая – по тросу (рис. 11.10,а), т.е.

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{30} + \dot{I}_{т0} .$$

Но в месте замыкания на землю ток равен утроенному току нулевой последовательности. Поэтому токи в тросе и в земле составляют соответственно

$$\dot{I}_т = 3\dot{I}_{т0} \quad \text{и} \quad \dot{I}_3 = 3\dot{I}_{30} .$$

Трос можно рассматривать как провод независимой однопроводной линии с возвратом тока по земле. Поэтому его сопротивление согласно (11.20)

$$X_т = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{экт}} , \quad (11.33)$$

где $r_{экт}$ – эквивалентный радиус троса.

При токе в тросе $\dot{I}_т = 3\dot{I}_{т0}$ падение напряжения на участке длиной 1 км составляет

$$\Delta \dot{U}_{т0} = 3jX_т \dot{I}_{т0} , \quad (11.34)$$

поэтому сопротивление нулевой последовательности троса

$$X_{\tau 0} = 3X_{\tau} = 0,4351g \frac{D_3}{r_{\text{экт}}}. \quad (11.35)$$

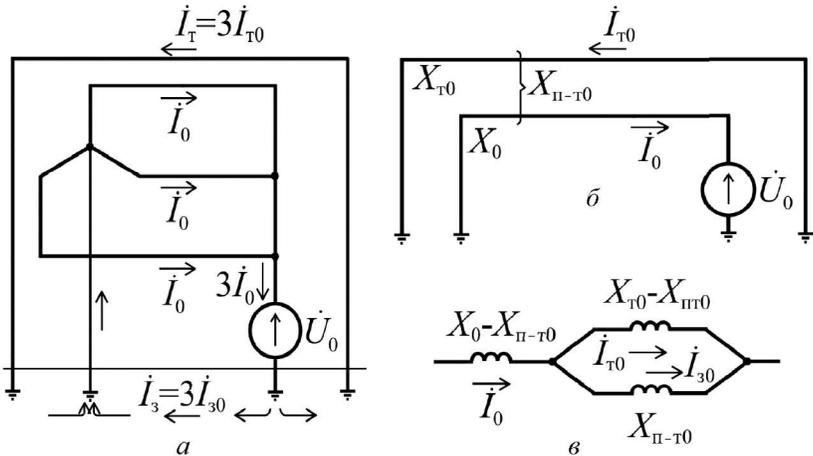


Рис. 11.10. Однофазная воздушная линия с заземленным тросом:

- а* – исходная схема; *б* – однолинейная схема с электромагнитной связью; *в* – схема замещения нулевой последовательности

Сопротивление взаимоиндукции между проводом любой фазы и тросом, учитывая транспозицию проводов линии, можно определить как среднее арифметическое из сопротивлений взаимоиндукции, получаемых при различных положениях провода этой фазы относительно троса, т.е.

$$X_{\pi-т} = \frac{1}{3}(X_{1т} + X_{2т} + X_{3т}).$$

С учетом (11.24)

$$X_{\pi-т} = \frac{1}{3} \left(3 \cdot 0,1451g \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{1т} D_{2т} D_{3т}}} \right) = 0,1451g \frac{D_3}{D_{\pi-т}}, \quad (11.36)$$

где $D_{\pi-т} = \sqrt[3]{D_{1т} D_{2т} D_{3т}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами линии и тросом.

Падение напряжения в тросе от токов нулевой последовательности проводов линии

$$\Delta \dot{U}_{\tau 0} = jX_{\pi-т} \dot{I}_0 + jX_{\pi-т} \dot{I}_0 + jX_{\pi-т} \dot{I}_0 = (3jX_{\pi-т}) \dot{I}_0, \quad (11.37)$$

поэтому сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между проводами линии и тросом

$$X_{\text{п-т}0} = 3X_{\text{п-т}} = 0,435 \lg \frac{D_3}{D_{\text{п-т}}}. \quad (11.38)$$

Чтобы определить эквивалентное сопротивление нулевой последовательности линии с учетом заземленного троса, необходимо от схемы с электромагнитной связью (рис. 11.10,б) перейти к схеме замещения. В соответствии с рис. 11.10,б падение напряжения в проводе (на единицу длины)

$$\Delta \dot{U}_0 = jX_0 \dot{I}_0 - jX_{\text{п-т}0} \dot{I}_{\text{т}0}, \quad (11.39)$$

а разность потенциалов между двумя любыми точками вдоль троса, у которого концы заземлены, равна нулю, т.е.

$$jX_{\text{т}0} \dot{I}_{\text{т}0} - jX_{\text{п-т}0} \dot{I}_0 = 0. \quad (11.40)$$

Из (11.40) следует

$$\dot{I}_{\text{т}0} = \frac{X_{\text{п-т}0}}{X_{\text{т}0}} \dot{I}_0. \quad (11.41)$$

Подставив это выражение в (11.39), получим

$$\Delta \dot{U}_0 = j \left(X_0 - \frac{X_{\text{п-т}0}^2}{X_{\text{т}0}} \right) \dot{I}_0,$$

откуда искомое сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи с учетом заземленного троса

$$X_0^{(\tau)} = X_0 - \frac{X_{\text{п-т}0}^2}{X_{\text{т}0}}. \quad (11.42)$$

Это выражение показывает, что заземленные тросы снижают сопротивление нулевой последовательности воздушных линий электропередачи. Если в (10.42) X_0 и $X_{\text{т}0}$ представить соответственно как $(X_0 - X_{\text{п-т}0}) + X_{\text{п-т}0}$ и $(X_{\text{т}0} - X_{\text{п-т}0}) + X_{\text{п-т}0}$, то после некоторых преобразований это выражение принимает вид:

$$X_0^{(\tau)} = X_0 - X_{\text{п-т}0} + \frac{(X_{\text{т}0} - X_{\text{п-т}0})X_{\text{п-т}0}}{(X_{\text{т}0} - X_{\text{п-т}0}) + X_{\text{п-т}0}}. \quad (11.43)$$

Полученному выражению соответствует схема замещения, представленная на рис. 11.10,в. Ветвь с сопротивлением $X_{\text{п-т}0}$ опре-

деляет часть тока нулевой последовательности, замыкающегося по земле, а ветвь с сопротивлением $X_{т0} - X_{п-т0}$ – часть тока, замыкающегося по тросу. Сопротивления $X_0 - X_{п-т0}$ и $X_{т0} - X_{п-т0}$ представляют собой сопротивления рассеяния нулевой последовательности провода и троса. Эти сопротивления составляют

$$X_{\sigma 0} = X_0 - X_{п-т0} = 0,435 \lg \frac{D_{п-т}}{r_{ср}}; \quad (11.44)$$

$$X_{\sigma т0} = X_{т0} - X_{п-т0} = 0,435 \lg \frac{D_{п-т}}{r_{эк т}}. \quad (11.45)$$

Из схемы замещения линии с тросом (рис. 11.10,б) и выражения (11.45) видно, что уменьшение сопротивления нулевой последовательности воздушной линии электропередачи, обусловленное заземленным тросом, тем значительнее, чем меньше расстояние между тросом и проводами, так как с уменьшением последнего увеличивается ЭДС взаимной индукции, наводимая в тросе магнитными потоками от токов проводов, и соответственно увеличивается ток в тросе.

В приближенных практических расчетах для одноцепных воздушных линий с заземленными тросами обычно принимают следующие средние значения отношения индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей: для линий со стальными тросами, заземленными на каждой опоре, $X_0 / X_1 = 3$, а с тросами, выполненными из хорошо проводящих материалов, $X_0 / X_1 = 2$.

11.8. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной воздушной линии в случае одинакового направления токов нулевой последовательности в обеих цепях больше, чем при отсутствии другой цепи, что является следствием влияния взаимной индукции между цепями. Влияние взаимной индукции проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между цепями. Наиболее сильно ее влияние проявляется при закреплении проводов обеих цепей на общих опорах, а при расстоянии между цепями 400 – 500 м увеличение сопротивления нулевой последовательности каждой цепи из-за влияния взаимной индукции параллельной цепи не превышает 10%.

Среднее сопротивление взаимной индукции между двумя проводами одноименной фазы разных цепей, учитывая транспозицию проводов обеих цепей, можно определить как среднее арифметическое из девяти значений сопротивления взаимной индукции, определяемых возможными относительными положениями проводов рассматриваемой фазы разных цепей. Поэтому в соответствии с (11.24)

$$X_{I-II} = \frac{1}{9} \left(0,145 \lg \frac{D_3}{D_{11'}} + 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{12'}} + \dots \right) = 0,145 \lg \frac{D_3}{D_{I-II}}, \quad (11.46)$$

где $D_{I-II} = \sqrt[9]{D_{11'} D_{12'} D_{13'} D_{21'} D_{22'} D_{23'} D_{31'} D_{32'} D_{33'}}$ – среднее геометрическое расстояние между цепями I и II, $D_{11'}$ – расстояние между проводом 1 цепи I и проводом 1' цепи II, $D_{12'}$ – расстояние между проводом 1 цепи I и проводом 2' цепи II и т.д.

Сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности одной цепи от второй (т.е. между проводом одной цепи и тремя проводами другой цепи) численно равно падению напряжения в проводе одной из цепей (отнесенное к единице длины линии) при токе нулевой последовательности в каждом из проводов второй цепи, равном 1 А. Таким образом, при определении этого сопротивления следует исходить из трех совпадающих по фазе токов в 1 А, поэтому

$$X_{I-II0} = 3X_{I-II} = 0,435 \lg \frac{D_3}{D_{I-II}}. \quad (11.47)$$

Чтобы получить схему замещения нулевой последовательности двухцепной линии в общем виде, допустим, что цепи I и II этой линии соединены между собой только на одном конце (рис. 11.11,а) и имеют неодинаковые сопротивления нулевой последовательности X_{I0} и X_{II0} . Эти сопротивления определяются по формуле (11.30), а сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности X_{I-II0} – по формуле (11.47).

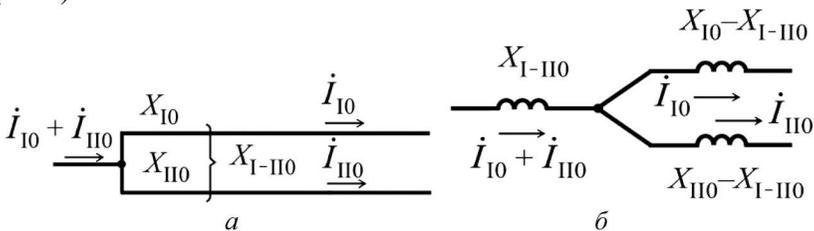


Рис. 11.11. Двухцепная воздушная линия без заземленных тросов:
 а – однолинейная схема с электромагнитной связью;
 б – схема замещения нулевой последовательности

При токах нулевой последовательности в цепях I и II соответственно \dot{I}_{I0} и \dot{I}_{II0} падения напряжения на единицу длины этих цепей составляют

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= jX_{I0} \dot{I}_{I0} + jX_{I-II0} \dot{I}_{II0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= jX_{II0} \dot{I}_{II0} + jX_{I-II0} \dot{I}_{I0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.48)$$

Эти выражения можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= jX_{I-II0}(\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0}) + j(X_{I0} - X_{I-II0})\dot{I}_{I0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= jX_{I-II0}(\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0}) + j(X_{II0} - X_{I-II0})\dot{I}_{II0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.49)$$

Полученным выражениям соответствует эквивалентная схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии, представленная на рис. 11.11,б. Сопротивления $X_{I0} - X_{I-II0}$ и $X_{II0} - X_{I-II0}$ обусловлены магнитными потоками, созданными соот-

ветственно токами \dot{I}_{I0} и \dot{I}_{II0} и сцепленными только с проводами своей цепи. Таким образом, эти магнитные потоки являются потоками рассеяния нулевой последовательности каждой из цепей по отношению к другой. В соответствии с (11.30) и (11.47)

$$\left. \begin{aligned} X_{\sigma I0} &= X_{I0} - X_{I-II0} = 0,435 \lg \frac{D_{I-II}}{r_{срI}}; \\ X_{\sigma II0} &= X_{II0} - X_{I-II0} = 0,435 \lg \frac{D_{I-II}}{r_{срII}}. \end{aligned} \right\} \quad (11.50)$$

Если цепи I и II идентичны, т.е. $X_{I0} = X_{II0} = X_0$ и соединены между собой на обоих концах, а расчетная точка короткого замыкания находится на одной из цепей (рис. 11.12,а), то участки этой двухцепной линии, находящиеся с разных сторон от точки короткого замыкания, можно представить схемами замещения, аналогичными схеме на рис. 11.11,б. При этом сопротивления лучей схем замещения отдельных участков должны соответствовать длинам этих участков. Поскольку участки соединены между собой, то полная схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии при коротком замыкании на одной из них имеет вид, как показано на рис. 11.12,б, где n – относительная длина части линии, находящейся слева от точки короткого замыкания.

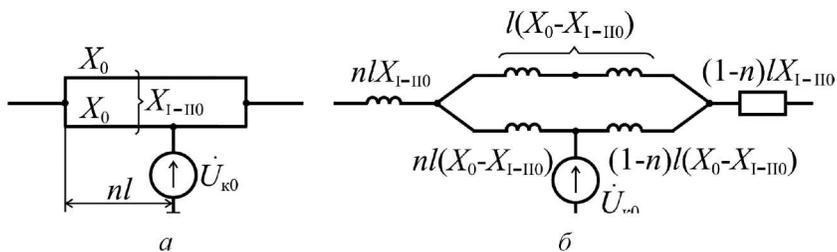


Рис. 11.12. Двухцепная воздушная линия при коротком замыкании на одной из ее цепей:

a – однолинейная схема с электромагнитной связью;

б – схема замещения нулевой последовательности

В тех случаях, когда короткое замыкание происходит вне линии, эквивалентное сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии (т.е. сопротивление проводов одноименной фазы двух параллельных цепей)

$$X_0'' = X_{1-\Pi 0} + 0,5(X_0 - X_{1-\Pi 0}) = 0,5(X_0 + X_{1-\Pi 0})$$

и сопротивление нулевой последовательности одной цепи с учетом влияния другой

$$X_0' = X_0 + X_{1-\Pi 0}. \quad (11.51)$$

При приближенных расчетах несимметричных режимов отношение индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей двухцепных линий без заземленных тросов обычно принимают равным $X_0/X_1 = 5,5$.

11.9. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами

Двухцепную воздушную линию электропередачи с заземленными тросами следует рассматривать как три магнитно-связанные системы проводов: систему проводов одной цепи, систему проводов другой цепи и систему тросов (рис. 11.13,а). Используя полученные выше формулы, можно определить сопротивления нулевой последо-

вательности отдельных систем, т.е. X_{I0} , X_{II0} и X_{T0} , а также сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности между проводами каждой пары систем, т.е. X_{I-II0} , X_{I-T0} и X_{II-T0} .

При показанных на рис. 11.13,б положительных направлениях токов нулевой последовательности в проводах разных цепей и тросах справедливы соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= jX_{I0} \dot{I}_{I0} + jX_{I-II0} \dot{I}_{II0} - jX_{I-T0} \dot{I}_{T0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= jX_{II0} \dot{I}_{II0} + jX_{I-II0} \dot{I}_{I0} - jX_{II-T0} \dot{I}_{T0}; \\ 0 &= jX_{T0} \dot{I}_{T0} - jX_{I-T0} \dot{I}_{I0} - jX_{II-T0} \dot{I}_{II0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.52)$$

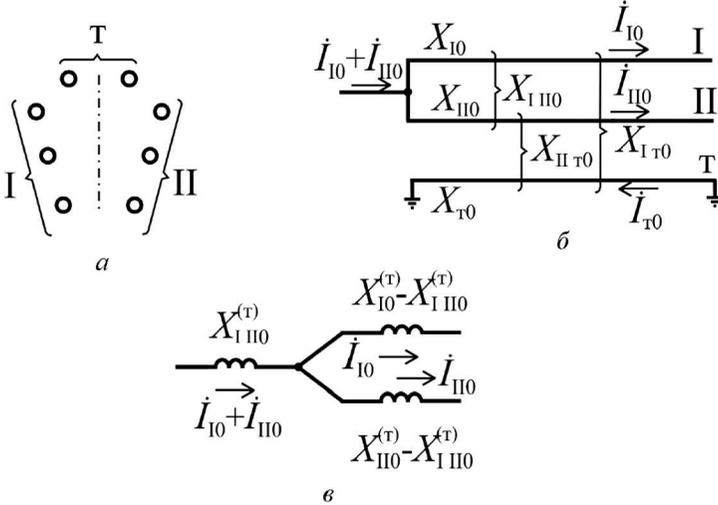


Рис. 11.13. Двухцепная воздушная линия с заземленными тросами:
а – один из возможных вариантов расположения проводов и тросов;
б – однолинейная схема с электромагнитной связью;
в – схема замещения нулевой последовательности

Если, используя последнее выражение, исключить из первых двух уравнений ток I_{T0} , то получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= jX_{I0}^{(n)} \dot{I}_{I0} + jX_{I-II0}^{(n)} \dot{I}_{II0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= jX_{II0}^{(n)} \dot{I}_{II0} + jX_{I-II0}^{(n)} \dot{I}_{I0}. \end{aligned} \right\} \quad (11.53)$$

где $X_{I0}^{(\tau)} = X_{I0} - \frac{X_{I-\tau 0}^2}{X_{\tau 0}}$ – сопротивление нулевой последовательности цепи I с учетом влияния системы тросов;

$$X_{II0}^{(\tau)} = X_{II0} - \frac{X_{II-\tau 0}^2}{X_{\tau 0}} \text{ – сопротивление нулевой последовательности цепи II с учетом влияния системы тросов;}$$

$X_{I-II0}^{(\tau)} = X_{I-II0} - \frac{X_{I-\tau 0} X_{II-\tau 0}}{X_{\tau 0}}$ – сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности одной цепи от другой с учетом влияния системы тросов.

Уравнения (11.53) аналогичны уравнениям (11.48) для двухцепной линии без тросов. Поэтому схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии с тросами (рис. 11.13, в) имеет такой же вид, как и двухцепной линии без тросов. Роль тросов сводится лишь к уменьшению значений всех параметров схемы замещения.

Если обе цепи одинаковы и симметрично расположены относительно тросов, т.е. $X_{I0} = X_{II0} = X_0$ и $X_{I-\tau 0} = X_{II-\tau 0} = X_{\tau 0}$, причем эти цепи соединены между собой по обоим концам линии, а короткое замыкания происходит вне линии, то эквивалентное сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии с тросами составляет

$$\begin{aligned} X''_0^{(\tau)} &= X_{I-II0}^{(\tau)} + 0,5 \left(X_0^{(\tau)} - X_{I-II0}^{(\tau)} \right) = \\ &= 0,5 \left(X_0 + X_{I-II0} - 2 \frac{X_{\tau 0}^2}{X_{\tau 0}} \right) \end{aligned} \quad (11.54)$$

и сопротивление нулевой последовательности каждой из цепей такой линии

$$X'_0^{(\tau)} = X_0 + X_{I-II0} - 2 \frac{X_{\tau 0}^2}{X_{\tau 0}}. \quad (11.55)$$

В приближенных расчетах отношение индуктивных сопротивлений нулевой и прямой последовательностей двухцепных линий с заземленными стальными тросами обычно принимают равным $X_0/X_1 \approx 4,7$, а с хорошо проводящими тросами $X_0/X_1 \approx 3$.

11.10. Сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей

Кабели могут быть проложены как выше, так и ниже поверхности земли. В последнем случае распределение обратного тока в земле несколько отличается от того, которое имеет место при расположении кабеля над поверхностью земли. Однако это отличие невелико и для определения параметров нулевой последовательности кабелей независимо от способа их прокладки могут быть использованы выражения, полученные ранее для воздушных линий электропередачи.

Обычно кабели имеют проводящую оболочку, которую заземляют на концах кабелей и в некоторых промежуточных точках. При замыкании токоведущей жилы такого кабеля на оболочку обратным проводом для токов нулевой последовательности служат как сама оболочка, так и земля. Но между контуром жилы – земля и контуром оболочки – земля имеется взаимоиנדукция. Таким образом, кабель с заземленной оболочкой подобен воздушной линии с заземленным тросом. Поэтому для определения параметров нулевой последовательности такого кабеля используют соответствующие формулы и эквивалентную схему замещения для упомянутой воздушной линии. В частности, сопротивление самоиндукции нулевой последовательности жил кабеля находят по формуле (11.30). При этом средний геометрический радиус системы из трех жил кабеля определяют по формуле

$$r_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_{\text{эк}} d^2}, \quad (11.56)$$

где $r_{\text{эк}}$ – эквивалентный радиус жилы; d – расстояние между центрами сечений жил.

Среднее геометрическое расстояние между жилами кабеля и оболочкой примерно равно полусумме внутреннего $r_{\text{вт}}$ и внешнего $r_{\text{вн}}$ радиусов оболочки, т.е.

$$D_{\text{ж-об}} = \frac{r_{\text{вт}} + r_{\text{вн}}}{2},$$

поэтому, в соответствии с (11.38), сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности между жилами и оболочкой кабеля

$$X_{\text{ж-об}0} = 0,435 \lg \frac{2D_3}{r_{\text{вт}} + r_{\text{вн}}}. \quad (11.57)$$

В отличие от троса воздушной линии оболочка кабеля охватывает все его жилы. При этом магнитный поток, создаваемый токами оболочки, целиком является потоком взаимоиндукции. Поэтому сопротивление самоиндукции нулевой последовательности оболочки и сопротивление взаимоиндукции нулевой последовательности между оболочкой и жилами кабеля равны друг другу, т.е. оболочка кабеля не имеет рассеяния.

Распределение тока нулевой последовательности между оболочкой кабеля и землей и соответственно полное сопротивление нулевой последовательности кабеля в значительной мере зависит от активного сопротивления заземлений оболочки, хотя при изменении этого сопротивления модуль полного сопротивления нулевой последовательности кабеля остается почти постоянным и изменяется лишь соотношение между активной и индуктивной составляющими полного сопротивления. Если сопротивление заземлений невелико и им можно пренебречь, то ток в земле достигает наибольшего значения. Этому случаю соответствует схема замещения нулевой последовательности кабеля, представленная на рис. 11.14. Она отличается от схемы замещения нулевой последовательности воздушной линии с заземленным тросом (см. рис. 11.10) тем, что в соответствующие ветви введены активные сопротивления жилы $R_{ж}$, оболочки ($3R_{об}$) и земли ($3R_3$), так как в противном случае нарушается действительная картина распределения обратных токов между оболочкой кабеля и землей. Индуктивное сопротивление ветви, соответствующей жиле кабеля,

$$X_{\sigma 0} = X_{ж0} - X_{ж-об0} = 0,4351g \frac{D_3}{r_{cp}} - 0,4351g \frac{2D_3}{r_{вт} + r_{вш}} = 0,4351g \frac{r_{вт} + r_{вш}}{2r_{cp}}. \quad (11.58)$$

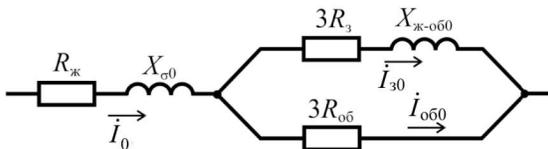


Рис. 11.14. Схема замещения нулевой последовательности трехжильного кабеля

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности кабеля X_0 можно найти как мнимую часть его полного сопротивления нулевой последовательности, определенного в соответствии со схемой замещения рис. 11.14.

Если же сопротивление заземлений оболочки велико, то весь ток нулевой последовательности возвращается только по оболочке. В этом случае в эквивалентной схеме замещения нулевой последовательности кабеля должна быть разомкнута ветвь, соответствующая земле. При этом значение индуктивной составляющей сопротивления нулевой последовательности кабеля оказывается наименьшим.

Действительное значение сопротивления нулевой последовательности кабелей, имеющих проводящую оболочку, находится между его значениями в указанных предельных случаях. В приближенных расчетах для трехжильных кабелей принимают $R_0 \approx 10R_1$ и $X_0 \approx (3,5 \dots 4,5)X_1$.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ТЕРМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПРОВОДНИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

12.1. Способы оценки термического воздействия токов короткого замыкания

Короткие замыкания в электроустановках сопровождаются быстрым повышением температуры проводников и токопроводящих частей электрических аппаратов. При этом температура может достигать опасных значений, превышающих значения наибольших допустимых температур. Последние устанавливаются с учетом допустимого снижения механических свойств проводниковых материалов и соответственно их временного сопротивления разрыву, изолирующих свойств изоляционных материалов и пробивного напряжения изоляции, надежности работы контактных систем вследствие их интенсивного окисления. Продолжительное воздействие повышенной температуры на изоляцию приводит к ее плавлению или обугливанию.

Процесс нагрева проводников под воздействием тока короткого замыкания обычно считают адиабатическим, если продолжительность короткого замыкания не превышает 1 с. При небыстродействующих автоматических повторных включениях (АПВ) и продолжительности короткого замыкания более 1 с необходимо учитывать теплоотдачу в окружающую среду.

В качестве величины, характеризующей степень термического воздействия тока короткого замыкания на проводники и электрические аппараты, в отечественной практике применяется интеграл Джоуля, который определяется выражением:

$$B_{\text{к}} = \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{к}}^2(t) dt, \quad (12.1)$$

где $i_{\text{к}}$ – ток короткого замыкания в произвольный момент времени t , А; $t_{\text{откл}}$ – расчетная продолжительность короткого замыкания, с.

В международной практике для количественной оценки степени термического воздействия тока короткого замыкания часто используют другую величину – термически эквивалентный ток короткого замыкания $I_{\text{тер.эк}}$ [в стандарте Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) указано, что для оценки термического воздействия тока короткого замыкания при проверке на термическую стойкость проводников и электрических аппаратов можно применять как термически эквивалентный ток короткого замыкания, так и интеграл Джоуля, хотя изложена только методика определения первого], под которым понимают неизменный по амплитуде (т.е. синусоидальный) ток, который за время, равное расчетной продолжительности короткого замыкания, оказывает на проводник или электрический аппарат такое же термическое воздействие, как и реальный ток короткого замыкания за это же время. В соответствии с (12.1) и определением термически эквивалентного тока короткого замыкания интеграл Джоуля и термически эквивалентный ток короткого замыкания связаны простым соотношением:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{тер.эк}}^2 t_{\text{откл}}, \quad (12.2)$$

откуда

$$I_{\text{тер.эк}} = \sqrt{\frac{B_{\text{к}}}{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.3)$$

Таким образом, оба способа количественной оценки степени термического воздействия тока короткого замыкания на проводники и электрические аппараты основаны на одном и том же физическом представлении процесса нагрева проводников и контактов электрических аппаратов при коротких замыканиях.

12.2. Методы расчета интеграла Джоуля и термически эквивалентного тока короткого замыкания

Интеграл Джоуля допускается определять приближенно как сумму интегралов от периодической и аperiodической составляющих тока короткого замыкания, т.е.

$$B_{\text{к}} = B_{\text{к.п}} + B_{\text{к.а}} = \int_0^{t_{\text{откл}}} I_{\text{п}}^2(t) dt + \int_0^{t_{\text{откл}}} i_{\text{а}}^2(t) dt, \quad (12.4)$$

где $B_{\text{к.п}}$ – интеграл Джоуля от периодической составляющей тока короткого замыкания; $B_{\text{к.а}}$ – интеграл Джоуля от аperiodической составляющей тока короткого замыкания.

Интеграл Джоуля (и соответственно термически эквивалентный ток короткого замыкания) является сложной функцией параметров источников энергии (генераторов, синхронных компенсаторов, электродвигателей), конфигурации исходной расчетной схемы, положения расчетной точки короткого замыкания относительно источников энергии, ее удаленности от последних и других факторов. Поэтому рекомендуемая методика аналитических расчетов интеграла Джоуля (термически эквивалентного тока короткого замыкания) предусматривает учет особенностей расчетной схемы.

Предварительно по исходной расчетной схеме составляют эквивалентную схему замещения, в которой, как и при расчете начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания, все синхронные и асинхронные машины представляют сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС, приведенными к базисной ступени напряжения или выраженными в относительных единицах при выбранных базисных условиях. Затем эту схему преобразуют в простейшую схему, вид которой зависит от исходных условий, т.е. от наличия или отсутствия вблизи расчетной точки короткого замыкания отдельного источника энергии и его вида (см. ниже). Наконец, в зависимости от полученной простейшей схемы по одной из приведенных ниже формул определяют интеграл Джоуля или термически эквивалентный ток короткого замыкания.

Если исходная расчетная схема имеет произвольную конфигурацию, но для всех генераторов (синхронных компенсаторов, синхронных и асинхронных электродвигателей) расчетное короткое замыкание является удаленным, т.е. отношение действующего значения периодической составляющей тока любого генератора в начальный момент короткого замыкания к его номинальному току не достигает 2, то путем преобразований эквивалентной схемы замещения все генераторы и источники энергии более удаленной части электроэнергетической системы заменяют одним эквивалентным источником, ЭДС E_{GS} которого считают неизменной по амплитуде, а индуктивное сопротивление равным эквивалентному сопротивлению X_{GS} расчетной схемы (см. рис. 12.1, а). При этом интеграл Джоуля определяется по формуле

$$B_k = I_{пGS}^2 \left[t_{откл} + T_{а.эК} \left(1 - e^{-\frac{2t_{откл}}{T_{а.эК}}} \right) \right], \quad (12.5)$$

где $I_{пGS}$ – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от эквивалентного источника энергии (системы); $T_{а.эК}$ – эквивалентная постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания.

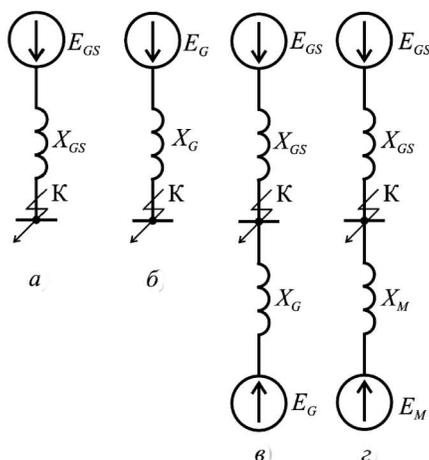


Рис. 12.1. Простейшие схемы замещения (а – г), соответствующие исходным расчетным схемам

Термически эквивалентный ток короткого замыкания в рассматриваемом случае составляет

$$I_{\text{тер.эк}} = I_{\text{пГС}} \sqrt{1 + \frac{T_{\text{а.эк}}}{t_{\text{откл}}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{а.эк}}}} \right)}. \quad (12.6)$$

В тех случаях, когда $t_{\text{откл}} \geq 3T_{\text{а.эк}}$, интеграл Джоуля и термически эквивалентный ток короткого замыкания можно определять по более простым формулам:

$$B_{\text{к}} = I_{\text{пГС}}^2 (t_{\text{откл}} + T_{\text{а.эк}}); \quad (12.7)$$

$$I_{\text{тер.эк}} = I_{\text{пГС}} \sqrt{1 + \frac{T_{\text{а.эк}}}{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.8)$$

Если исходная расчетная схема содержит один или несколько однотипных генераторов (синхронных компенсаторов), причем последние находятся в одинаковых условиях относительно расчетной точки короткого замыкания (все машины или блоки присоединены к общим шинам), а расчетное короткое замыкание для всех машин является близким, т.е. действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания превышает их номинальный ток в 2 раза и более, то исходную схему замещения также преобразуют в простейшую схему, содержащую эквивалентное сопротивление X_G и эквивалентную ЭДС E_G (рис. 12.1, б); причем амплитуда этой ЭДС изменяется во времени.

В этом случае интеграл Джоуля определяют по формуле

$$B_{\kappa} = I_{\text{п0G}}^2 \left[B_{* \text{кG}} t_{\text{откл}} + T_{\text{аG}} \left(1 - e^{-\frac{2t}{T_{\text{аG}}}} \right) \right], \quad (12.9)$$

где $I_{\text{п0G}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (генераторов, синхронных компенсаторов) в начальный момент короткого замыкания; $T_{\text{аG}}$ – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания; $B_{* \text{кG}}$ – относительный интеграл Джоуля.

Относительный интеграл Джоуля вычисляют по формуле

$$B_{* \text{кG}} = \frac{\int_0^{t_{\text{откл}}} I_{\text{птG}}^2(t) dt}{I_{\text{п0G}}^2 t_{\text{откл}}}, \quad (12.10)$$

где $I_{\text{птG}}$ – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от генератора (генераторов, синхронных компенсаторов) в произвольный момент времени.

Значения относительного интеграла Джоуля при разных удалениях расчетной точки короткого замыкания от генератора (синхронного компенсатора), т.е. разных отношениях действующего значения периодической составляющей тока машины в начальный момент короткого замыкания к ее номинальному току, могут быть определены по кривым на рис. 12.2 – 12.4 в зависимости от системы возбуждения генераторов.

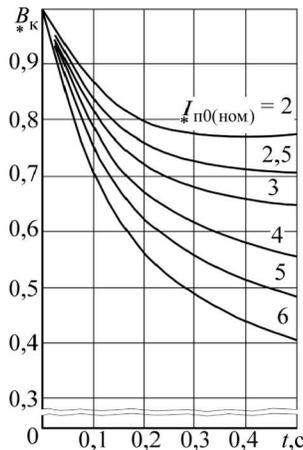


Рис. 12.2. Кривые для определения $B_{* \text{кG}}$ от синхронных генераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

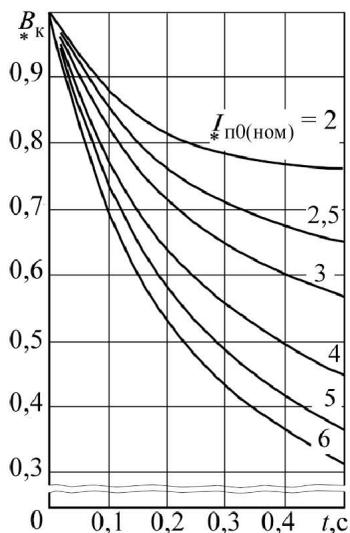


Рис. 12.3. Кривые для определения $B_{*кГ}$ от синхронных генераторов с тиристорной системой самовозбуждения

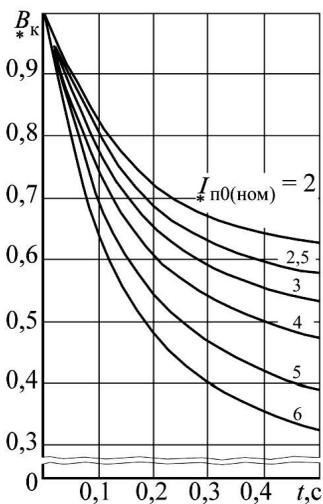


Рис.12.4. Кривые для определения $B_{*кГ}$ от синхронных генераторов с диодной бесщеточной системой самовозбуждения

В рассматриваемом случае термически эквивалентный ток короткого замыкания определяют по формуле

$$I_{\text{тер.эк}} = I_{\text{п0G}} \sqrt{B_{* \text{кG}} + \frac{T_{\text{аG}}}{t_{\text{откл}}}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{аG}}}} \right). \quad (12.11)$$

При $t_{\text{откл}} > 3T_{\text{аG}}$ для определения интеграла Джоуля и термически эквивалентного тока короткого замыкания допустимо использовать упрощенные формулы

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п0G}}^2 \left(B_{* \text{кG}} t_{\text{откл}} + T_{\text{аG}} \right); \quad (12.12)$$

$$I_{\text{тер.эк}} = I_{\text{п0G}} \sqrt{B_{* \text{кG}} + \frac{T_{\text{аG}}}{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.13)$$

Если исходная расчетная схема содержит различные источники энергии, а расчетное короткое замыкание делит схему на две независимые части, одна из которых содержит источники энергии, для которых короткое замыкание является удаленным, а другая – один или несколько генераторов (синхронных компенсаторов), находящихся в одинаковых условиях относительно точки короткого замыкания и связанных с точкой короткого замыкания по радиальной схеме, причем для этой машины или группы машин расчетное короткое замыкание является близким, то эквивалентную схему замещения преобразуют в двухлучевую (см. рис. 12.1, в): все источники энергии, для которых короткое замыкание является удаленным, и связывающие их с точкой короткого замыкания элементы представляют в виде одной ветви с неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС E_{GS} и эквивалентным сопротивлением X_{GS} , а машина или группа машин, для которой короткое замыкание является близким, – в виде другой ветви с изменяющейся во времени ЭДС E_G и соответствующим эквивалентным сопротивлением X_G .

В этом случае интеграл Джоуля определяют по формуле

$$\begin{aligned} B_{\text{к}} = & \left(I_{\text{пGS}}^2 + 2I_{\text{пGS}} I_{\text{п0G}} Q_{* \text{кG}} + I_{\text{п0G}}^2 B_{* \text{кG}} \right) t_{\text{откл}} + \\ & + I_{\text{пGS}}^2 T_{\text{а.эк}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{а.эк}}}} \right) + I_{\text{п0G}}^2 T_{\text{аG}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{аG}}}} \right) + \\ & + \frac{4I_{\text{пGS}} I_{\text{п0G}} T_{\text{а.эк}} T_{\text{аG}}}{T_{\text{а.эк}} + T_{\text{аG}}} \left[1 - e^{-\frac{t_{\text{откл}} (T_{\text{а.эк}} + T_{\text{аG}})}{T_{\text{а.эк}} T_{\text{аG}}}} \right], \end{aligned} \quad (12.14)$$

где $Q_{*кГ}$ – относительный интеграл от периодической составляющей тока в месте короткого замыкания, обусловленного действием генератора (синхронного компенсатора):

$$Q_{*кГ} = \frac{\int_0^{t_{откл}} I_{птГ}(t) dt}{I_{п0Г} t_{откл}}. \quad (12.15)$$

Значение относительного интеграла $Q_{*кГ}$ при найденной удаленности точки короткого замыкания можно определить по кривым $Q_{*кГ} = f(t_{откл})$. Такие кривые для синхронных генераторов с разными системами возбуждения приведены на рис. 12.5 – 12.7.

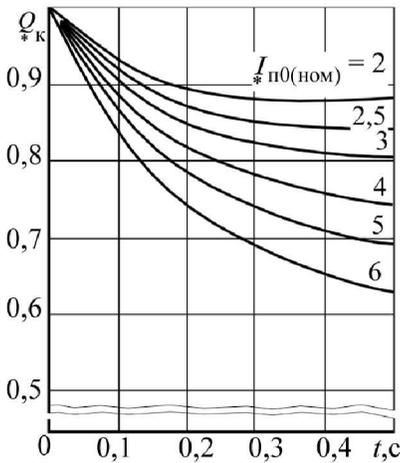


Рис. 12.5. Кривые для определения $Q_{*кГ}$ от синхронных генераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

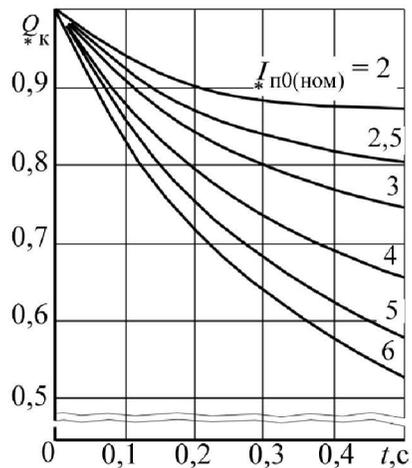


Рис. 12.6. Кривые для определения $Q_{*кГ}$ от синхронных генераторов с тиристорной системой самовозбуждения

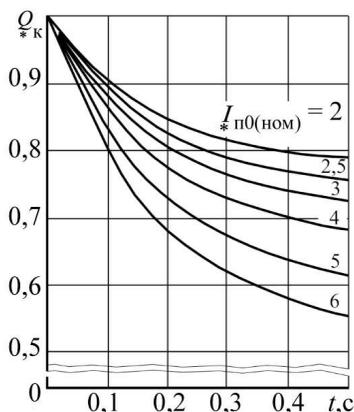


Рис. 12.7. Кривые для определения $Q_{*кГ}$ от синхронных генераторов с диодной бесщеточной системой самовозбуждения

В тех случаях, когда $3T_{аГ} > t_{откл} \geq 3T_{а.эж}$, для определения интеграла Джоуля допустимо использовать более простое выражение

$$B_{к} = \left(I_{пGS}^2 + 2I_{пGS}I_{п0G}Q_{*кГ} + I_{п0G}^2 B_{*кГ} \right) t_{откл} + \\ + I_{пGS}^2 T_{а.эж} + I_{п0G}^2 T_{аГ} \left(1 - e^{-\frac{2t_{откл}}{T_{аГ}}} \right) + \frac{4I_{пGS}I_{п0G}T_{а.эж}T_{аГ}}{T_{а.эж} + T_{аГ}}. \quad (12.16)$$

Если же $t_{откл} > 3T_{аГ}$, то можно использовать формулу

$$B_{к} = \left(I_{пGS}^2 + 2I_{пGS}I_{п0G}Q_{*кГ} + I_{п0G}^2 B_{*кГ} \right) t_{откл} + \\ + I_{пGS}^2 T_{а.эж} + I_{п0G}^2 T_{аГ} + \frac{4I_{пGS}I_{п0G}T_{а.эж}T_{аГ}}{T_{а.эж} + T_{аГ}}. \quad (12.17)$$

При рассматриваемой расчетной схеме термически эквивалентный ток короткого замыкания следует определять по формуле (12.3), подставив в нее предварительно найденное значение $B_{к}$.

Если исходная расчетная схема содержит различные источники энергии, а расчетное короткое замыкание делит схему на две независимые части, одна из которых содержит источники энергии, для которых короткое замыкание является удаленным, а другая – группу однотипных электродвигателей (синхронных или асинхронных), для которых короткое замыкание является близким, то

эквивалентную схему замещения также преобразуют в двухлучевую (рис. 12.1, *з*). При этом все источники энергии, для которых короткое замыкание является удаленным, и связывающие их с точкой короткого замыкания элементы представляют неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС E_{GS} и эквивалентным сопротивлением X_{GS} , а группу электродвигателей – эквивалентной ЭДС E_M и эквивалентным сопротивлением X_M .

В этом случае интеграл Джоуля в зависимости от соотношения постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока электродвигателя T_{aM} , расчетной продолжительности короткого замыкания $t_{откл}$ и эквивалентной постоянной времени $T_{a.эК}$ определяют по одной из формул – (12.14), (12.16) или (12.17), предварительно заменив в ней $I_{п0G}$ и T_{aG} соответствующими величинами $I_{п0M}$ и T_{aM} для эквивалентного электродвигателя, а также $B_{*кG}$ и $Q_{*кG}$ – относительными интегралами $B_{*кM}$ и $Q_{*кM}$ эквивалентного электродвигателя. Кривые зависимости $B_{*кM} = f(t_{откл})$ и $Q_{*кM} = f(t_{откл})$ для синхронных и асинхронных электродвигателей при разных отношениях действующего значения периодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя в начальный момент короткого замыкания к его номинальному току приведены на рис. 12.8 – 12.11.

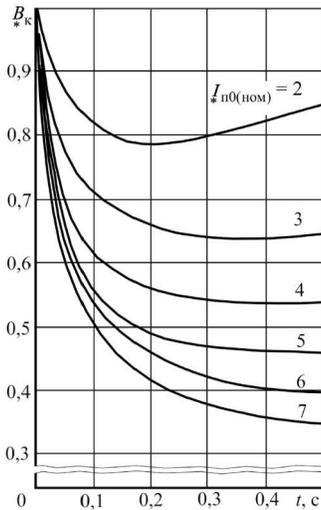


Рис. 12.8. Кривые для определения $B_{*кM}$ от синхронного электродвигателя

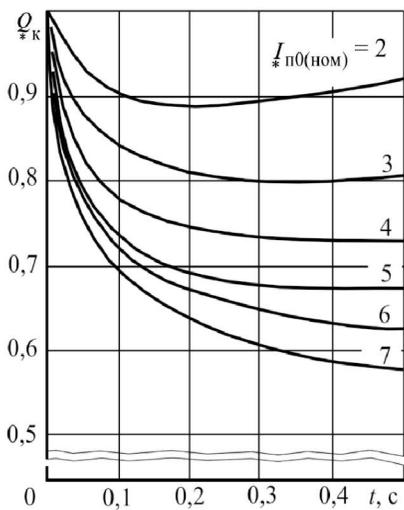


Рис. 12.9. Кривые для определения $Q_{*кМ}$ от синхронного электродвигателя

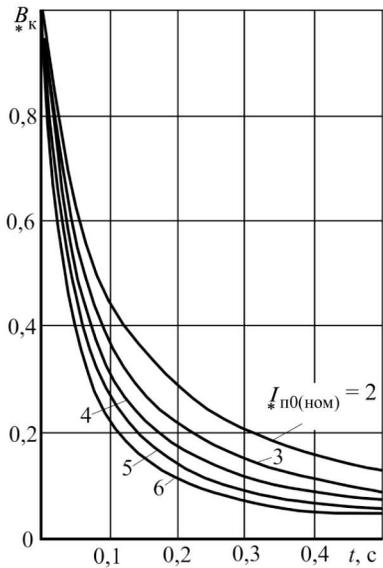


Рис. 12.10. Кривые для определения $B_{*кМ}$ от асинхронного электродвигателя

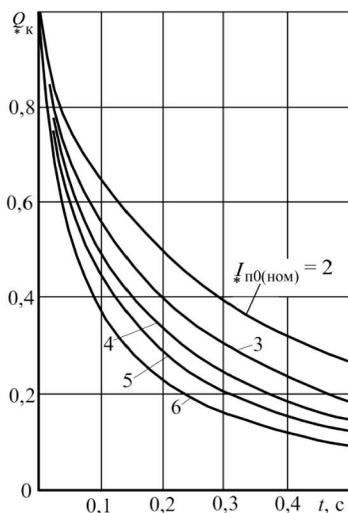


Рис. 12.11. Кривые для определения $I_{кМ}^*$ от асинхронного электродвигателя

Термически эквивалентный ток короткого замыкания и в этом случае определяют по формуле (12.3), подставив в нее предварительно найденное значение интеграла Джоуля $B_{к}$.

Следует отметить, что в упомянутом выше стандарте МЭК изложена методика расчета термически эквивалентного тока короткого замыкания только для простейшей расчетной схемы, содержащий один синхронный генератор (см. схему на рис. 12.1,б). При такой схеме термически эквивалентный ток короткого замыкания предлагается определять по формуле

$$I_{\text{тер.эк}} = I_{\text{п0G}} \sqrt{m + n},$$

где m и n – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно аperiodической и периодической составляющих тока короткого замыкания и определяемые по специальным кривым.

Чтобы по упомянутым кривым определить коэффициент m , необходимо знать ударный коэффициент, причем он не должен быть больше 1,9. А для определения коэффициента n необходимо предварительно найти действующее значение установившегося тока короткого замыкания от генератора $I_{\text{п,уG}}$ и отношение $\frac{I_{\text{п0G}}}{I_{\text{п,уG}}}$. Очевидно,

это отношение лишь очень приближенно учитывает характер изменения во времени действующего значения периодической составля-

ющей тока короткого замыкания $I_{Gt} = f(t)$, тогда как отечественный метод учитывает реальный характер этой зависимости, так как кривые $B_{*KG} = f(t_{откл})$ и $Q_{*KG} = f(t_{откл})$ построены с использованием типовых кривых изменения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания при различных удаленностях точки короткого замыкания. Кроме того, отечественная практика давно отказалась от использования установившегося тока короткого замыкания для оценки степени термического воздействия тока короткого замыкания на проводники и электрические аппараты, так как при современных системах релейной защиты генераторов установившийся ток является фиктивной величиной, а его использование связано с увеличением объема расчетов.

Таким образом в случаях, когда расчет степени термического воздействия тока короткого замыкания необходимо вести с использованием термически эквивалентного тока короткого замыкания, его следует определять по одной из формул (12.6), (12.8), (12.11) и (12.13), а при расчетной схеме рис. 12.1,в по формуле (12.3), используя для определения B_K выражения (12.14), (12.16) или (12.17).

12.3. Термическое воздействие токов короткого замыкания на проводники

Температуру нагрева проводников к моменту отключения короткого замыкания определяют исходя из уравнения теплового баланса

$$i_K^2 R_{\vartheta} dt = c_{\vartheta} m d\vartheta, \quad (12.18)$$

где R_{ϑ} – активное сопротивление проводника при температуре ϑ ; c_{ϑ} – удельная теплоемкость проводника при температуре ϑ (она изменяется незначительно по сравнению с R_{ϑ} и далее принимается постоянной, т.е. $c_{\vartheta} = c$); m – масса проводника.

Уравнение (12.18) преобразуют к виду

$$\frac{1}{S} \rho_n \frac{\vartheta_{yc} + \vartheta}{\vartheta_{yc} + \vartheta_n} i_K^2 dt = S c \lambda d\vartheta, \quad (12.19)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника; ρ_n – удельное сопротивление материала проводника при начальной температуре проводника ϑ_n ; ϑ – текущее значение температуры проводника; ϑ_{yc} – условная температура, зависящая от материала проводника (для твердотянутой меди $\vartheta_{yc} = 242$ °C; для отожженной меди $\vartheta_{yc} = 234$ °C; для алюминия $\vartheta_{yc} = 236$ °C); λ – плотность материала проводника.

Для определения конечной температуры проводника необходимо разделить переменные и интегрировать левую часть в пределах от нуля до $t_{откл}$, а правую часть от ϑ_n до конечной температуры ϑ_K :

$$\frac{1}{S^2} \int_0^{t_{\text{откл}}} i_k^2 dt = \frac{c\lambda}{\rho_{\text{н}}} (\vartheta_{\text{yc}} + \vartheta_{\text{н}}) \int_{\vartheta_{\text{н}}}^{\vartheta_{\text{к}}} \frac{1}{(\vartheta_{\text{yc}} + \vartheta)} d\vartheta. \quad (12.20)$$

Решение уравнения (9.20) имеет вид

$$B_{\text{к}}/S^2 = A_{\vartheta_{\text{к}}} - A_{\vartheta_{\text{н}}}, \quad (12.21)$$

где $B_{\text{к}}$ – интеграл Джоуля, $A^2 \cdot \text{с}$; $A_{\vartheta_{\text{н}}}$ и $A_{\vartheta_{\text{к}}}$ – значения правой части уравнения (12.20) при нижнем и верхнем пределах интегрирования (т.е. в начале и конце нагрева), $A^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$.

По выражению для правой части (12.20) с учетом (12.21) можно построить кривые зависимости температуры нагрева проводников ϑ от величины A_{ϑ} . На рис. 12.12 приведена одна из таких кривых, на примере которой показан порядок определения температуры нагрева проводника. Он заключается в следующем:

▶ исходя из начальной температуры проводника $\vartheta_{\text{н}}$ по кривой рис. 12.12 находят значение величины $A_{\vartheta} = A_{\vartheta_{\text{н}}}$ при этой температуре;

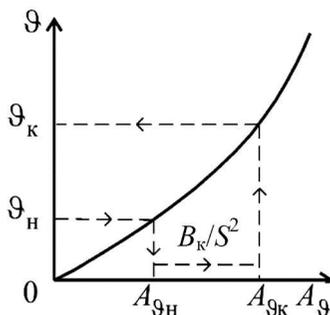


Рис. 12.12. К определению температуры нагрева проводников при коротком замыкании

▶ используя методику, изложенную выше, определяют значение интеграла Джоуля $B_{\text{к}}$ при расчетных условиях короткого замыкания;

▶ находят значение величины $A_{\vartheta} = A_{\vartheta_{\text{к}}}$, соответствующее конечной температуре нагрева проводника:

$$A_{\vartheta_{\text{к}}} = A_{\vartheta_{\text{н}}} + B_{\text{к}}/S^2, \quad (12.22)$$

причем для сталеалюминиевых проводов под S понимают площадь поперечного сечения алюминиевой части провода;

▶ по найденному значению величины $A_{\vartheta} = A_{\vartheta_{\text{к}}}$, с помощью кривой рис. 12.12, определяют температуру нагрева проводника к моменту отключения короткого замыкания $\vartheta_{\text{к}}$.

12.4. Проверка проводников на термическую стойкость

При проверке проводников на термическую стойкость при коротком замыкании определяют их температуру нагрева к моменту отключения короткого замыкания и сравнивают ее с предельно допустимой температурой нагрева. Проводник удовлетворяет условию термической стойкости, если его температура нагрева ϑ_k к моменту отключения короткого замыкания не превышает предельно допустимую температуру нагрева $\vartheta_{k, \text{доп}}$ соответствующего проводника при коротком замыкании, т.е. если выполняется условие:

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{k, \text{доп}} \quad (12.23)$$

Кривые для определения температуры нагрева проводников из различных материалов и сплавов приведены на рис. 12.13 и 12.14, а значения предельно допустимых температур нагрева различных проводников при коротком замыкании – в табл. 12.1. Последовательность определения ϑ_k изложена выше. (см. п. 12.3).

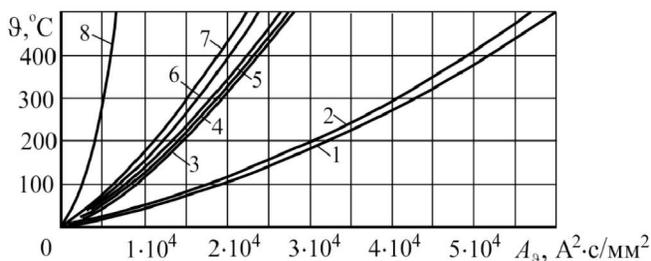


Рис. 12.13. Кривые для определения температуры нагрева проводников при коротких замыканиях, выполненных из материалов:

1 – ММ; 2 – МТ; 3 – АМ; 4 – АТ; 5 – АД0; 6 – АД31Т1;
7 – АД31Т; 8 – Ст3

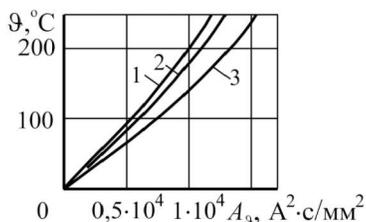


Рис. 12.14. Кривые для определения температуры нагрева проводников при коротких замыканиях, выполненных из материалов:

1 – сплавы АЖ и АЖКП; 2 – сплавы АН и АНКП;
3 – алюминий марок А, АКП, АпКП и сталеалюминий марок АС, АСК, АСКП, АСКС, АпС, АпСКС, АпСК

Таблица 12.1

**Предельно допустимые температуры нагрева проводников
при коротком замыкании**

| Вид проводников | $\vartheta_{к. доп}, ^\circ\text{C}$ |
|--|--------------------------------------|
| Шины алюминиевые | 200 |
| Шины медные | 300 |
| Шины стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратами | 400 |
| Шины стальные, имеющие непосредственное соединение с аппаратами | 300 |
| Кабели бронированные и небронированные с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение, кВ: | |
| 1 | 250 |
| 6 – 10 | 200 |
| 20 – 35 | 130 |
| 110 – 220 | 125 |
| Кабели и изолированные провода с медными и алюминиевыми жилами и изоляцией: | |
| из поливинилхлоридного пластиката | 160 |
| резины | 160 |
| полиэтилена (кабели до 35 кВ) | 130 |
| вулканизированного (сшитого) полиэтилена | 250 |
| Медные неизолированные провода при тяжениях, Н/мм ² : | |
| менее 20 | 250 |
| 20 и более | 200 |
| Алюминиевые неизолированные провода при тяжениях, Н/мм ² : | |
| менее 20 | 200 |
| 20 и более | 160 |
| Алюминиевая часть сталеалюминиевых проводов | 200 |
| Самонесущие изолированные провода на напряжение до 1 кВ с изоляцией из: | |
| термопластичного полиэтилена | 135 |
| вулканизированного (сшитого) полиэтилена | 250 |
| Провода с защитной оболочкой на напряжение 6 – 20 кВ | 250 |

В тех случаях, когда нагрузка проводника до короткого замыкания была близка к продолжительно допустимой, минимальное сечение проводника, отвечающее условию термической стойкости при коротком замыкании, определяют по формуле

$$S_{\text{тер min}} = \sqrt{\frac{B_{\text{к}}}{A_{\vartheta_{\text{к доп}}} - A_{\vartheta_{\text{ном}}}}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C_{\text{тер}}}, \quad (12.24)$$

где $A_{\vartheta_{\text{к доп}}}$ и $A_{\vartheta_{\text{ном}}}$ – значения функции A_{ϑ} соответственно при предельно допустимой $\vartheta_{\text{к доп}}$ и продолжительно допустимой $\vartheta_{\text{ном}}$ температурах проводника, A с/мм⁴; $C_{\text{тер}}$ – параметр, $A \cdot \text{с}^{1/2}/\text{мм}^2$, определяемый по формуле

$$C_{\text{тер}} = \sqrt{A_{\vartheta_{\text{к доп}}} - A_{\vartheta_{\text{ном}}}}.$$

Значения параметра $C_{\text{тер}}$ для жестких шин приведены в табл. 12.2, для кабелей – в табл. 12.3, а для проводов – в табл. 12.4.

Таблица 12.2

Значения параметра $C_{\text{тер}}$ для жестких шин

| Система легирования | Материал проводника или марка сплава | Значение $C_{\text{тер}}$, $A \cdot \text{с}^{0,5}/\text{мм}^2$, при начальной температуре | | |
|---------------------|---|--|-------|--------|
| | | 70 °С | 90 °С | 120 °С |
| – | Медь | 170 | – | – |
| Al | АД0 | 90 | 81 | 68 |
| | АД1Н | 91 | 82 | 69 |
| | АД0М, АД1М | 92 | 83 | 70 |
| Al-Mg-Si | АД31Т1 | 85 | 77 | 64 |
| | АД31Т | 82 | 74 | 62 |
| | АД33Т1 | 77 | 71 | 59 |
| | АД33Т | 74 | 67 | 57 |
| | АВТ1 | 73 | 66 | 55 |
| | АВТ | 71 | 63 | 53 |
| Al-Zn-Mg | 1911 | 71 | 63 | 53 |
| | 1915, 1915Т | 66 | 60 | 51 |
| Al-Mg-Mn | АМг5 | 63 | 57 | 48 |
| – | Сталь при $\vartheta_{\text{к доп}} = 400$ °С | 70 | – | – |
| | Сталь при $\vartheta_{\text{к доп}} = 300$ °С | 60 | – | – |

Таблица 12.3

Значения параметра $C_{тер}$ для кабелей

| Характеристика кабелей | Значение $C_{тер}$, $A \cdot c^{0,5}/mm^2$ |
|---|---|
| Кабели до 10 кВ: с медными жилами с алюминиевыми жилами | 140 |
| | 90 |
| Кабели 20 – 30 кВ: с медными жилами с алюминиевыми жилами | 105 |
| | 70 |
| Кабели и изолированные провода с поли- хлорвиниловой или резиновой изоляцией: с медными жилами с алюминиевыми жилами | 120 |
| | 75 |
| Кабели и изолированные провода с поливинилхлоридной изоляцией: с медными жилами с алюминиевыми жилами | 103 |
| | 65 |
| | |

Таблица 12.4

Значение параметра $C_{тер}$ для проводов

| Материал провода | Марка провода | Значение $C_{тер}$, $A \cdot c^{0,5}/mm^2$, при допустимых температурах нагрева проводов при коротком замыкании | | |
|----------------------|--|---|--------|--------|
| | | 160 °C | 200 °C | 250 °C |
| Медь | М | – | 142 | 162 |
| Алюминий | А, АКП, Ап, АпКП | 76 | 90 | – |
| Алюминиевый сплав | АН, АНКП | 69 | 81 | – |
| | АЖ, АЖКП | 66 | 77 | – |
| Сталеалюми- ний | АС, АСК, АСКП, АСКС, АпС, АпСК, АпСКС | 76 | 90 | – |

В проектной практике часто возникает вопрос о максимально допустимом токе короткого замыкания, при котором обеспечивается термическая стойкость предварительно выбранных или уже находящихся в эксплуатации кабелей. Этот ток можно определить, исходя из соответствующего значения $C_{тер}$ и допустимого значения интеграла Джоуля, полагая, что действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания не изменяется во времени. Из уравнения (9.24) следует, что допустимое значение интеграла Джоуля, $C_{тер}$ и сечение проводника S связаны соотношением:

$$B_{к, доп} = C_{тер}^2 S^2.$$

Используя формулу (12.5), можно записать

$$I_{\text{тер.доп}}^2 \left[t_{\text{откл}} + T_{\text{а.эк}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{а.эк}}}} \right) \right] = C_{\text{тер}}^2 S^2, \quad (12.25)$$

откуда

$$I_{\text{тер.доп}} = \frac{C_{\text{тер}} S}{\sqrt{t_{\text{откл}} + T_{\text{а.эк}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{откл}}}{T_{\text{а.эк}}}} \right)}}. \quad (12.26)$$

В тех случаях, когда $t_{\text{откл}} \geq 3T_{\text{а.эк}}$, выражение (12.26) упрощается:

$$I_{\text{тер.доп}} = \frac{C_{\text{тер}} S}{\sqrt{t_{\text{откл}} + T_{\text{а.эк}}}}. \quad (12.27)$$

Допускается проверку проводников на термическую стойкость при коротком замыкании проводить также путем сравнения так называемой термически эквивалентной плотности тока короткого замыкания $J_{\text{тер.эк}}$ с допустимой в течение расчетной продолжительности короткого замыкания плотностью тока $J_{\text{тер.доп}}$. Проводник удовлетворяет условию термической стойкости при коротком замыкании, если выполняется соотношение

$$J_{\text{тер.эк}} \leq J_{\text{тер.доп}}. \quad (12.28)$$

Значения этих величин определяют по формулам:

$$J_{\text{тер.эк}} = \frac{I_{\text{тер.эк}}}{S}; \quad (12.29)$$

$$J_{\text{тер.доп}} = \sqrt{\frac{A_{\text{э.к.доп}} - A_{\text{э.н}}}{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.30)$$

Если нагрузка проводника до короткого замыкания близка к продолжительно допустимой, проверку этого проводника на термическую стойкость при коротком замыкании допускается проводить, используя соотношение:

$$J_{\text{тер.эк}} \leq \frac{C_{\text{тер}}}{\sqrt{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.31)$$

В тех случаях, когда для кабелей и проводников известны значения односекундного тока термической стойкости (допустимого односекундного тока короткого замыкания) $I_{\text{тер.доп1}}$, проверку таких кабелей и проводников на термическую стойкость при коротком за-

мыкании можно проводить путем сравнения интеграла Джоуля B_k с квадратом односекундного тока термической стойкости. Термическая стойкость кабелей и проводников обеспечивается, если выполняется условие

$$B_k \leq I_{\text{тер, доп}}^2. \quad (12.32)$$

При известной термически эквивалентной плотности тока условие термической стойкости кабелей или проводников выражается соотношением

$$J_{\text{тер, доп}} \leq \frac{I_{\text{тер, доп}}}{S\sqrt{t_{\text{откл}}}}. \quad (12.33)$$

12.5. Проверка силовых кабелей на невозгораемость при коротком замыкании

Все силовые кабели должны быть проверены на невозгораемость при коротком замыкании (не путать с пожаростойкостью), т.е. на их способность не возгорать даже при действии только резервной релейной защиты. При проверке силовых кабелей на невозгораемость при коротких замыканиях расчетную точку короткого замыкания выбирают в начале кабеля, независимо от того, является ли он единственным или частью кабельной линии, содержащей несколько параллельно включенных кабелей. Если одиночный кабель имеет ступенчатое сечение по длине, то для каждого участка с новым сечением кабеля необходимо принимать свою расчетную точку короткого замыкания в начале этого участка.

Для проверки силовых кабелей на невозгораемость при коротком замыкании необходимо в соответствии с изложенным выше способом определить конечную температуру нагрева их жил ϑ_k при расчетной продолжительности короткого замыкания (она определяется как время действия резервной релейной защиты, сложенное с полным временем отключения выключателя, т.е. временем от начала размыкания его контактов до полного погасания электрической дуги) и сравнить ее с предельно допустимой температурой нагрева жил по условию невозгораемости кабелей $\vartheta_{\text{нв}}$. Невозгораемость кабелей обеспечивается, если выполняется условие

$$\vartheta_k \leq \vartheta_{\text{нв}}. \quad (12.34)$$

Предельно допустимые температуры нагрева жил кабелей напряжением 6 – 10 кВ по условию невозгораемости при коротком замыкании приведены в табл. 12.5.

**Предельно допустимые температуры нагрева
жил кабелей напряжением
6 – 10 кВ по условию невозгораемости
при коротком замыкании**

| Характеристика кабеля | Предельно допустимая температура нагрева жил кабеля, °С |
|---|---|
| Бронированные кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение до 6 кВ | 400 |
| Бронированные кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ | 360 |
| Небронированные кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение до 6 кВ | 350 |
| Небронированные кабели с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ | 310 |
| Кабели с пластмассовой (поливинилхлоридный пластикат) и резиновой изоляцией | 350 |
| Кабели с изоляцией из вулканизированного полиэтилена | 400 |

12.6. Проверка электрических аппаратов на термическую стойкость

Для электрических аппаратов устанавливаются нормированный ток термической стойкости $I_{\text{тер.норм}}$ и нормированное допустимое время его воздействия $t_{\text{тер.норм}}$.

Проверка электрического аппарата на термическую стойкость при коротком замыкании заключается в сравнении найденного при расчетных условиях значения интеграла Джоуля B_k с его допустимым для проверяемого аппарата значением $B_{\text{тер.доп}}$. Электрический аппарат удовлетворяет условию термической стойкости, если выполняется условие

$$B_k \leq B_{\text{тер.доп}}$$

Для коммутационных аппаратов (выключателей, выключателей нагрузки, разъединителей и т.д.) интеграл Джоуля определяется при сквозном коротком замыкании, а его допустимое значение зависит не только от указываемого заводом-изготовителем нормированного тока термической стойкости проверяемого аппарата $I_{\text{тер.норм}}$, но и от соотношения между расчетной продолжительностью короткого замыкания $t_{\text{откл}}$ и предельно допустимым нормированным временем

воздействия нормированного тока термической стойкости $t_{\text{тер.норм}}$ (также указываемого заводом-изготовителем).

Если $t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.норм}}$, то допустимое значение интеграла Джоуля составляет

$$B_{\text{тер.доп}} = I_{\text{тер.норм}}^2 t_{\text{тер.норм}}, \quad (12.35)$$

поэтому условием термической стойкости коммутационного аппарата является выполнение соотношения

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер.норм}}^2 t_{\text{тер.норм}}. \quad (12.36)$$

Если же $t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.норм}}$, то допустимое значение интеграла Джоуля равно

$$B_{\text{тер.доп}} = I_{\text{тер.норм}}^2 t_{\text{откл}} \quad (12.37)$$

и условием термической стойкости коммутационного аппарата является выполнение соотношения

$$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер.норм}}^2 t_{\text{откл}}. \quad (12.38)$$

Проверку электрических аппаратов на термическую стойкость при коротком замыкании допускается также производить путем сравнения термически эквивалентного тока короткого замыкания $I_{\text{тер.эк}}$ с допустимым током термической стойкости $I_{\text{тер.доп}}$. Электрический аппарат обладает термической стойкостью, если выполняется условие

$$I_{\text{тер.эк}} \leq I_{\text{тер.доп}}. \quad (12.39)$$

Для коммутационных электрических аппаратов допустимый ток термической стойкости, как и допустимое значение интеграла Джоуля, зависит не только от нормированного тока термической стойкости, но и от соотношения между расчетной продолжительностью короткого замыкания и предельно допустимым временем воздействия нормированного тока термической стойкости.

Если $t_{\text{откл}} > t_{\text{тер.норм}}$, то условием термической стойкости коммутационного электрического аппарата является выполнение соотношения

$$I_{\text{тер.эк}} \leq I_{\text{тер.норм}} \sqrt{t_{\text{тер.норм}} / t_{\text{откл}}}. \quad (12.40)$$

Если же $t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.норм}}$, то условием термической стойкости аппарата является выполнение соотношения

$$I_{\text{тер.эк}} \leq I_{\text{тер.норм}}. \quad (12.41)$$

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПРОВОДНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

13.1. Силы взаимодействия проводников с токами

Известно, что электрические токи взаимодействуют. Силы взаимодействия проводников с токами называются электродинамическими силами или нагрузками и определяются согласно закону Ампера. Для прямолинейных нитевидных произвольно расположенных проводников элементарная сила на каждый элемент dl_1 проводника с током i_1 , находящегося в магнитном поле проводника с током i_2 (рис. 13.1), равна

$$dQ_1 = i_1 B_2 dl_1 \sin \beta, \quad (13.1)$$

где B_2 – индукция (в месте расположения элемента dl_1) магнитного поля соседнего проводника с током i_2 ;

β – угол между векторами \vec{B}_2 и $d\vec{l}_1$.

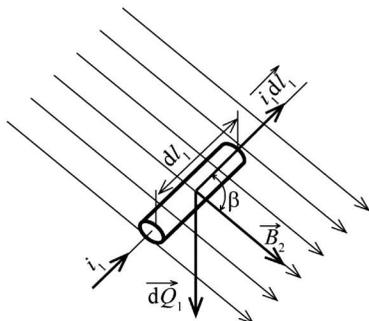


Рис. 13.1. К определению элементарной силы, действующей на находящийся в магнитном поле проводник с током

Согласно выражению Лапласа-Био и Савара магнитная индукция для прямолинейного нитевидного проводника бесконечной длины с током i_2 на расстоянии a составляет

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{i_2}{2\pi a}, \quad (13.2)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость среды;

μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м.

Для немагнитных материалов (в том числе для всех диэлектриков: воздуха, масла, элегаза и т.д.) $\mu = 1$. Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Направление вектора магнитной индукции от тока прямолинейного проводника перпендикулярно плоскости, в которой находится проводник, поэтому для двух параллельных нитевидных и бесконечно длинных проводников в уравнении (13.1) угол β равен $\pi/2$, а $\sin \beta = 1$. Если расстояние между этими проводниками равно a , то выражение для определения элементарной силы (нагрузки), действующей на единицу длины проводника с током i_1 , приводится к виду

$$q_1 = \frac{dQ_1}{dl_1} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi a} i_1 i_2 = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} i_1 i_2. \quad (13.3)$$

Нетрудно видеть, что нагрузки, действующие на проводники с токами i_1 и i_2 , равны (т.е. $q_1 = q_2 = q$) и распределены вдоль проводников равномерно.

Результирующие электродинамические силы на отрезке проводника длиной l определяются как

$$Q = \int_0^l q(x) dx \quad (13.4)$$

и для рассматриваемых проводников оказываются равными

$$Q = ql = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} i_1 i_2. \quad (13.5)$$

Направление электродинамических сил и распределенных нагрузок зависит от направления токов в проводниках и может быть определено по правилу левой руки. При одинаковом направлении токов в проводниках последние притягиваются друг к другу, а при встречном направлении – отталкиваются друг от друга (рис. 13.2).

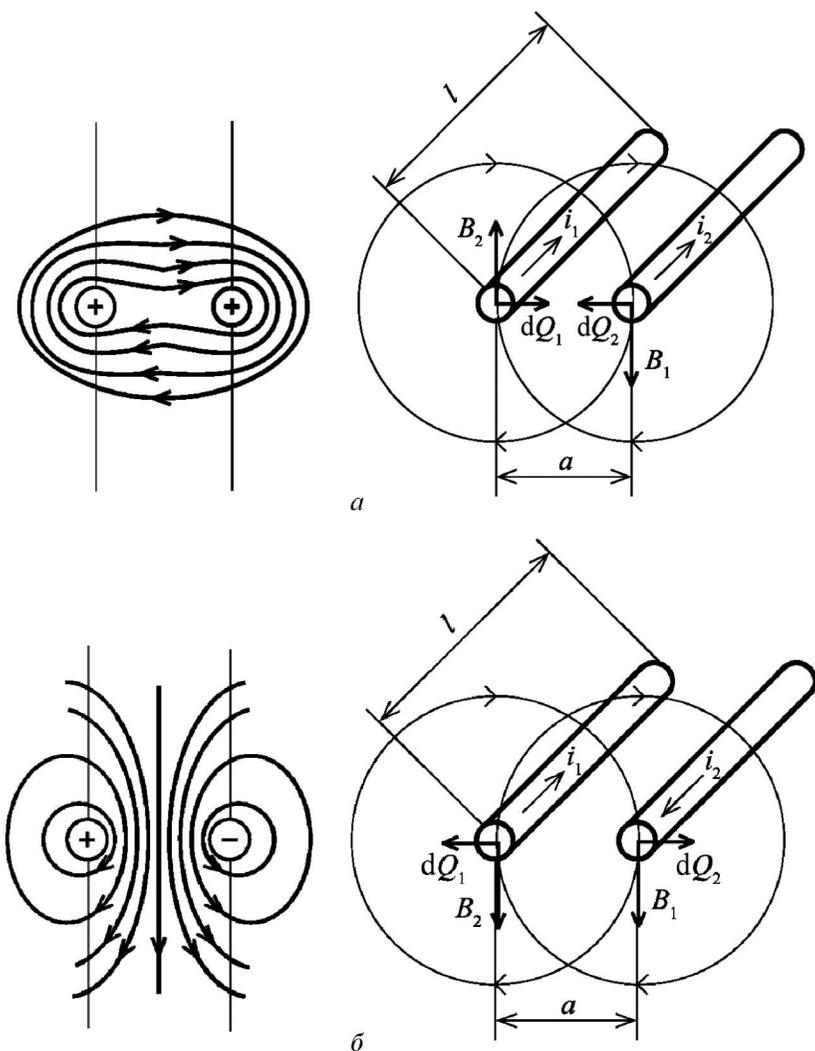


Рис. 13.2. Взаимодействие двух параллельно проложенных проводников с током:

a – при одинаковом направлении токов в проводниках;

б – при встречном направлении токов

Если длина проводников ограничена – индукция по длине проводника непостоянная. Неравномерность распределения индукции и соответственно электродинамических нагрузок особенно резко проявляется для проводников с поворотами. В качестве примера на рис. 13.3 приведено распределение электродинамических нагрузок, действующих на П-образный проводник.

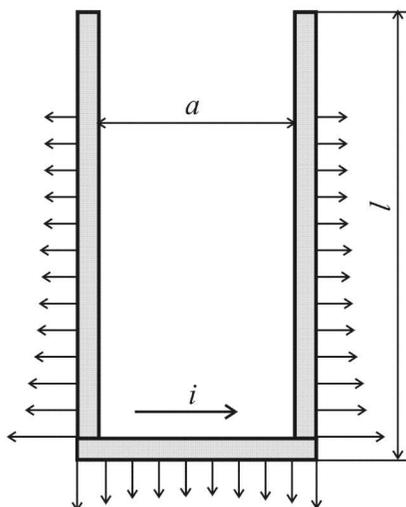


Рис. 13.3. Распределение электродинамических нагрузок в П-образном проводнике с током

Взаимодействие параллельных проводников с конечными размерами

Приведенное выше выражение (13.3) для электродинамических нагрузок справедливо для тонких параллельных проводников и дает заметную погрешность, если размеры поперечного сечения проводников близки к расстоянию между ними. Чтобы устранить эту погрешность вводят поправочные коэффициенты, получившие название коэффициентов формы.

Коэффициент формы равен отношению силы (нагрузки) взаимодействия реальных проводников (с учетом их поперечных размеров) к силе взаимодействия бесконечно тонких проводников, расположенных в центре сечения реальных проводников. С учетом коэффициента формы k_ϕ электродинамические нагрузки для параллельных бесконечно длинных проводников равны

$$q = k_\phi \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} i_1 i_2. \quad (13.6)$$

Для проводников (шин) прямоугольного сечения коэффициент формы определяется, например, по кривым (рис.13.4). Для шин, установленных на ребро ($b/h < 1$), коэффициент формы меньше единицы. По мере увеличения отношения b/h он возрастает и для шин квадратного сечения ($b/h = 1$) практически равен единице. Для шин,

установленных плашмя ($b/h > 1$), коэффициент формы больше единицы. Если периметр поперечного сечения шины $2(b + h)$ больше расстояния в свету между шинами ($a - b$), т.е. $(a - b)/(h + b) > 2$, коэффициент формы можно принять равным единице.

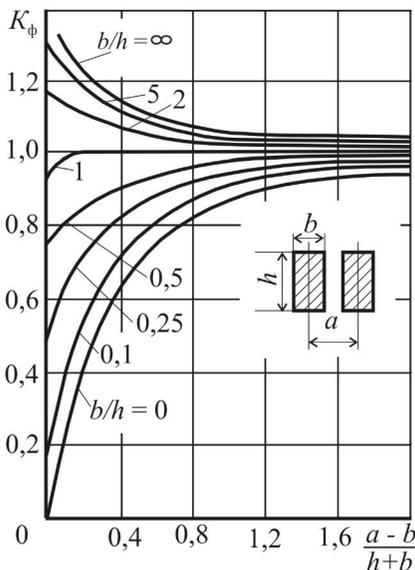


Рис. 13.4. Кривые для определения коэффициента формы шины прямоугольного сечения

Для шин круглого и кольцевого сечений коэффициент формы также равен единице. При $k_\phi = 1$ электродинамические нагрузки, действующие на шины, определяются по формулам для нитевидных проводников.

В трехфазной системе токи фаз A , B и C сдвинуты по фазе на угол $2\pi/3$:

$$i_A = I_m \sin(\omega t + \Psi) = I_m \sin\beta;$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t + \Psi - 2\pi/3) = I_m \sin(\beta - 2\pi/3);$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + \Psi + 2\pi/3) = I_m \sin(\beta + 2\pi/3),$$

где I_m – амплитудное значение тока; ω – угловая частота тока, рад/с; Ψ – угол включения тока короткого замыкания; $\beta = \omega t + \Psi$.

Угол включения тока короткого замыкания равен

$$\Psi = (\alpha - \varphi),$$

где α – фаза включения, т.е. угол между вектором напряжения фазы A источника энергии и линией отсчета углов при $t = 0$; φ – угол сдвига по фазе вектора тока относительно вектора напряжения.

При расположении фаз в одной плоскости проводники крайних и средней фаз находятся в различных условиях. Для определения наибольшей силы, действующей на проводник той или иной фазы рассматриваемой системы, необходимо сравнить силы, действующие на крайние и средний проводники.

При указанных на рис. 13.5,а направлениях токов сила, действующая на проводник фазы A , складывается из сил взаимодействия между проводниками фаз A и B и между проводниками фаз A и C , т.е.

$$\begin{aligned} q_A &= q_{AB} + q_{AC} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{i_A i_B}{a} + \frac{i_A i_C}{2a} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} i_A (i_B + 0,5 i_C). \end{aligned} \quad (13.7)$$

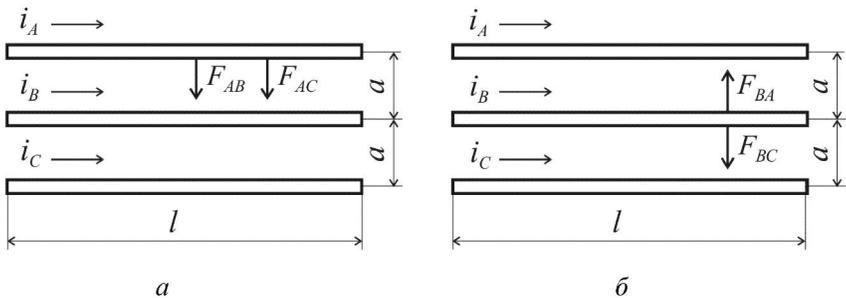


Рис. 13.5. Силы взаимодействия между проводниками трехфазной системы, расположенными в одной плоскости

Если подставить в (13.7) значения i_A , i_B и i_C , то получим

$$\begin{aligned} q_A &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sin \beta \left[\sin \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) + 0,5 \sin \left(\beta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 f(\beta). \end{aligned} \quad (13.8)$$

Для определения максимальной силы возьмем производную от $f(\beta)$ и приравняем ее нулю. Наибольшее значение силы q_A имеет место при $\beta = 5\pi/12$ и составляет

$$q_{A\max} = - \frac{2 \cdot 0,81 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2. \quad (13.9)$$

Знак минус указывает на то, что наибольшая сила по отношению к соседним фазам является не притягивающей, а отталкивающей.

Подобным же образом находится сила, действующая на среднюю фазу B (см. рис. 13.5,б), принимая условно за положительное одно из направлений действия сил (например, от фазы B к фазе A):

$$q_B = q_{BA} - q_{BC} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} i_B (i_A - i_C). \quad (13.10)$$

После подстановки выражений для мгновенных значений токов i_A , i_B и i_C и соответствующих преобразований получим

$$q_B = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sin\left(2\beta - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (13.11)$$

Исходя из последнего выражения нетрудно найти, что наибольшее значение силы имеет место при $\beta = 11\pi/12$, когда $\sin(2\beta - 4\pi/3) = +1$ (притягивание к фазе A), и при $\beta = 5\pi/12$, когда $\sin(2\beta - 4\pi/3) = -1$ (отталкивание от фазы A).

Таким образом, наибольшая сила, действующая на проводник средней фазы:

$$q_{B\max} = \pm \frac{2 \cdot 0,87 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2. \quad (13.12)$$

Из выражений (13.9) и (13.12) видно, что в наиболее тяжелых условиях находится средняя фаза, которая и должна являться расчетной при проверке на электродинамическую стойкость трехфазных систем с рассмотренным расположением фаз.

13.2. Электродинамические нагрузки в трехфазной шинной линии при двухфазном коротком замыкании

В случае двухфазного короткого замыкания в сети с источником синусоидального напряжения ток короткого замыкания определяется по выражению

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) - I_m e^{-t/T} \sin \Psi, \quad (13.13)$$

где $I_m = \sqrt{2} I_{п0}$ – амплитуда начального значения периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания; T_a – постоянная

времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания, с.

Уравнение (13.13) не учитывает затухание амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания и справедливо для удаленных коротких замыканий. В общем случае такое допущение является утяжеляющим. Однако оно правомерно, поскольку затухание амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания происходит значительно медленнее его аperiodической составляющей и, как правило, не приводит к заметной погрешности расчетов.

Для параллельных шин, расположенных в одной плоскости (рис. 13.6,а), наибольшие силы взаимодействия будут между ближайшими фазами *A* и *B* или *B* и *C*.

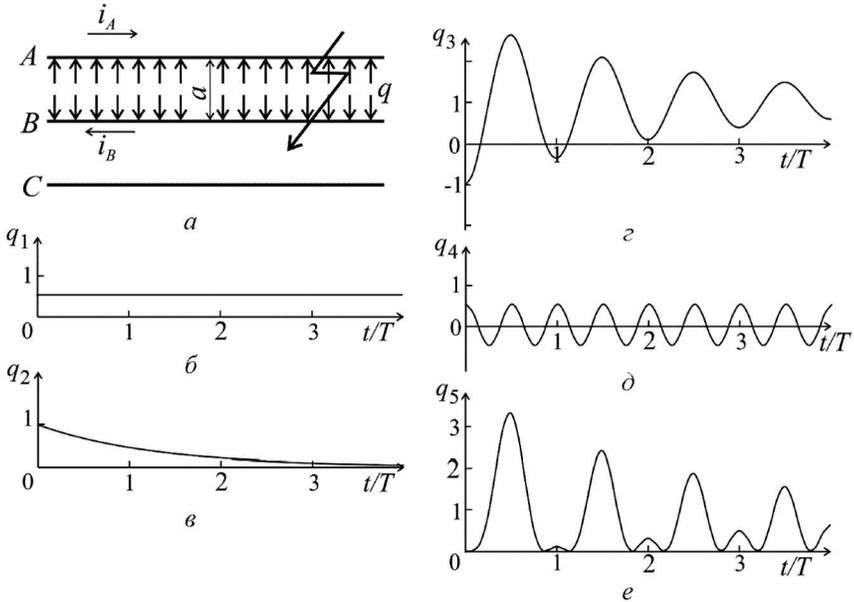


Рис. 13.6. Максимальные электродинамические нагрузки в шинной линии при двухфазном коротком замыкании¹:
a – поясняющая схема; *б–д* – составляющие нагрузки;
e – результирующая нагрузка

Для определения электродинамических нагрузок между поврежденными фазами подставим (13.13) в (13.3). Если учесть, что токи в поврежденных фазах равны по величине, но направлены про-

¹ $T = 2\pi/\omega$.

тывоположно, то, используя известные тригонометрические формулы², в результате преобразований получим:

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} i^2 = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \left[0,5 + \sin^2 \Psi \cdot e^{-2t/T_a} - \right. \\ \left. - 2 \sin^2 \Psi \cdot e^{-t/T_a} \cos \omega t - 2 \sin 2\Psi \cdot e^{-t/T_a} \sin \omega t - \right. \\ \left. - 0,5 \cos 2\Psi \cos 2\omega t + 0,5 \sin 2\Psi \sin 2\omega t. \right. \quad (13.14)$$

Выражение (13.14) удобно записать в виде

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n T_n, \quad (13.15)$$

где D_n – коэффициенты, зависящие от угла Ψ ; T_n – функции времени равные

$$\left. \begin{aligned} T_1 = 1; T_2 = e^{-2t/T_a}; T_3 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \\ T_4 = e^{-t/T_a} \sin \omega t; T_5 = \cos 2\omega t; T_6 = \sin 2\omega t. \end{aligned} \right\} \quad (13.16)$$

Таким образом, в общем случае электродинамическая нагрузка содержит шесть временных составляющих: постоянную, аperiodическую, затухающую с постоянной времени $T_a/2$, две периодические, которые изменяются с частотой ω , а их амплитуды затухают с постоянной времени T_a и две периодические, изменяющиеся с частотой 2ω .

Максимальные электродинамические силы возникают при угле ψ примерно равном $\pi/2$, при котором ток двухфазного короткого замыкания достигает наибольшего значения. Время наступления наибольших нагрузок составляет около 0,01 с, также как и время наступления максимального тока короткого замыкания. Направление действия электродинамических нагрузок (с учетом направления токов при двухфазном коротком замыкании) показано на рис. 13.6,а.

Значения коэффициентов D_n при $\Psi = \pi/2$ приведены в табл. 13.1. Следует отметить, что коэффициенты D_4 и D_6 при временных составляющих, соответственно, $e^{-t/T_a} \sin \omega t$ и $\sin 2\omega t$ при этом угле включения оказываются равными нулю. В последнем столбце табл.13.1 указано максимальное значение суммы $\sum D_n T_n$ при постоянной времени $T_a = 0,05$ с.

² $\sin^2 \omega t = 0,5(1 - \cos 2\omega t)$; $\sin(\Psi + \omega t) = \sin \Psi \cos \omega t + \cos \Psi \sin \omega t$;

$\sin \Psi \cos \Psi = 0,5 \sin 2\Psi$; $\cos(\Psi + \omega t) = \cos \Psi \cos \omega t - \sin \Psi \sin \omega t$.

Таблица 13.1

Значения коэффициентов D_n электродинамических нагрузок шинных линий с фазами, расположенными в одной плоскости

| Вид короткого замыкания | Фаза | Коэффициенты D_n при n , равных | | | | | | $\max \left \sum_{n=1}^6 D_n T_n \right $ |
|-------------------------|------|-------------------------------------|--------|--------|---|--------|---|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Двухфазное | – | 0,5 | 1,0 | –2,0 | 0 | 0,5 | 0 | 3,3 |
| Трехфазное | A | 0,375 | 0,808 | –1,616 | 0 | 0,433 | 0 | 2,67 |
| | B | 0 | 0,866 | –1,732 | 0 | 0,866 | 0 | 2,86 |
| | C | –0,375 | –0,808 | 1,616 | 0 | –0,433 | 0 | 2,67 |

Необходимо отметить, что максимальное значение модуля суммы $\sum D_n T_n$ при двухфазном коротком замыкании оказывается примерно равным

$$\max \left| \sum_{n=1}^6 D_n T_n \right| = k_{уд}^2, \quad (13.17)$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент при двухфазном коротком замыкании.

Поэтому максимальное значение электродинамических нагрузок при двухфазном коротком замыкании оказываются равными

$$q_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} k_{уд}^2 I_m^2, \quad (13.18)$$

где $i_{уд}$ – ударный ток короткого замыкания.

13.3. Электродинамические нагрузки в трехфазной шинной линии при трехфазном коротком замыкании

В случае трехфазного короткого замыкания формулы для токов фаз без учета затухания периодической составляющей имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \left[\sin(\omega t - \Psi) + e^{-t/T_a} \sin \Psi \right]; \\ i_B &= I_m \left[\sin \left(\omega t - \Psi - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\Psi - \frac{2\pi}{3} \right) e^{-t/T_a} \right]; \\ i_C &= I_m \left[\sin \left(\omega t - \Psi + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\Psi + \frac{2\pi}{3} \right) e^{-t/T_a} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (13.19)$$

Нагрузки, действующие на проводники фаз, расположенные в одной плоскости, с учетом положительных направлений сил (рис. 13.7,*a*) определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} q_A &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} \left(i_A i_B + \frac{1}{2} i_A i_C \right); \\ q_B &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} (i_A i_B - i_B i_C); \\ q_C &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} \left(-\frac{1}{2} i_A i_C - i_B i_C \right). \end{aligned} \right\} \quad (13.20)$$

Знак минус перед слагаемыми в уравнениях (13.20) свидетельствует о противоположном направлении сил по отношению к направлению, принятому за положительное.

Если подставить (13.19) в уравнения (13.20), то после преобразований выражения для электродинамических нагрузок принимают вид, аналогичный (13.15) при двухфазном коротком замыкании

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n T_n. \quad (13.21)$$

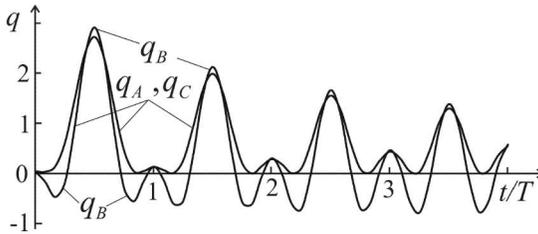
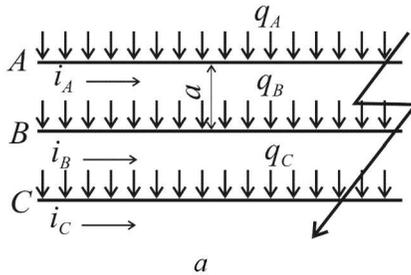


Рис. 13.7. Электродинамические нагрузки в шинной линии при трехфазном коротком замыкании:

a – поясняющая схема; *б* – кривые изменения $q = f(t/T)$

Наибольшие электродинамические нагрузки наступают примерно через 0,01 с после возникновения короткого замыкания, причем в фазе A такие нагрузки получаются при угле включения $\Psi = k\pi - \pi/12$, в фазе B – при $\Psi = k\pi/2 - \pi/12$ и в фазе при C – $\Psi = k\pi + 7\pi/12$.

Коэффициенты D_n при указанных углах включения приведены в табл. 13.1. Там же указаны максимальные по модулю значения суммы $\sum D_n T_n$ при постоянной времени $T_a = 0,05$ с.

Электродинамические нагрузки на шины крайних фаз A и C при принятых положительных направлениях токов (рис. 13.7,а) равны по значению и противоположно направлены. Поэтому при принятых на рис. 13.7,а направлениях нагрузок, коэффициенты D_n данных фаз имеют противоположные знаки, так же как и результирующие нагрузки. На рис. 13.7,б представлены осциллограммы нагрузок, воздействующих на среднюю и крайние фазы при углах включения $\Psi = -\pi/2$.

Электродинамические нагрузки на среднюю шину больше, чем на крайние. При этом и состав нагрузок различен. Коэффициенты D_3 и D_5 периодических составляющих нагрузок при временных составляющих $T_3 = e^{-t/T} \cos \omega t$ и $T_5 = \cos 2\omega t$ на шину средней фазы значительно больше (по модулю), чем на шины крайних фаз (также как при двухфазном коротком замыкании при расчетных углах включения Ψ коэффициенты D_4 и D_6 оказываются равными нулю).

Максимальное значение модуля суммы $\sum D_n T_n$ для шины средней фазы при трехфазном коротком замыкании оказывается примерно равным

$$\max \left| \sum_{n=1}^6 D_n T_n \right| = \frac{\sqrt{3}}{2} k_{уд}^2,$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент при трехфазном коротком замыкании.

Таким образом максимальное значение электродинамической нагрузки при трехфазном коротком замыкании в шинной линии, фазы которой расположены в одной плоскости, определяется по формуле

$$q_{\max}^{(3)} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} k_{уд}^2 I_m^2 = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} I_{уд}^2. \quad (13.22)$$

Сопоставим максимальные электродинамические нагрузки в системе параллельных шин, расположенных в одной плоскости при двух- и трехфазном коротких замыканиях. Принимая во внимание,

что $i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} I_{п0}$ и $k_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_a}$, а при удаленных коротких замыканиях постоянная времени T_a при двух- и трехфазных коротких замыканиях отличаются незначительно, в соответствии с (13.18) и (13.22) получим, что отношение максимальных нагрузок равно

$$\frac{q_{\max}^{(3)}}{q_{\max}^{(2)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{(I_{п0}^{(3)})^2}{(I_{п0}^{(2)})^2}.$$

Поскольку отношение действующих значение периодических составляющих токов трехфазного и двухфазного коротких замыканий $\frac{I_{п0}^{(3)}}{I_{п0}^{(2)}} = \frac{2}{\sqrt{3}}$, получим

$$\frac{q_{\max}^{(3)}}{q_{\max}^{(2)}} = \frac{4\sqrt{3}}{2 \cdot 3} = 1,15.$$

Таким образом максимальное значение электродинамической нагрузки при трехфазном коротком замыкании (действующей на среднюю шину) превышает максимальное значение нагрузки при двухфазном коротком замыкании на 15 %.

13.4. Электродинамические нагрузки в шинной линии с проводниками, расположенными по вершинам треугольника, при трехфазном коротком замыкании

При определении электродинамических нагрузок следует учитывать взаимное расположение проводников разных фаз. Если параллельные проводники расположены по вершинам треугольника (рис.13.8), то вектор электродинамической нагрузки при коротком замыкании имеет другое направление, чем при расположении проводников в одной плоскости. Но временной состав нагрузок остается тем же, т.е. определяется по формуле (13.15). В зависимости от угла включения Ψ конец вектора наибольших нагрузок описывает эллипс в случае расположения шин по вершинам равнобедренного прямоугольного треугольника (рис.13.8,а) и окружность в случае расположения шин по вершинам равностороннего треугольника (рис. 13.8,б,в).

Для практических расчетов удобно использовать формулу максимальных электродинамических нагрузок, которая при трехфазном коротком замыкании приводится к виду

$$q_{\max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} K_{\text{расп}} i_{\text{уд}}^2, \quad (13.23)$$

где $K_{\text{расп}}$ – коэффициент расположения, который показывает, во сколько раз максимальные результирующие, изгибающие, растягивающие или сжимающие нагрузки в данной шинной линии отличаются от максимальных нагрузок, действующих в системе проводников, расположенных в одной плоскости на расстоянии a между соседними фазами при равных токах короткого замыкания.

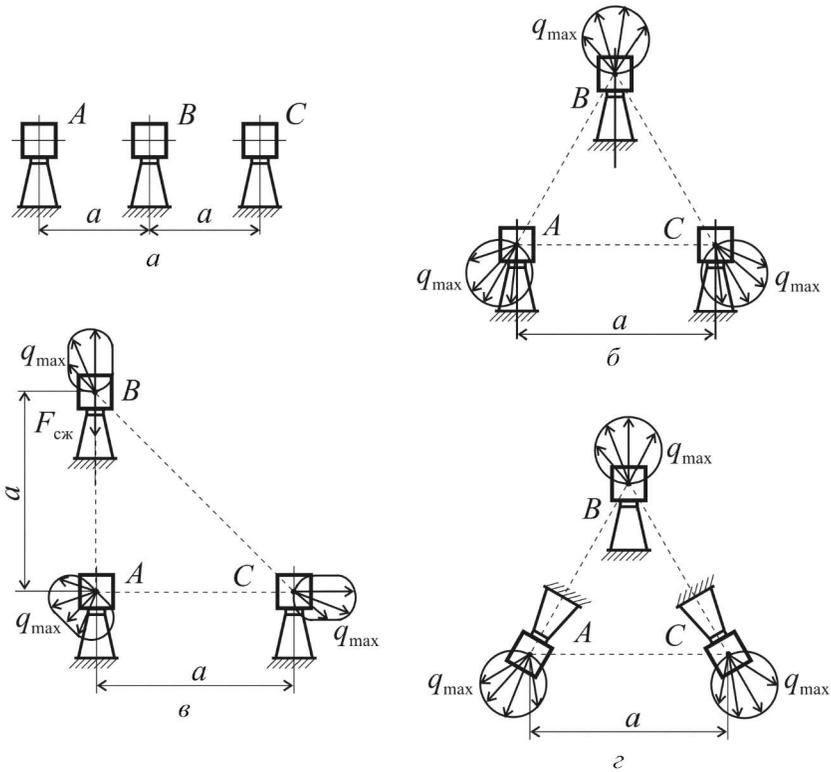


Рис. 13.8. Наибольшие электродинамические нагрузки, действующие на проводники шинных линий, фазы которых расположены по вершинам прямоугольного равнобедренного (а) и равносторонних (б, з) треугольников

Значения коэффициента $K_{\text{расп}}$ для шинных линий некоторых типов приведены в табл. 13.2.

Значения коэффициента $K_{расп}$

| Расположение шин | Расчетная фаза | Значение коэффициента $K_{расп}$ для нагрузок | | | |
|---|----------------|---|------------|---------------|-----------|
| | | результурующей | изгибающей | растягивающей | сжимающей |
| В одной плоскости (рис. 13.8,а) | A, C | 0,93 | 0,93 | 0,00 | 0,00 |
| | B | 1,00 | 1,000 | 0,00 | 0,00 |
| По вершинам равностороннего треугольника (рис. 13.8,б) | A | 1,00 | 0,94 | 0,25 | 0,75 |
| | B | 1,00 | 0,50 | 1,00 | 0,00 |
| | C | 1,00 | 0,94 | 0,25 | 0,75 |
| По вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рис. 13.8,в) | A | 0,87 | 0,87 | 0,29 | 0,87 |
| | B | 0,95 | 0,43 | 0,83 | 0,07 |
| | C | 0,95 | 0,93 | 0,14 | 0,43 |
| По вершинам равностороннего треугольника (рис. 13.8,г) | A, B, C | 1,00 | 0,50 | 1,00 | 0,00 |

13.5. Условия электродинамической стойкости и расчетные схемы шинных конструкций

Электродинамическая стойкость электрооборудования – это способность проводников (шин), изоляторов на которых они закреплены, токопроводов, электрических аппаратов, измерительных трансформаторов, электрических машин и другого оборудования выдерживать без повреждений, препятствующих их дальнейшей эксплуатации, механические воздействия, обусловленные токами короткого замыкания (т.е. действия электродинамических нагрузок). Для

определения электродинамической стойкости электрических аппаратов, экранированных токопроводов, трансформаторов и другого электрооборудования заводского изготовления проводят их испытания токами короткого замыкания в специализированных лабораториях и центрах. В результате экспериментов определяют наибольшее значение сквозного тока короткого замыкания $i_{скв}$ (или тока электродинамической стойкости $i_{дин}$).

Для электрооборудования, прошедшего регламентные испытания, условие электродинамической стойкости определяется неравенством

$$i_{уд} \leq i_{скв}. \quad (13.24)$$

Вместе с тем, обмотки электрических машин, токоведущие части аппаратов и другого оборудования на этапе конструирования (до испытаний) проверяют на электродинамическую стойкость расчетным путем. Электродинамическую стойкость ошиновки, а в ряде случаев трансформаторов и воздушных линий электропередачи ввиду их габаритов, сложности проведения испытаний, а также возможности получения достаточно точных аналитических результатов, как правило, определяют посредством аналитических расчетов.

Конструкция с жесткими шинами обладает электродинамической стойкостью, если выполняются условия:

$$F_{max} \leq F_{доп}; \quad (13.25)$$

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{доп}, \quad (13.26)$$

где F_{max} – максимальная расчетная механическая нагрузка (сила) на изоляторы; $F_{доп}$ – допустимая механическая нагрузка (сила) на изоляторы; σ_{max} – максимальное расчетное механическое напряжение в материале шины; $\sigma_{доп}$ – допустимое механическое напряжение в материале шины.

Допустимую нагрузку на изолятор (изоляционную опору) $F_{доп}$ следует принимать равной 60% от минимальной разрушающей нагрузки $F_{разр}$, приложенной к вершине изолятора (опоры) при изгибе или разрыве, т.е.

$$F_{доп} = 0,6F_{разр}. \quad (13.27)$$

Допустимую нагрузку на спаренные изоляторы (опоры) следует принимать равной 50% от суммарного разрушающего усилия изоляторов (опор):

$$F_{\text{доп}} = 0,5F_{\text{разр}\Sigma}, \quad (13.28)$$

где $F_{\text{разр}\Sigma}$ – суммарное разрушающее усилие спаренных изоляторов (опор).

Если центр масс шины удален от вершины опорного изолятора, что имеет место, например, когда плоская шина поставлена на ребро (см. рис. 13.9,а,б), значение допустимой нагрузки на опорный изолятор при изгибе следует пересчитывать в соответствии с формулой

$$F_{\text{доп}} = NF_{\text{разр.изг}} h/H, \quad (13.29)$$

где N – коэффициент допустимой нагрузки, равный 0,6 или 0,5 [см. формулы (13.27) и (13.28)]; h и H – расстояния от опасного сечения изолятора соответственно до его вершины и центра масс поперечного сечения шины.

Опасное сечение опорно-стержневых изоляторов с внутренним креплением арматуры (рис. 13.9,а) следует принимать у опорного фланца, опорно-стержневых изоляторов с внешним креплением арматуры (рис. 13.9,б,в) – у кромки нижнего фланца, а опорно-штыревых изоляторов (рис. 13.9,г) – на границе контакта штыря с фарфоровым телом изолятора.

Допустимую изгибающую нагрузку многоярусных изоляционных опор (колонок изоляторов) (рис. 13.9,з,д) принимают равной допустимой нагрузке наименее прочного яруса, определяемой по формуле (13.29). Если составная колонка изоляторов содержит равнопрочные элементы, то прочность опоры в целом определяет нижний изолятор (рис. 13.9,з).

Допустимое механическое напряжение в материале жестких шин $\sigma_{\text{доп}}$ принимают равным 70% от временного сопротивления разрыву материала шин $\sigma_{\text{в}}$:

$$\sigma_{\text{доп}} = 0,7\sigma_{\text{в}}, \quad (13.30)$$

Временные сопротивления разрыву и допустимые напряжения в материалах шин приведены в табл. 13.3.

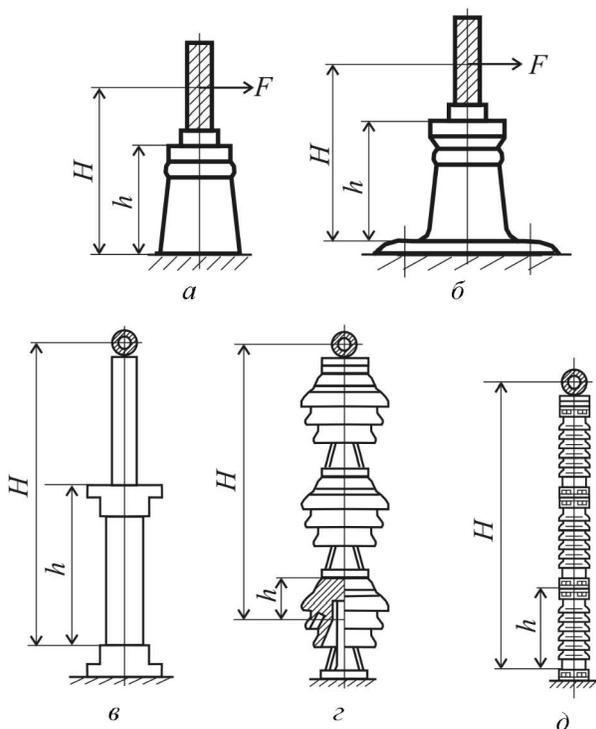


Рис. 13.9. К определению допустимых нагрузок на изоляторы и изоляционные опоры

Таблица 13.3

Основные характеристики материалов шин

| Материал шины | Марка | Временное сопротивление разрыву, МПа | | Допустимое напряжение, МПа | | Модуль упругости, 10^{10} Па |
|-------------------|--------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | | материала | в области сварного соединения | материала | в области сварного соединения | |
| Алюминий | АО, А | 118 | 118 | 82 | 82 | 7 |
| | АДО | 59 – 69 | 59 – 69 | 41 – 48 | 41 – 48 | 7 |
| Алюминиевый сплав | АД31Т | 127 | 120 | 89 | 84 | 7 |
| | АД31Т1 | 196 | 120 | 137 | 84 | 7 |
| | АВТ1 | 304 | 152 | 213 | 106 | 7 |
| | 1915Т | 353 | 318 | 247 | 223 | 7 |
| Медь | МГМ | 245 – 255 | – | 171,5 – 178 | – | 10 |
| | МГТ | 245 – 294 | – | 171,5 – 206 | – | 10 |

В зоне сварных соединений (швов) шин их временное сопротивление разрыву снижается. Поэтому при наличии сварных швов для обеспечения электродинамической стойкости шин, кроме условия (13.26), должно выполняться неравенство

$$\sigma_{\text{св,макс}} \leq \sigma_{\text{св,доп}}, \quad (13.31)$$

где $\sigma_{\text{св,макс}}$ – максимальное расчетное механическое напряжение в зоне сварного шва шины; $\sigma_{\text{св,доп}}$ – допустимое механическое напряжение в зоне сварного шва, равное 70 % от временного сопротивления разрыву материала в зоне сварки $\sigma_{\text{св,в}}$.

Значение $\sigma_{\text{св,в}}$ обычно определяют экспериментально. При отсутствии экспериментальных данных значения временного сопротивления разрыву, а также допустимого напряжения можно принимать, используя данные табл. 13.3.

Важным условием корректности расчетов шинных конструкций на электродинамическую стойкость является правильный выбор расчетной схемы.

Различают многопролетные шинные конструкции, у которых длина целого (или сварного) участка шины равна длине только одного пролета (рис. 13.10,*а*) и конструкции, у которых длина целого участка равна двум и более пролетам (рис. 13.10,*б,в*). Соединение отдельных целых участков шин выполняют гибкими связями, которые являются также компенсаторами температурных деформаций. Компенсаторы выполняют либо с помощью проводов (в РУ 110 кВ и выше, а иногда и 35 кВ), либо с помощью алюминиевой или медной ленты (в ЗРУ до 35 кВ). В длиннопролетных шинных конструкциях компенсаторы устанавливают над изоляторами, а в ошиновке ЗРУ до 35 кВ – в середине пролета.

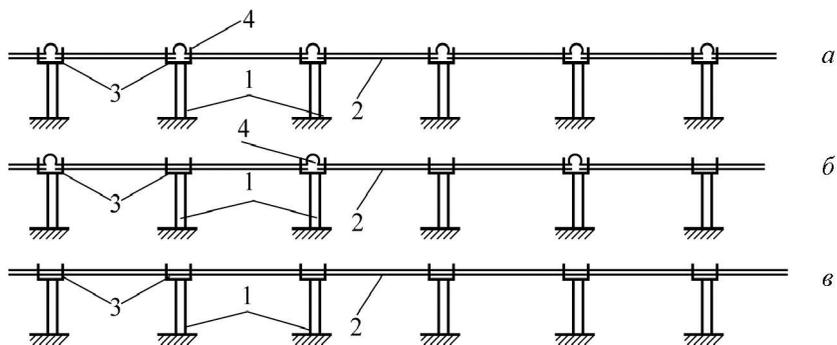


Рис. 13.10. Шинные конструкции с одно-, двух- и многопролетными неразрезными шинами: 1 – изоляторы; 2 – шины; 3 – шинодержатели; 4 – компенсаторы тепловых расширений

Шинные конструкции с длиной целого участка шины равной длине пролета (рис.13.10,*а*) характерны для РУ напряжением 110 кВ и выше, многопролетные целые шины – для ЗРУ напряжением до 35 кВ. Целые шины, у которых длина равна двум пролетам, находят ограниченное применение: как правило, в качестве шин внутрирайонных связей.

В зависимости от длины целого участка шины различают следующие три основные расчетные схемы шинных конструкций:

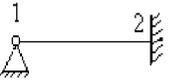
– балка с шарнирным опиранием шины на обоих опорах пролета (табл. 13.4, схема № 1), если длина целого (или сварного) участка шины равна длине одного пролета (рис. 13.10,*а*);

– балка с шарнирным опиранием на одной опоре и жестким опиранием (защемлением) на другой опоре пролета (табл. 13.4, схема №2), если длина целого участка шины равна длине двух пролетов (рис.13.10,*б*);

– балка с защемлением на обоих опорах (табл. 13.4, схема № 3) для средних пролетов многопролетной неразрезной шины (рис.13.10,*в*).

Таблица 13.4

Расчетные схемы шинных конструкций

| Схема № | Расчетная схема | Коэффициенты | | | $1/\lambda(z)$ | Координаты сечения | |
|---------|---|--------------|----------|-----------|--|-----------------------|-----------------------|
| | | r_1 | β | λ | | наибольших напряжений | наименьших напряжений |
| 1 |  | 3,14 | 1 | 8 | $\frac{1}{2} \left \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} \right $ | $l/2$ | $0; l$ |
| 2 |  | 3,93 | 1,25 | 8 | $\left \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \frac{z}{l} \right $ | l | $0; 3/4l$ |
| 3 |  | 4,73 | 1^1 | 12^1 | $\frac{1}{2} \left \frac{z}{l} - \frac{z^2}{l^2} - \frac{1}{6} \right ^1$ | $0; l$ | $0,21; 0,79l$ |
| | | | $1,13^2$ | $9,5^2$ | $\left 0,529 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} - 0,106 \right ^2$ | 0 | $0,27; 0,79l$ |
| | | | $1,13^3$ | $9,5^3$ | $\left 0,394 \frac{z}{l} - 0,5 \frac{z^2}{l^2} \right ^3$ | l | $0,79l$ |

1 – для средних пролетов многопролетных шинных конструкций;

2 – для второго пролета многопролетных шинных конструкций;

3 – для крайних пролетов многопролетных шинных конструкций.

Примечание. Коэффициент λ используется при определении максимального напряжения в материале проводника, β – при определении нагрузки на опору, r_1 – параметр основной частоты собственных колебаний шины.

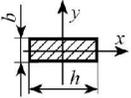
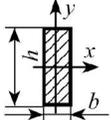
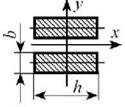
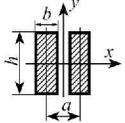
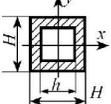
Одним из важных параметров шинной конструкции является первая (основная) частота собственных колебаний, которая определяется по формуле:

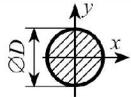
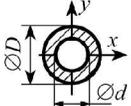
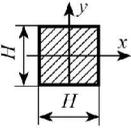
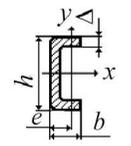
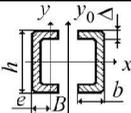
$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (13.32)$$

где E – модуль упругости материала шины (табл.13.3); J – момент инерции поперечного сечения шины, определяемый по формулам, приведенным в табл. 13.5; m – масса шины на единицу длины; r_1 – параметр основной частоты собственных колебаний шины. Значения этого параметра для шинных конструкций с абсолютно жесткими (неподвижными при действии нагрузок) опорами для различных схем шинной конструкции указаны в табл. 13.4.

Таблица 13.5

Формулы для определения момента инерции J и момента сопротивления W поперечных сечений шин

| Форма сечения и расположение шин | Расчетные формулы | |
|---|------------------------------|------------------------------|
| | $J, \text{м}^4$ | $W, \text{м}^3$ |
|  | $J_y = \frac{bh^3}{12}$ | $W_y = \frac{bh^2}{6}$ |
|  | $J_y = \frac{hb^3}{12}$ | $W_y = \frac{hb^2}{6}$ |
|  | $J_y = \frac{bh^3}{6}$ | $W_y = \frac{bh^2}{3}$ |
|  | $J_y = \frac{hb^3}{6}$ * | $W_y = \frac{hb^2}{3}$ * |
|  | $J_y = \frac{H^4 - h^4}{12}$ | $W_y = \frac{H^4 - h^4}{6H}$ |

| Форма сечения и расположение шин | Расчетные формулы | |
|---|---|------------------------------------|
| | $J, \text{м}^4$ | $W, \text{м}^3$ |
|  | $J_y = \frac{\pi D^4}{64}$ | $W_y = \frac{\pi D^3}{32}$ |
|  | $J_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$ | $W_y = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$ |
|  | $J_y = \frac{H^4}{12}$ | $W_y = \frac{H^3}{6}$ |
|  | $J_y = \frac{he^3 - (h-2\Delta)(e-\Delta)^3 + 2\Delta(b-e)^3}{3},$ где $e = \frac{b\Delta(b-\Delta)}{hb - (b-\Delta)(h-2\Delta)} + \frac{\Delta}{2}$ | $W_y = \frac{J_y}{b-e}$ |
|  | $J_y = 2J_y^{**}$ | $W_y = 2W_y^{**}$ |

Примечание. Если прокладки приварены к обоим полосам пакета, то вместо формул, отмеченных * и **, следует применять формулы:

$$* J_y = \frac{hb}{6}(3a_n^2 + b^2); W_y = \frac{hb}{3} \frac{(3a_n^2 + b^2)}{(a_n + b)};$$

$$** J_y = 2\{J_y + [hb - (b - \Delta)(h - 2\Delta)(B - e)]\}; W_y = \frac{J_y}{h/2}.$$

13.6. Расчет шинных конструкций на электродинамическую стойкость

В случае, когда шинная конструкция обладает высокой жесткостью, расчет максимальных нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин проводят на статическую нагрузку равную максимальной электродинамической силе. Конструкция считается достаточно жесткой, если частота собственных колебаний остается выше 200 Гц.

Таким требованиям обычно отвечают шинные конструкции закрытых распределительных устройств напряжением от 6 до 35 кВ.

Максимальная нагрузка на изоляторы, и напряжение в материале шины для конструкции высокой жесткости, фазы которой расположены в одной плоскости (рис. 13.8, а), равны:

$$F_{\max} = \beta q_{\max} l = \beta \frac{\alpha l}{a} i_{\text{уд}}^2; \quad (13.33)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{q_{\max} l^2}{\lambda W} = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{\text{уд}}^2, \quad (13.34)$$

где q_{\max} – максимальная электродинамическая нагрузка при коротком замыкании, определяемая для параллельных шин, по формуле (13.18) или (13.22); l – длина пролета; W – момент сопротивления поперечного сечения шины; формулы для его расчета приведены в табл. 13.5; λ и β – коэффициенты, зависящие от условия опирания (закрепления) шин на опорах (см. табл. 13.4); α – параметр равный $\sqrt{3} \cdot 10^{-7}$ Н/А² при трехфазном коротком замыкании и $2 \cdot 10^{-7}$ Н/А² – при двухфазном коротком замыкании.

Механическое напряжение материала шины в ее произвольном сечении z , в том числе в сечении сварного соединения, определяют по формуле

$$\sigma_{\max}(z) = \frac{q_{\max} l^2}{\lambda(z) W} = \frac{\alpha l^2}{\lambda(z) a W} i_{\text{уд}}^2. \quad (13.35)$$

Формулы для расчета $1/\lambda(z)$ в зависимости от координаты сечений шины z , для различных схем шинных конструкций приведены в табл. 13.4. Там же приведены координаты наибольших и наименьших (равных 0) по модулю напряжений в материале шины.

Следует отметить, что при оценке электродинамической стойкости рассматриваемых шинных конструкций расчетным является трехфазное короткое замыкание, поскольку в этом случае электродинамические нагрузки больше, чем при двухфазном коротком замыкании. (см. п. 13.3).

При расчете электродинамической стойкости составных шин (рис. 13.11) необходимо учитывать, что электродинамические нагрузки на отдельные проводники составных шин обусловлены не только взаимодействием их токов с токами проводников других фаз, но и с токами других проводников одной и той же фазы. В этом случае максимальное напряжение в материале составных шин при коротком замыкании допускается определять по формуле

$$\sigma_{\max} \approx \sigma_{\text{ф max}} + \sigma_{\text{эл max}}, \quad (13.36)$$

где $\sigma_{\phi \max}$ – максимальное напряжение в материале шины, обусловленное взаимодействием тока данного проводника с токами проводников других фаз, определяемое по формуле (13.34), причем в зависимости от вида короткого замыкания в нее подставляют соответствующий коэффициент α ; $\sigma_{\text{эл max}}$ – максимальное напряжение в материале шины, обусловленное взаимодействием токов отдельных проводников одной фазы.

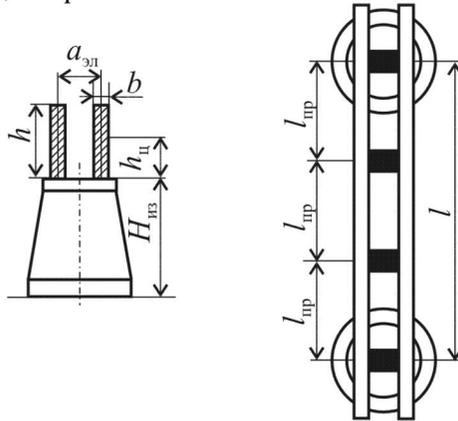


Рис. 13.11. Двухполосная шина, закрепленная на ребро

Напряжение $\sigma_{\text{эл max}}$ определяют по формуле

$$\sigma_{\text{эл max}} = \frac{2 \cdot 10^{-7} l_{\text{пр}}^2 K_{\phi} \left(\frac{i_{\text{уд}}}{n} \right)^2}{\lambda a_{\text{эл}} W_{\text{эл}}}, \quad (13.37)$$

где $l_{\text{пр}}$ – расстояние между осями прокладок (рис. 13.11); $a_{\text{эл}}$ – расстояние между осями поперечных сечений отдельных проводников составных шин; $W_{\text{эл}}$ – момент сопротивления поперечного сечения одного проводника составной шины; $i_{\text{уд}}$ – ударный ток трехфазного или двухфазного короткого замыкания; n – число проводников в одной фазе.

Формула (13.37) справедлива, если частота собственных колебаний отдельной полосы, определяемая по формуле (13.32), больше 200 Гц. При использовании (13.32) параметр частоты $r_1 = 4,73$, длина l принимается равной расстоянию между осями прокладок $l_{\text{пр}}$, а J и m – равными соответственно моменту инерции и погонной массе отдельного проводника составной шины.

Поскольку углы включения тока короткого замыкания, при которых наибольшие электродинамические нагрузки от междуфазного

и внутрифазного взаимодействия при трехфазном коротком замыкании различны, формула (13.36) дает оценку наибольшего напряжения в материале шины с некоторым запасом («сверху»).

Расчет нагрузок на изоляторы в этих конструкциях проводят по формуле (13.33), так же как для несоставных шин.

В случае, когда первая (основная) частота собственных колебаний шинной конструкции меньше 200 Гц, использование приведенных выше формул для наибольших нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин может привести к значительным погрешностям. Поэтому нагрузки и напряжения следует определять путем расчета колебаний шинной конструкции под действием электродинамических нагрузок. Задача сводится к расчету колебаний балки на жестких или упругоподатливых опорах. Если опоры обладают высокой жесткостью, то максимальные нагрузки на изоляторы и напряжения в материале шин (в сечении z) при расположении шин в одной плоскости определяют по формулам

$$F_{\max} = \beta \cdot q_{\max} l \eta = \beta \frac{\alpha \cdot l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta; \quad (13.38)$$

$$\sigma_{\max}(z) = \frac{q_{\max} l^2}{\lambda(z) W} \eta = \frac{\alpha l^2}{\lambda(z) a W} i_{\text{уд}}^2 \eta, \quad (13.39)$$

где η – динамический коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания, основной частоты собственных колебаний шины f_1 , взаимного расположения шин, фазы шинной конструкции, постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания T_a и других факторов.

Динамический коэффициент показывает, во сколько раз максимальная нагрузка на изоляторы или максимальное напряжение в материале шины больше соответствующих значений при статической нагрузке, равной максимальному значению при данном виде короткого замыкания.

В качестве примера на рис. 13.12 приводятся расчетные кривые зависимости динамических коэффициентов $\eta^{(2)}$ и $\eta^{(3)}$ от частоты собственных колебаний f_1 шин, расположенных в одной плоскости при трехфазном и двухфазном коротких замыканиях и при различных значениях постоянной времени T_a .

Следует отметить, что динамические коэффициенты трехфазного короткого замыкания $\eta^{(3)}$ в области частот свыше 50 Гц оказываются больше у средней шины, а ниже 50 Гц у крайних шин. Это объясняется разным составом временных составляющих электродинамических нагрузок (см. табл. 13.1). При низкой частоте собственных колебаний шин наибольшее влияние на шинную конструкцию оказывают постоянная и апериодические составляющие нагрузки.

Периодические составляющие частотой 50 и 100 Гц «отфильтровываются» колебательной системой и заметного влияния на электродинамическую стойкость не оказывают. Вместе с тем постоянная составляющая нагрузки, воздействующая на среднюю шину (фазу B), равна нулю, а при воздействии ее на крайние шины коэффициент этой составляющей D_1 равен 0,375, при относительно близких значениях коэффициентов D_2 аperiodических составляющих электродинамических нагрузок на крайние и средние шины.

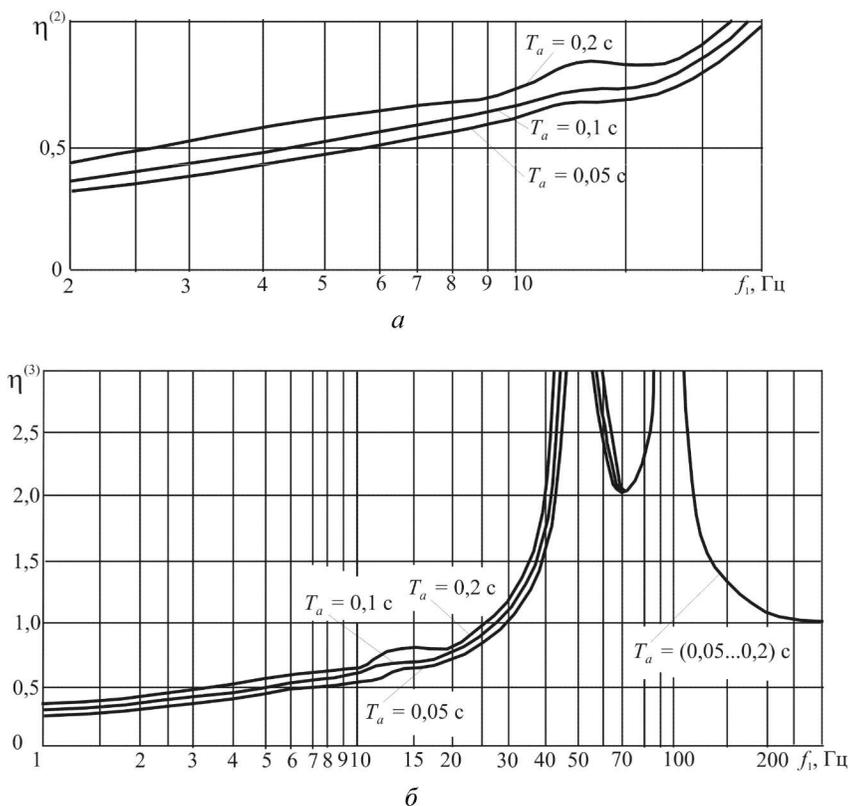


Рис. 13.12. Расчетные динамические коэффициенты двухфазного (а) и трехфазного (б) коротких замыканий

В случае, когда шины расположены по вершинам треугольника (рис.13.8), максимальные нагрузки на изоляторы и максимальные напряжения в материале определяют с учетом их пространственных колебаний. При трехфазном коротком замыкании для конструкций с шинами круглого (или кольцевого) и квадратного сечений они приближенно определяются по формулам:

$$F = q_{\max} \eta \xi_F ; \quad (13.40)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{q_{\max} l}{\lambda W} \eta \xi_{\sigma} , \quad (13.41)$$

где η – динамический коэффициент трехфазного короткого замыкания (рис.13.12); ξ_{σ} и ξ_F – коэффициенты, значения которых для наиболее распространенных шинных конструкций (рис. 13.8) приведены в табл. 13.6.

Таблица 13.6

Значения коэффициентов ξ_{σ} и ξ_F шинных конструкций

| Расположение шин | Схема конструкции на рис. 13.8 | Значение коэффициента ξ_F | Значение коэффициента ξ_{σ} | |
|---|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| | | | для шин круглого и кольцевого сечения | для шин квадратного сечения |
| По вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника | <i>a</i> | 0,95 | 0,95 | 1,16 |
| По вершинам равностороннего треугольника | <i>b</i> | 1,0 | 1,0 | 1,39 |
| | <i>c</i> | 1,0 | 1,0 | 1,21 |

Изоляционные опоры шинных конструкций напряжением 220 кВ и выше, а в ряде случаев и при более низком напряжении, обладают относительно большой упругой податливостью. В этом случае колебания опор при коротких замыканиях оказывают заметное влияние на результаты расчетов на электродинамическую стойкость. Тем не менее расчетные формулы для определения максимальных расчетных нагрузок на изоляторы и напряжений в материале шин (расположенные в одной плоскости, см. рис. 13.8,*a*) приводятся к виду (13.38) и (13.39). При этом динамический коэффициент η определяется по кривым рис. 13.12, в зависимости от первой частоты собственных колебаний, вычисляемой по формуле (13.32). Однако параметр частоты r_1 в этой формуле зависит от жесткости и массы опор. На рис. 13.13 представлены зависимости параметров частоты r_1 для расчетных схем шинных конструкций, приведенных в табл. 13.4, с упругоподатливыми опорами в зависимости от безразмерных величин $C_{\text{оп}}^{\beta}/EJ$ и M/ml , где $C_{\text{оп}}$ – жесткость опоры, а M – ее приведенная масса.

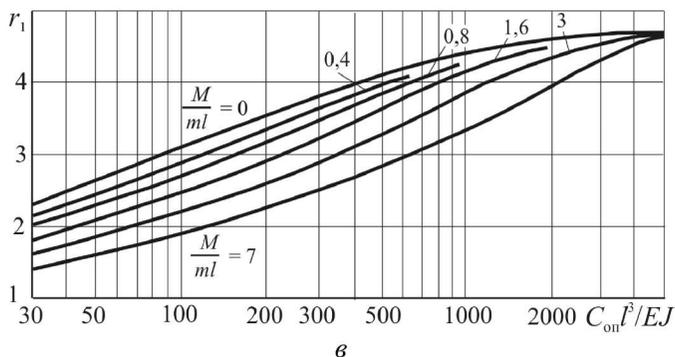
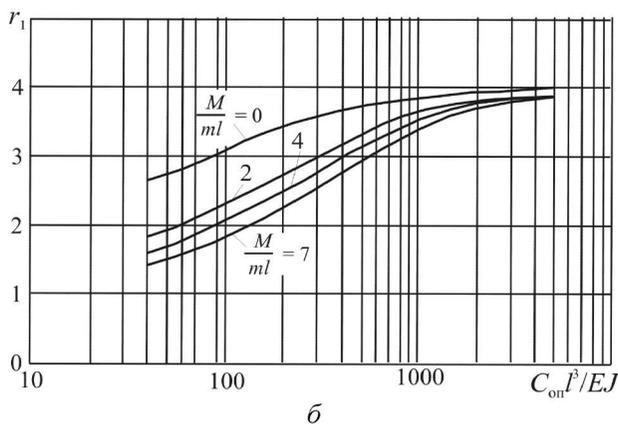
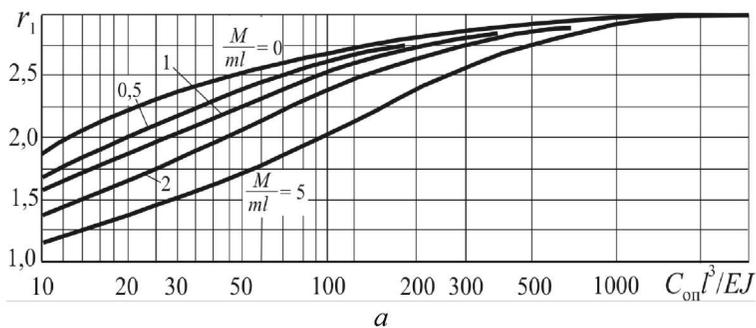


Рис. 13.13. Кривые для определения параметра основной частоты собственных колебаний шины при ее жестком закреплении на упругоподатливых опорах для конструкции: *а* – с шарнирным опиранием шины на обеих опорах пролета (табл. 13.4, схема №1); *б* – с шарнирным опиранием на одной опоре и жестким опиранием (защемлением) на другой опоре пролета (табл. 13.4, схема №2); *в* – с защемлением на обеих опорах (табл. 13.4, схема №3)

Если $C_{\text{оп}} f^3/EJ$ больше 3000 – 5000, то опоры шин можно принять жесткими и параметр r_1 определять по табл. 13.4.

Необходимую для расчета параметра основной частоты собственных колебаний жесткость опор определяют экспериментально, а приведенную массу опоры M по приближенной формуле

$$M = M_{\text{оп}} \left(\frac{H_{\text{ц,оп}}}{H_{\text{ц,ш}}} \right)^2, \quad (13.42)$$

где $M_{\text{оп}}$ – масса опоры; $H_{\text{ц,оп}}$ и $H_{\text{ц,ш}}$ – расстояния от основания опоры соответственно до центра масс опоры (изолятора) и центра масс поперечного сечения шины (см. рис. 13.14).

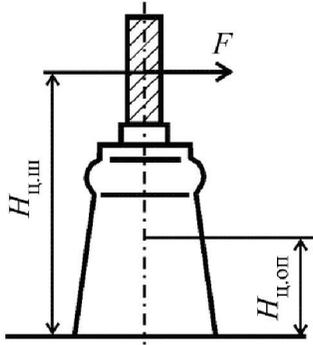


Рис. 13.14. К расчету приведенной массы

При известной частоте собственных колебаний опоры $f_{\text{оп}}$, закрепленной на упругом основании, приведенную массу M следует определять по формуле

$$M = \frac{C_{\text{оп}}}{(2\pi f_{\text{оп}})^2}. \quad (13.43)$$

При наличии быстродействующих устройств автоматического повторного включения (АПВ) шинные конструкции напряжением 35 кВ и выше необходимо проверять на электродинамическую стойкость при повторном включении на короткое замыкание. Такой проверки не требуется, если продолжительность бестоковой паузы $t_{\text{б.п}}$ удовлетворяет условию

$$t_{\text{б.п}} \geq \frac{2,3}{f_1 \delta}, \quad (13.44)$$

где f_1 – первая (основная) частота собственных колебаний ошиновки; δ – логарифмический декремент затухания для токопровода при горизонтальных колебаниях; его значение определяется экспериментально для каждой конкретной конструкции токопровода.

В общем случае наибольшее напряжение в материале токопровода и максимальную нагрузку на изоляторы при повторном включении на короткое замыкание (с некоторым запасом) определяют по формулам:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1\max} \Theta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} l^2}{\lambda a W} i_{\text{уд}}^2 \eta \Theta; \quad (13.45)$$

$$F_{\max} = F_{1\max} \Theta = \beta \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} l}{a} i_{\text{уд}}^2 \eta \Theta, \quad (13.46)$$

где $\sigma_{1\max}$ – наибольшее напряжение в материале токопровода; $F_{1\max}$ – максимальная нагрузка на изоляторы при первом коротком замыкании; Θ – коэффициент превышения напряжения и нагрузки при повторном коротком замыкании.

Коэффициент превышения Θ определяют по кривым рис. 13.15,а в зависимости от логарифмического декремента затухания δ . Номер расчетной кривой на рис. 13.15,а определяют, исходя из продолжительности бестоковой паузы $t_{\text{б.п}}$ и частоты собственных колебаний шины f_1 , используя рис. 13.15,б. Если точка с координатами $t_{\text{б.п}}$ и f_1 лежит в зоне, ограниченной осями координат и кривой I, то коэффициент Θ определяют по кривой 1 на рис. 13.15,а. Если эта точка лежит в зоне, ограниченной кривыми I и II, то Θ определяют по кривой 2 на рис. 13.15,а и т.д. Следует отметить, что расчетные коэффициенты Θ получены при наиболее неблагоприятных условиях коммутаций, которые при первом коротком замыкании, в бестоковую паузу и повторном включении на короткое замыкание, приводят к наибольшим напряжениям в материале шин и нагрузкам на изоляторы и таким образом обеспечивают оценку электродинамической стойкости ошиновки.

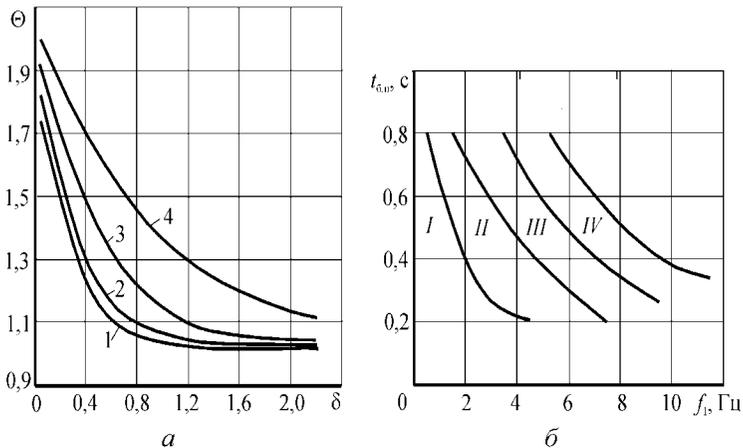


Рис. 13.15. К определению коэффициента превышения Θ в зависимости от δ , $t_{\text{б.п}}$ и f_1

13.7. Проверка гибких проводников на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях

При проверке гибких проводников на электродинамическую стойкость расчетными величинами являются максимальное тяжение в проводниках $F_{\max f}$ и максимальное сближение проводников при коротком замыкании и после его отключения. Электродинамическая стойкость гибких проводников обеспечивается, если выполняются следующие условия:

$$F_{\max f} \leq F_{\text{доп}}; \quad (13.47)$$

$$a - 2(s - r_p) \geq a_{\text{доп min}}, \quad (13.48)$$

где $F_{\text{доп}}$ – допустимое тяжение в проводниках; a – расстояние между проводниками фаз при отсутствии их смещения; s – расчетное смещение проводников; r_p – радиус расщепления фазы; $a_{\text{доп min}}$ – наименьшее допустимое расстояние между проводниками разных фаз при наибольшем рабочем напряжении.

Ниже приводится методика расчета требуемых для проверки величин при условии, что проводники закреплены на одном уровне (по высоте), а гололед и ветровая нагрузка отсутствуют. При определении смещений расчетной моделью проводника в пролете служит абсолютно жесткий стержень, который шарнирно закреплен на опорах, а его ось очерчена по цепной линии. За расчетное принимается двухфазное короткое замыкание. Влияние гирлянд учитывается увеличением погонной силы тяжести проводника.

Необходимость расчета смещения проводников, у которых провес превышает половину расстояния между фазами, устанавливается значением параметра p , $\text{kA}^2 \cdot \text{с}/\text{H}$, определяемого по формуле

$$p = \frac{\lambda (I_{\text{п0}}^{(2)})^2 t_{\text{откл}}}{aq}, \quad (13.49)$$

где $I_{\text{п0}}^{(2)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания, kA ; $t_{\text{откл}}$ – расчетная продолжительность короткого замыкания, с ; a – расстояние между фазами, м ; q – погонная сила тяжести провода, $\text{H}/\text{м}$; λ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей электродинамической силы. Последний определяется по кривой, приведенной на рис. 13.16.

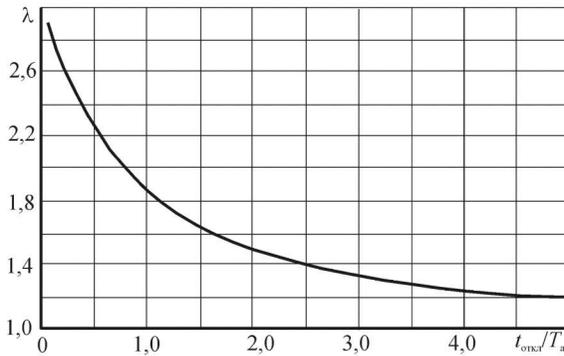


Рис. 13.16. Зависимость коэффициента λ от $t_{\text{откл}}/T_a$

В случае, когда выполняется соотношение $p \leq 0,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с/Н}$, расчет смещения проводников можно не производить, так как опасности их чрезмерного сближения нет. В противном случае расчет смещения производится в следующей последовательности.

1. Определяется предельно допустимая продолжительность короткого замыкания, с:

$$t_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{0,9}{\omega_0^2} \frac{M g}{F_{\text{расч}}^{(2)}}}, \quad (13.50)$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/L}$ – частота малых собственных колебаний расчетного маятника, 1/с, причем $L = 2f/3$, м; f – провес провода в середине пролета, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $M = m_{\text{пог}}l$ – масса проводника одного пролета, кг; l – длина пролета, м; $F_{\text{расч}}^{(2)}$ – расчетная электродинамическая сила при двухфазном коротком замыкании, Н.

Последняя вычисляется по формуле:

$$F_{\text{расч}}^{(2)} = F_0^{(2)}\lambda = \frac{\mu\mu_0 I (\sqrt{2}I_{\text{п0}}^{(2)})^2 \cdot 10^6}{4\pi a} \lambda = k_1 \frac{l (\sqrt{2}I_{\text{п0}}^{(2)})^2}{a} \lambda, \quad (13.51)$$

где $k_1 = \frac{\mu\mu_0 \cdot 10^6}{4\pi} = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}{4\pi} = 0,1 \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$; $F_0^{(2)}$ – постоянная составляющая электродинамической нагрузки на проводник в пролете при двухфазном коротком замыкании, Н; μ – относительная магнитная проницаемость воздушной среды (для воздуха $\mu = 1$); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; a – расстояние между центрами соседних фаз.

2. Если $t_{\text{откл}} < t_{\text{пред}}$, то горизонтальное смещение проводника при коротком замыкании, м, вычисляется по формуле

$$s = 1,23 \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \sqrt{gf} \frac{\lambda \left(\sqrt{2} I_{\text{п0}}^{(2)} \right)^2 \cdot 10^6 t_{\text{откл}}}{aq} =$$

$$= k_2 \sqrt{gf} \frac{\lambda \left(\sqrt{2} I_{\text{п0}}^{(2)} \right)^2 t_{\text{откл}}}{aq}, \quad (13.52)$$

где $k_2 = 1,23 \frac{\mu\mu_0 \cdot 10^6}{4\pi} = 1,23 \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}{4\pi} = 0,123 \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$; q – погонный вес проводника, кг/м.

В случае, когда вычисленное по формуле (13.52) значение s оказывается больше стрелы провеса проводника в середине пролета, следует принимать $s = f$.

3. Если $t_{\text{пред}} < t_{\text{откл}} < 0,6(2\pi/\omega_0)$, то горизонтальное смещение проводника при коротком замыкании, м, вычисляется по одной из формул:

$$\left. \begin{aligned} s &= f \sin \alpha_{\text{max}} && \text{при } \frac{\Delta W_{\kappa}}{MgL} \leq 1; \\ s &= f && \text{при } \frac{\Delta W_{\kappa}}{MgL} > 1, \end{aligned} \right\} \quad (13.53)$$

где α_{max} – угол максимального отклонения проводника от вертикали, рад, определяемый по формуле

$$\alpha_{\text{max}} = \arccos[1 - \Delta W_{\kappa}/(MgL)]; \quad (13.54)$$

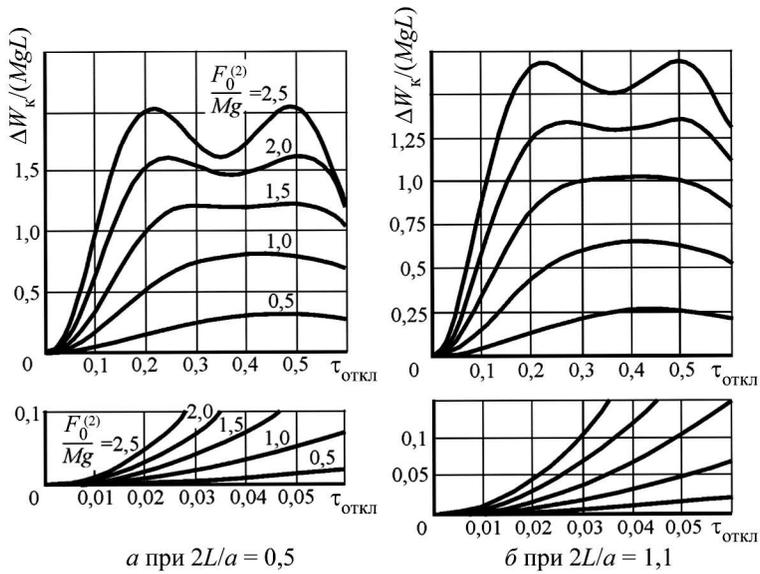
$$\Delta W_{\kappa} = f \left(\frac{F_{\text{расч}}^{(2)}}{Mg}, \frac{L}{a}, \tau_{\text{откл}} \right) - \text{энергия, накопленная проводником}$$

пролета за время короткого замыкания, Дж, и определяемая с использованием рис. 13.17 (где $\tau_{\text{откл}} = t_{\text{откл}}/T_0 = t_{\text{откл}}\omega_0/2\pi$ – относительная продолжительность короткого замыкания в долях от периода собственных колебаний проводника в пролете).

4. Если $t_{\text{откл}} > 0,6(2\pi/\omega_0)$, то горизонтальное смещение проводника также вычисляется по формулам (13.53), однако входящая в них энергия ΔW_{κ} , Дж, приближенно оценивается по одной из формул:

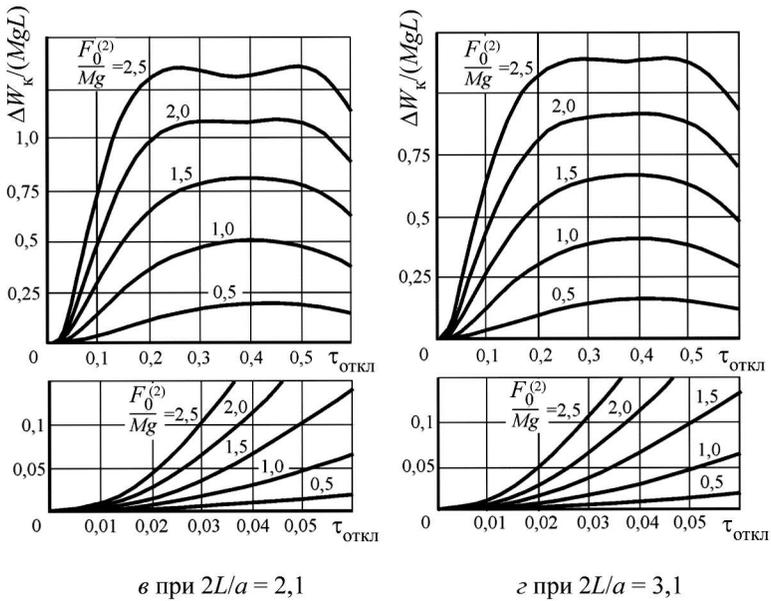
$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\kappa} &= 0,5 F_{\text{расч}}^{(2)} a \ln \frac{a+2L}{a}, && \text{если } 0,5 F_{\text{расч}}^{(2)} a \ln \frac{a+2L}{a} > MgL; \\ \Delta W_{\kappa} &= Mgh, && \text{если } 0,5 F_{\text{расч}}^{(2)} a \ln \frac{a+2L}{a} \leq MgL, \end{aligned} \right\} \quad (13.55)$$

где h – высота подъема проводника над его положением до короткого замыкания, м, которая определяется с использованием рис. 13.18.



а при $2L/a = 0,5$

б при $2L/a = 1,1$



в при $2L/a = 2,1$

г при $2L/a = 3,1$

Рис. 13.17. Характеристики $\Delta W_{\kappa} / (MgL)$ при двухфазном коротком замыкании

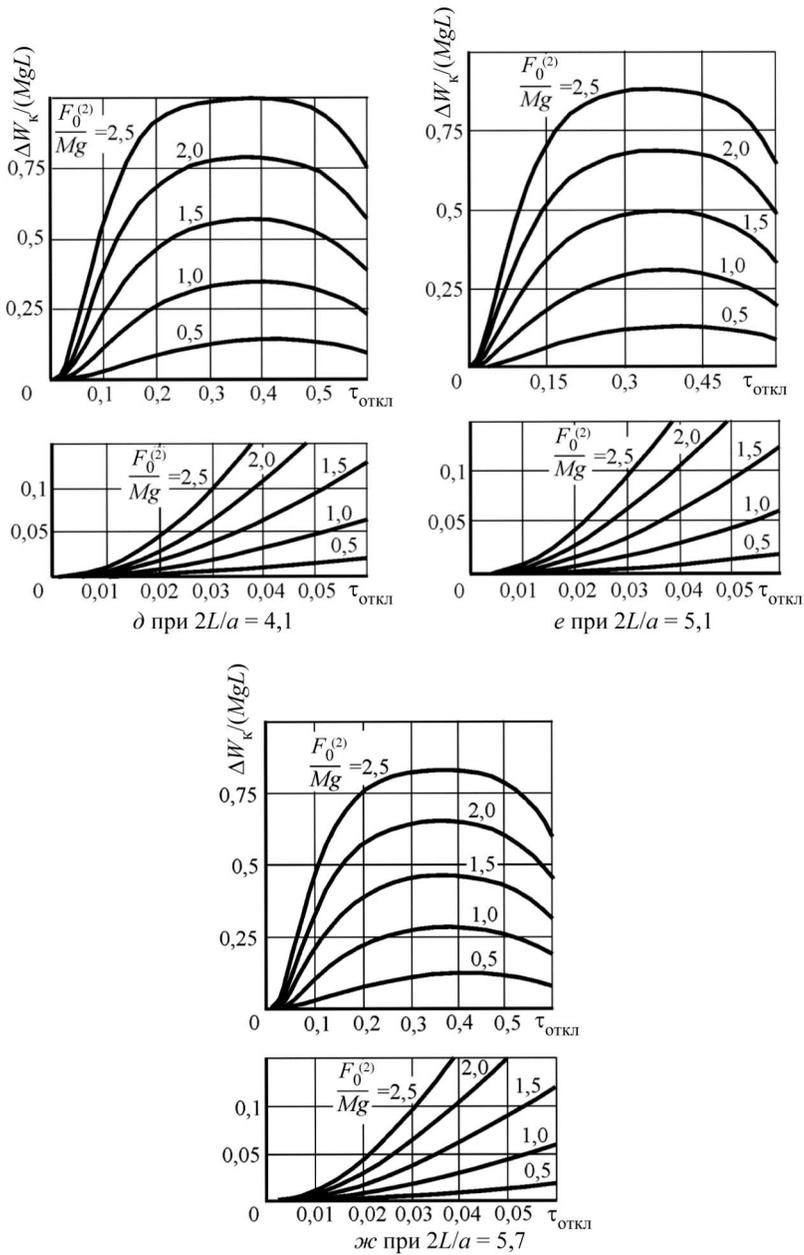


Рис. 13.17. Окончание

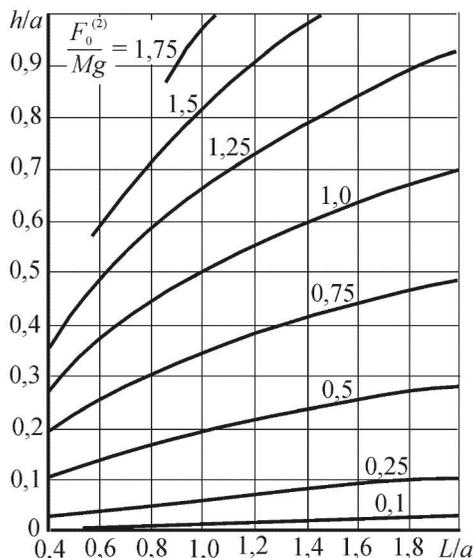


Рис. 13.18. Характеристики $h/a = f(L/a)$ двухфазного короткого замыкания

5. Определяется максимальное сближение проводников (минимальное расстояние между проводниками) по формуле

$$a_{\min} = a - 2(s + r_p), \quad (13.56)$$

где s – найденное максимальное горизонтальное смещение проводника в середине пролета от равновесного положения, а для расщепленных фаз – это горизонтальное смещение оси расчетного одиночного проводника с поперечным сечением, равным сумме сечений всех проводников фазы, в середине пролета; r_p – радиус расщепления фазы, м.

Максимальное тяжение в проводнике $F_{\max f}$ следует определять, полагая, что энергия, накопленная проводником во время короткого замыкания, трансформируется в потенциальную энергию деформации растяжения при падении проводника после отключения короткого замыкания, поднятого электродинамическими силами над исходным равновесным положением. При этом значение $F_{\max f}$ определяется по формуле

$$F_{\max f} = \left(\Delta W_{\kappa} + W_{(0)} \right) \frac{2}{\Delta l_{\text{нр}}}, \quad (13.57)$$

где $W_{(0)} = \frac{1}{2} \frac{F_{(0)}^2 l_{\text{пр}}}{ES}$ – потенциальная энергия деформации проводника

в пролете при тяжении, равном тяжению в нем до короткого замыкания, Дж; $\Delta l_{\text{пр}}$ – удлинение проводника в пролете при усилии в нем,

равном $F_{\text{max}f}$, м; $F_{(0)} = \frac{mg l_{\text{пр}}^2}{8f}$ – тяжение (продольная сила) в провод-

нике до короткого замыкания, Н; $l_{\text{пр}}$ – длина проводника в пролете, м, которую допускается принимать равной длине пролета l ; E – модуль упругости материала проводника, Н/м²; m – погонная масса проводника, кг; S – площадь поперечного сечения проводника, м².

При выполнении условия $t_{\text{откл}} < t_{\text{прел}}$ значение $\Delta W_{\text{к}}$ допускается определять по приближенной формуле

$$\Delta W_{\text{к}} = \frac{\left(F_{\text{расч}}^{(2)} t_{\text{откл}}\right)^2}{2M} \lambda. \quad (13.58)$$

При отсутствии характеристики жесткости проводника $\Delta l = f(F)$ максимально возможное тяжение в проводнике приближенно допускается определять по формуле

$$F_{\text{max}f} = \sqrt{2ES \frac{\Delta W_{\text{к}}}{l} + F_{(0)}^2}, \quad (13.59)$$

где ES – жесткость поперечного сечения проводника при растяжении, Н; E – модуль упругости материала проводника, Н/м²; S – площадь поперечного сечения проводника, м².

Модуль упругости материалов проводника, полученного скручиваем проволоч, следует снижать (вдвое – втрое) по сравнению с модулем упругости материала отдельных проволоч.

Значение нижнего предела максимального тяжения в проводнике $F_{\text{max}2}$ в случае, когда проводник после отключения короткого замыкания (при относительно малом токе) плавно возвращается в исходное положение, совершая затем затухающие (из-за аэродинамического сопротивления атмосферы) колебания, выбирается наибольшим из двух значений силы тяжения F_2 , вычисляемых по формулам:

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= F_{(0)} \sqrt{1 + \left(\frac{F_{\text{расч}}^{(2)}}{Mg}\right)^2}; \\ F_2 &= F_{(0)} \left(1 + 2 \frac{\Delta W_{\text{к}}}{MgL}\right), \end{aligned} \right\} \quad (13.60)$$

при этом траектория движения центра масс проводника близка к окружности.

Влияние гирлянд изоляторов и ответвлений с гибкой ошиновкой приближенно учитывается увеличением погонной силы тяжести и стрелы провеса проводников путем замены в приведенных выше формулах массы проводника M «приведенной» массой $M_{пр} = M\gamma + M_{отв}$ и стрелы провеса f «приведенной» стрелой провеса $f_{пр} = f + l_r \cos \beta$, где γ – коэффициент приведения массы (см. табл. 13.7); $M_{отв}$ – масса отводов в пролете; l_r – длина гирлянды изоляторов; β – угол отклонения натяжных гирлянд от вертикали до короткого замыкания, рад.

Таблица 13.7

Коэффициент приведения массы γ при разных отношениях провеса гирлянды к стреле провеса проводника f_r/f и массы гирлянды к массе проводника в пролете M_r/M

| f_r/f | Значение коэффициента приведения массы γ при различных M_r/M | | | | | | | | |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,50 | 1,00 | 2,00 | 3,00 |
| 0,01 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,003 | 1,005 | 1,006 |
| 0,02 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,004 | 1,007 | 1,010 | 1,012 |
| 0,05 | 1,000 | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,004 | 1,010 | 1,016 | 1,024 | 1,029 |
| 0,10 | 1,000 | 1,001 | 1,002 | 1,004 | 1,008 | 1,019 | 1,031 | 1,048 | 1,058 |
| 0,20 | 1,001 | 1,002 | 1,004 | 1,008 | 1,015 | 1,034 | 1,059 | 1,090 | 1,110 |
| 0,50 | 1,002 | 1,003 | 1,008 | 0,016 | 1,031 | 1,071 | 1,130 | 1,200 | 1,250 |
| 1,00 | 1,002 | 1,005 | 1,012 | 1,024 | 1,048 | 1,110 | 1,200 | 1,330 | 1,430 |
| 2,00 | 1,003 | 1,007 | 1,017 | 1,033 | 1,065 | 1,150 | 1,290 | 1,500 | 1,670 |
| 3,00 | 1,004 | 1,007 | 1,019 | 1,037 | 1,073 | 1,180 | 1,330 | 1,600 | 1,820 |

Примечание. M_r – масса гирлянд (суммарная масса двух натяжных гирлянд у двух опор проводников в пролете или масса одной гирлянды, если на опорах гирлянды подвесные); M – масса проводника в пролете; f – провес гирлянд; f_r – стрела провеса проводника.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

14.1. Постановка задачи

Рост уровней токов короткого замыкания при развитии энергосистем предъявляет повышенные требования в отношении электродинамической и термической стойкости элементов электротехнических устройств энергосистем, а также коммутационной способности электрических аппаратов. В настоящее время весьма актуальны вопросы, связанные с воздействием токов короткого замыкания не только на жесткие шины, кабели и электрические аппараты, но и на генераторы, силовые трансформаторы, а также гибкие проводники электроустановок. Согласно Правилам устройства электроустановок гибкие шины распределительных устройств, а также проводники воздушных линий электропередачи должны проверяться на возможность схлестывания или опасного с точки зрения пробоя сближения фазных проводников в результате их раскачивания под действием электродинамических сил. Рост уровней токов короткого замыкания является одной из основных причин снижения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов.

С целью уменьшения воздействия токов короткого замыкания на электрооборудование используются различные методы и средства ограничения токов короткого замыкания, позволяющие ограничить не только значение тока короткого замыкания, но продолжительность его протекания.

В общем случае решение указанной задачи возможно следующими путями:

- ▶ повышением быстродействия традиционной коммутационной аппаратуры;
- ▶ созданием и использованием новых сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов, способных в течение первого полупериода (безынерционно) ограничить и отключить ток короткого замыкания;
- ▶ использованием безынерционных и инерционных токоограничивающих устройств (ТОУ).

При использовании в сети быстродействующих четырехпериодных выключателей отключение короткого замыкания в зависимости от быстродействия релейной защиты происходит в момент восьмого или девятого перехода тока через нулевое значение. Внедрение двухпериодных выключателей позволяет отключить короткие замыкания в момент четвертого или пятого перехода тока через нулевое значение. Использование синхронизированных или тиристорных выключателей с естественной коммутацией позволяет отключить короткое замыкание в момент первого перехода тока через нулевое значение. Как видно, переход от четырех- к двухпериодным, а затем и к синхронизированным выключателям позволяет снизить термическое воздействие тока короткого замыкания на электрооборудование, но не ограничивает максимальное электродинамическое воздействие, определяемое ударным током короткого замыкания; последний в указанных случаях не ограничивается.

Электродинамическое воздействие тока короткого замыкания можно снизить путем использования токоограничивающих коммутационных аппаратов. Таковыми могут быть, например, тиристорные выключатели с принудительной коммутацией, ограничители ударного тока взрывного действия и токоограничивающие предохранители. Использование указанных аппаратов позволяет ограничить, а затем отключить ток короткого замыкания еще до момента первого перехода тока через нулевое значение. Термическое и электродинамическое воздействие тока короткого замыкания можно снизить путем использования безынерционных токоограничивающих устройств (БТОУ), таких как реакторы, резонансные токоограничивающие устройства и т.п. В ряде случаев для уменьшения термического воздействия тока короткого замыкания и облегчения условий работы коммутационной аппаратуры могут быть использованы также инерционные токоограничивающие устройства, например устройство автоматического деления сети или устройство, состоящее из реактора, нормально зашунтированного выключателем. Очевидно, наибольшее ограничение воздействия тока короткого замыкания достигается при использовании безынерционных токоограничивающих коммутационных аппаратов.

14.2. Классификация методов и средств ограничения токов короткого замыкания

Для ограничения токов короткого замыкания на электростанциях и в сетях энергосистем используются следующие основные методы:

- ▶ оптимизация структуры и параметров сети (схемные решения);
- ▶ стационарное или автоматическое деления сети;
- ▶ использование токоограничивающих устройств;

- оптимизация режима заземления нейтралей силовых элементов электрических сетей;
- изменение схем электрических соединений обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

В качестве средств ограничения токов короткого замыкания используются или могут быть использованы:

- устройства автоматического деления сети;
- токоограничивающие реакторы (неуправляемые и управляемые, с линейной или с нелинейной характеристикой);
- трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения;
- трансформаторы с повышенным напряжением короткого замыкания;
- безынерционные токоограничивающие устройства различного типа (резонансные, реакторно-вентильные, со сверхпроводящими элементами и т.п.);
- токоограничивающие коммутационные аппараты;
- токоограничивающие резисторы;
- вставки постоянного тока;
- вставки переменного тока непрямоугольной частоты;
- автотрансформаторы, нормально выполненные без обмотки низшего напряжения, соединенной в треугольник;
- разземление нейтралей части трансформаторов, установленных в сети;
- заземление нейтралей части трансформаторов и автотрансформаторов через реакторы, резисторы или иные токоограничивающие устройства;
- замена на связях распределительных устройств различного напряжения автотрансформаторов на трансформаторы;
- автоматическое размыкание в аварийных режимах обмоток низшего напряжения автотрансформаторов, соединенных в треугольник;
- специальные схемы соединения обмоток трансформаторов, включенных с генераторами по блочной схеме.

В зависимости от местных условий, требуемой степени ограничения токов при коротких замыканиях разных видов, а также от технико-экономических показателей для ограничения токов короткого замыкания в конкретных электроустановках или в конкретных сетях энергосистемы необходимы различные средства токоограничения или их комбинации, дающие наибольший технико-экономический эффект.

В настоящее время в отечественных энергосистемах для ограничения токов короткого замыкания наиболее часто используются стационарное и автоматическое деление сети, токоограничивающие реакторы, трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также разземление нейтралей части силовых трансформаторов сети, их заземление через реакторы и резисторы.

14.3. Схемные решения

Схемные решения принимаются, как правило, на стадии проектирования схем развития энергосистем, а также при проектировании мощных электростанций и схем развития сетей повышенного напряжения. Они предусматривают изменение степени связи (или жесткости) электрических связей между сетями. Схемные решения состоят в выборе оптимальных (при поставленных условиях и ограничениях) схем выдачи мощности электростанций, структуры и параметров элементов сетей энергосистем. Они включают в себя также решение вопроса об укрупнении или разукрупнении мощностей электростанций и подстанций.

Схемные решения в первую очередь касаются принципиальных схем выдачи мощности электростанций. В связи с вводом в энергосистемах генераторов мощностью 300 – 1200 МВт и укрупнением единичных мощностей электростанций до 3600 – 6400 МВт произошел вынужденный переход от схемы выдачи мощности, показанной на рис. 14.1,*а*, к схеме рис. 14.1,*б*, а затем к схеме рис. 14.1,*в*.

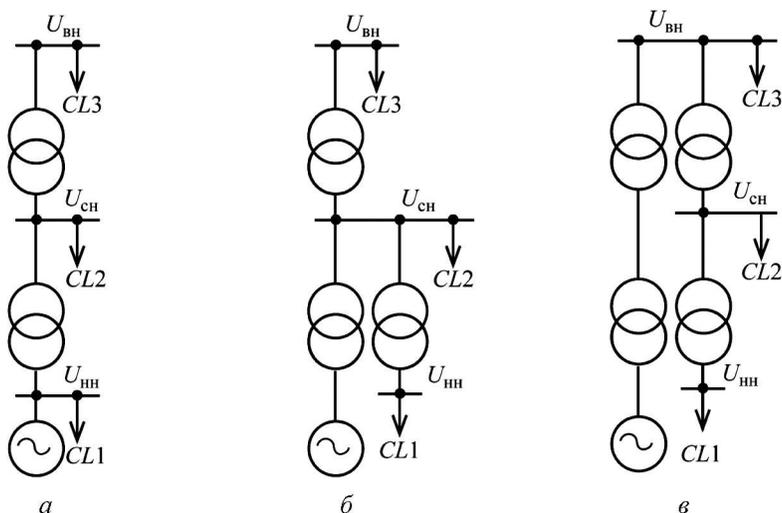


Рис. 14.1. Принципиальные схемы (а – в) выдачи мощности электростанций

При схеме, показанной на рис. 14.1,*а*, характерной для электростанций типа ТЭЦ с генераторами мощностью до 100 МВт, возникали значительные трудности с ограничением токов короткого замыкания в сетях низшего и среднего напряжения. При схеме, показанной на рис. 14.1,*б*, характерной для блочных электростанций с генераторами мощностью 100 – 300 МВт, наибольший рост уровней токов короткого замыкания наблюдается в сети среднего напряже-

ния, меньший – в сети высшего напряжения; в сети же низшего напряжения уровень токов короткого замыкания стабилизируется. При схеме, приведенной на рис. 14.1,в, характерной для блочных электростанций с генераторами мощностью 500 – 1200 МВт, наибольший рост уровней токов короткого замыкания наблюдается в сети высшего напряжения (500 – 750 кВ), меньший – в сети среднего напряжения и еще меньший – в сети низшего напряжения. Таким образом, изменение схемы выдачи мощности электростанций приводит к изменению темпа роста уровней токов короткого замыкания в сетях различного напряжения энергосистем. При этом в сетях более низкого напряжения могут быть образованы регионы со стабильным наибольшим уровнем токов короткого замыкания.

Эффективным схемным решением, ограничивающим рост уровней токов короткого замыкания, является оптимизация структуры сети. Для каждой структуры с учетом параметров элементов сети при прочих равных условиях (площадь электроснабжения, суммарная нагрузка, подключенная мощность генерирующих источников) характерны значение наибольшего уровня токов короткого замыкания, кривая распределения уровней токов короткого замыкания по узлам сети и темп роста уровней токов короткого замыкания при развитии сети. Схемные решения могут предусматривать:

- ▶ выделение территорий (регионов) с сетями одного напряжения, но связанными между собой через сеть повышенного напряжения (рис. 14.2,а), – так называемое периферийное или продольное разделение сетей;

- ▶ наложение сетей одного и того же напряжения на площади данного региона со связью этих сетей через сеть повышенного напряжения (рис. 14.2,б) – так называемое местное или поперечное разделение сетей. Такое решение позволяет при значительном росте нагрузки иметь сети со стабильным наибольшим уровнем токов короткого замыкания;

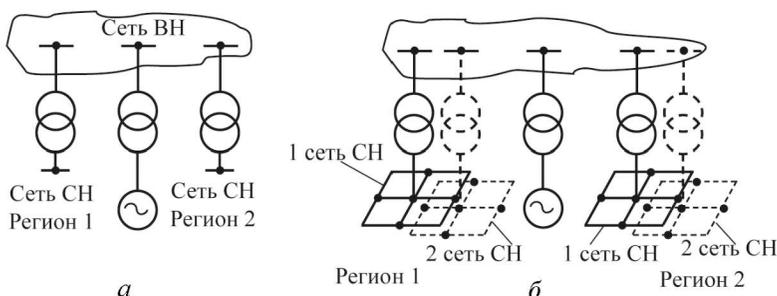


Рис. 14.2. Варианты схемных решений:

а – продольное разделение сетей; *б* – поперечное разделение сетей

- разукрупнение электростанций (по мощности);
- разукрупнение узлов сети (по генерируемой мощности), в частности, разделение распределительных устройств повышенного напряжения мощных электростанций на самостоятельные части с обеспечением параллельной работы через узловые подстанции сети, а также перевод части блоков электростанций на сети более высокого напряжения;
- использование схем удлиненных блоков генератор – трансформатор – линия.

14.4. Деление сети

Возможность деления сети используют в процессе эксплуатации, когда требуется ограничить рост уровней токов короткого замыкания при развитии энергосистем. Различают деление сети стационарное (СДС) и автоматическое (АДС).

Стационарное деление сети – это деление сети в нормальном режиме, осуществляемое с помощью секционных, шиносоединительных или линейных выключателей мощных присоединений электроустановок. В последнем случае деление сети связано с выведением из работы соответствующих линий электропередачи или автотрансформаторов связи, т.е. с замораживанием инвестиций. Стационарное деление сети производят тогда, когда наибольший уровень тока короткого замыкания в данной сети или уровень тока короткого замыкания в конкретном узле сети превышает допустимый с точки зрения параметров установленного оборудования. Рост наибольшего уровня тока короткого замыкания в сети при этом в принципе происходит так, как показано на рис. 14.3,а, где показаны рост тока короткого замыкания $I_{к.нб}$ при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) деления сети, рост числа точек деления сети $n_{дел}$, а также допустимые в данной сети по параметрам оборудования предельные уровни тока короткого замыкания. Уровень Б, более высокий, чем уровень А, обусловлен заменой или модернизацией во времени оборудования сети. На рис. 14.3,б показан рост уровней токов трехфазного и однофазного коротких замыканий в сетях 110 и 220 кВ одной из энергосистем без деления (кривая 1) и после деления (кривые 2) сети. Как видно, принятое деление сети позволило снизить наибольший уровень тока трехфазного короткого замыкания в сети 110 кВ практически в 2 раза по сравнению с соответствующим уровнем в сети без деления.

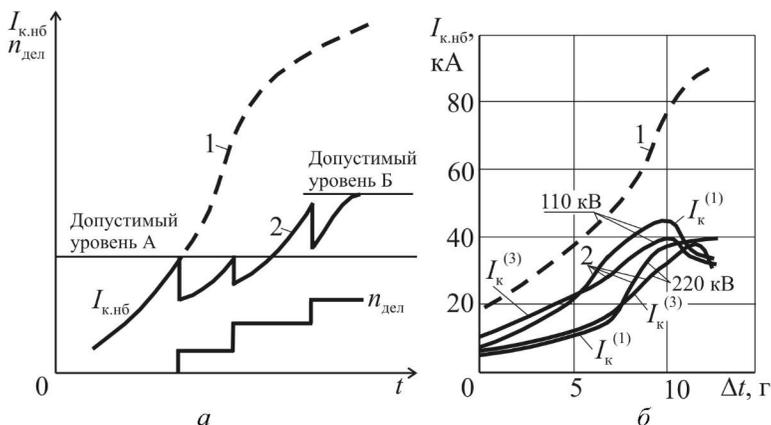


Рис. 14.3. Динамика изменения наибольших уровней токов короткого замыкания $I_{к.лб}$ в сетях при стационарном делении сети в $n_{дел}$ точках:

a – принципиальные характеристики;

б – изменение наибольших уровней токов короткого замыкания в сетях 110 – 220 кВ энергосистемы: 1 – без деления; 2 – с делением

На подстанциях и электростанциях, имеющих распределительные устройства генераторного напряжения, деление может осуществляться как в сети высшего, так и в сети низшего напряжения. Это зависит от того, в сети какого напряжения требуется и имеется возможность снизить уровень тока короткого замыкания.

На блочных электростанциях деление сети осуществляют в распределительных устройствах повышенного напряжения. В зависимости от требуемой степени токоограничения принимают тот или иной вариант деления сети. На рис. 14.4 – 14.6 приведены возможные варианты деления сети на блочных электростанциях, имеющих соответственно одно, два и три распределительных устройства повышенных напряжений. На схеме рис. 14.4,б показано деление распределительного устройства рис. 14.4,а на две части, а на рис. 14.4,в – схема с удлиненными блоками. На рис. 14.5 показано деление сети путем разрыва автотрансформаторной связи между распределительными устройствами двух повышенных напряжений (сравни рис. 14.5,а и 14.5,б). На рис. 14.6 показано деление сети путем разрыва автотрансформаторных связей между тремя распределительными устройствами повышенных напряжений (сравни рис. 14.6,а и 14.6,б). Следует отметить, что деление сети оказывает существенное влияние на режимы, устойчивость и надежность работы электростанций и энергосистем, а также на потери мощности и энергии в сетях. Поэтому делению сети должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ возможных вариантов деления.

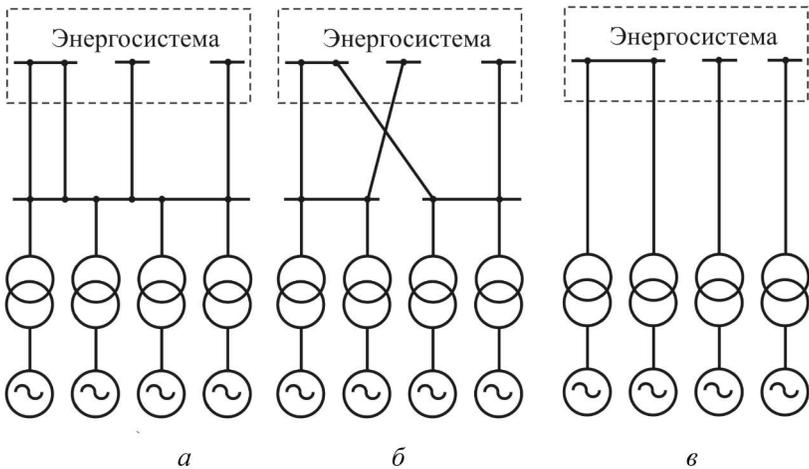


Рис. 14.4. Деление сети на электростанции с одним распределительным устройством повышенного напряжения:

a – исходная схема; *б* – деление распределительного устройства на две части; *в* – схема с удлиненными блоками

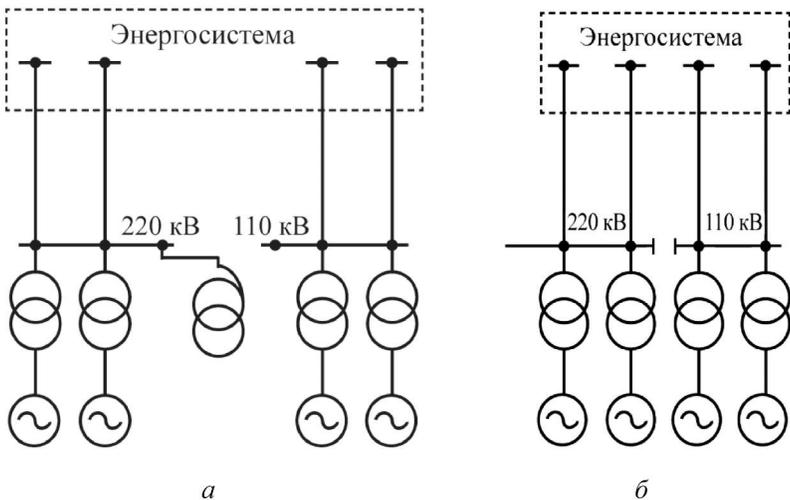
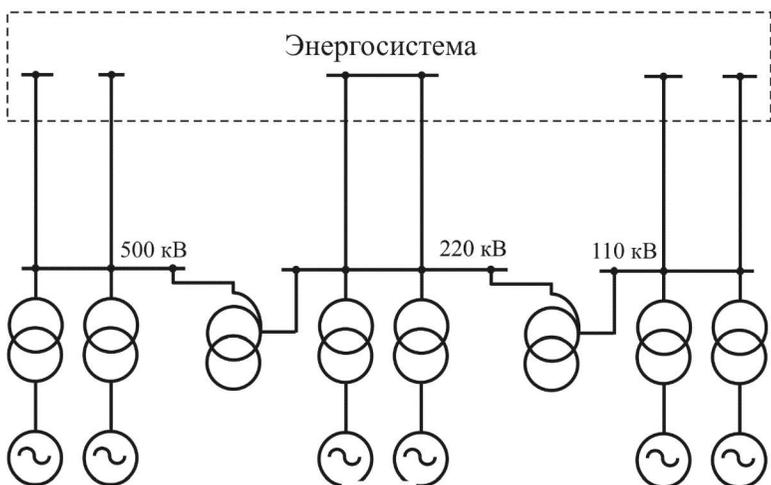
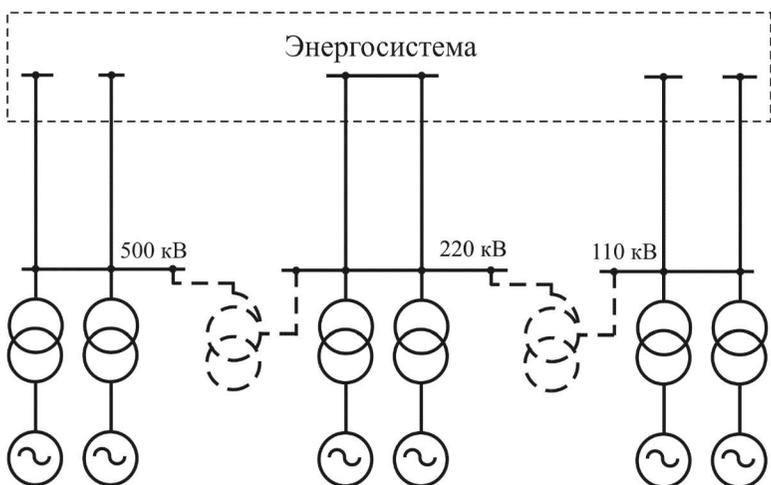


Рис. 14.5. Деление сети на электростанции с двумя распределительными устройствами повышенного напряжения:
a – исходная схема; *б* – разрыв автотрансформаторной связи между распределительными устройствами двух повышенных напряжений



a



б

Рис. 14.6. Деление сети на электростанции с тремя распределительными устройствами повышенного напряжения:

a – исходная схема; *б* – разрыв автотрансформаторных связей между тремя распределительными устройствами повышенных напряжений

Другой вид деления сети – автоматический (АДС). Обычно АДС осуществляется в аварийном режиме с целью облегчить работу коммутационных аппаратов при отключении ими поврежденной це-

пи. Оно выполняется на секционных или шиносоединительных выключателях, реже – на выключателях мощных присоединений. При повреждении на присоединении распределительного устройства (на линии) сначала отключается шиносоединительный выключатель, затем линейный выключатель и осуществляется цикл автоматического повторного включения (АПВ).

При автоматическом делении сети отключается значительно меньший ток, чем полный ток короткого замыкания в поврежденной цепи. Поэтому эта операция не встречает затруднений. Однако вся система каскадного отключения токов короткого замыкания с применением устройств АДС имеет ряд недостатков:

- требуется, чтобы выключатели присоединений были способны выдержать полный сквозной ток короткого замыкания и включиться без повреждения на короткое замыкание в своей цепи. Это требует изменения координации номинальных параметров выключателей в соответствии с выражениями:

$$I_{\text{пр.с.кв}} = I_{\text{вкл.ном}}; \quad (14.1)$$

$$i_{\text{пр.с.кв}} = i_{\text{вкл.ном}}; \quad (14.2)$$

- в результате деления возможно появление в послеаварийном режиме существенного небаланса мощностей источников энергии и нагрузки в разделившихся частях сети, что влияет на устойчивость и надежность работы энергосистемы;

- время восстановления нормального режима весьма значительно и достигает 5 – 10 с.

В целом устройства АДС относительно дешевы, просты и надежны. Поэтому они нашли достаточно широкое применение в энергосистемах.

14.5. Общие требования к токоограничивающим устройствам

Короткие замыкания сопровождаются появлением значительных токов, снижением напряжения в узлах сети и сбросом активной нагрузки генераторами электростанций. С учетом этого к токоограничивающим устройствам (ТОУ) предъявляются следующие общие требования:

- ограничивать значения токов короткого замыкания до заранее установленного уровня;

- поддерживать на возможно более высоком уровне напряжение в узлах сети;

- уменьшать по возможности сброс активной нагрузки с генераторов электростанций;

- не оказывать существенного влияния на нормальный режим работы сети;
- обеспечивать в аварийном режиме условия для селективного действия чувствительной релейной защиты сети;
- не вносить существенных нелинейных искажений в параметры режима сети, особенно при нормальном режиме ее работы;
- иметь стабильные характеристики при изменении схемы сети.

Таким образом для удовлетворения перечисленных выше общих требований и условий токоограничивающее устройство должно обладать нелинейной характеристикой.

14.6. Токоограничивающие реакторы

Токоограничивающие реакторы могут иметь различные устройство и конструктивное исполнение, а также технические и технико-экономические характеристики и параметры. Такие реакторы можно классифицировать по разным признакам. Они бывают:

- с линейной, нелинейной и ограниченно-линейной или квазилинейной характеристикой;
- без магнитопровода и с магнитопроводом;
- со стержневой, броневой, бронестержневой, тороидальной, цилиндрической и навитой магнитной системой (магнитопроводом);
- нерегулируемые, регулируемые, управляемые, насыщающиеся;
- с продольным, поперечным и кольцевым подмагничиванием;
- с масляной или сухой изоляцией;
- секционные, линейные и заземляющие;
- одинарные и сдвоенные.

В настоящее время в энергосистемах для ограничения токов короткого замыкания используются только нерегулируемые реакторы с линейной характеристикой. В сетях 6 – 110 кВ применяются одинарные и сдвоенные реакторы, а в сетях 220 кВ и выше – масляные реакторы.

Реакторы с линейной характеристикой

Характерными параметрами таких реакторов являются номинальное напряжение $U_{ном}$, номинальный ток $I_{ном}$ и сопротивление реактора X_{LR} (в омах или в процентах).

Возможные схемы включения линейных и секционных реакторов приведены на рис. 14.7.

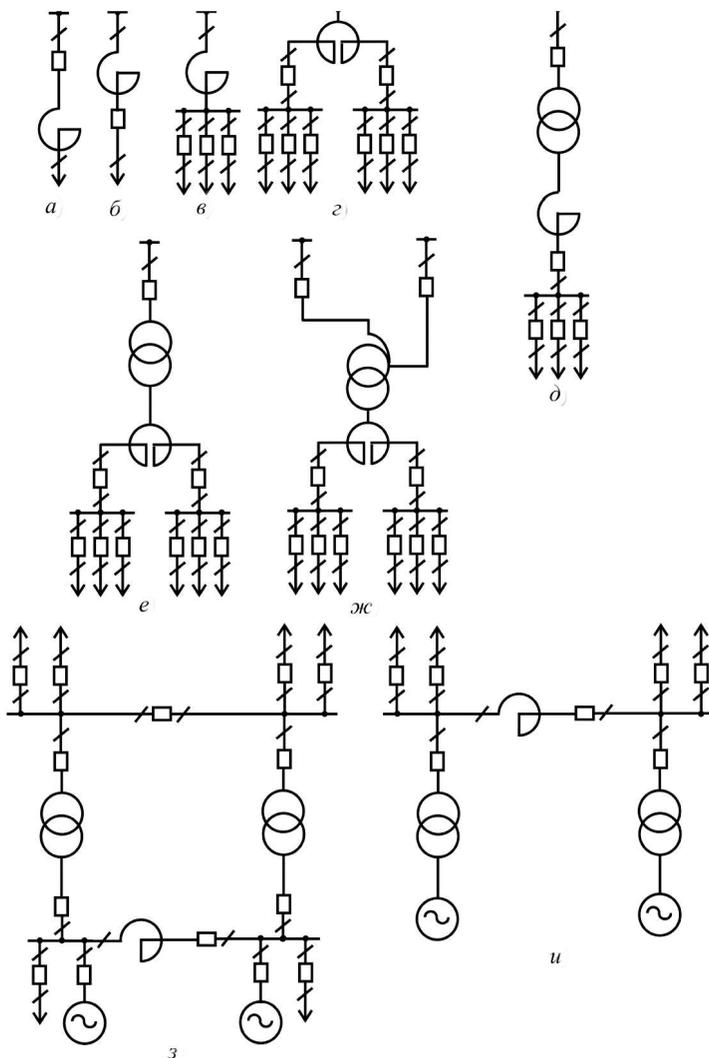


Рис. 14.7. Возможные схемы включения линейных и секционных реакторов

Токоограничивающее действие реактора, характеризуемое его сопротивлением, прямо пропорционально относительной реактивности $X_{LR(\text{НОМ})}$ и обратно пропорционально номинальному току реактора $I_{\text{НОМ}}$, т.е.

$$X_{LR} = \frac{X_{LR}(\%)U_{\text{НОМ}}}{100\sqrt{3}I_{\text{НОМ}}} = X_{*LR(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}I_{\text{НОМ}}}. \quad (14.3)$$

Характерные зависимости для реактора представлены на рис. 14.8.

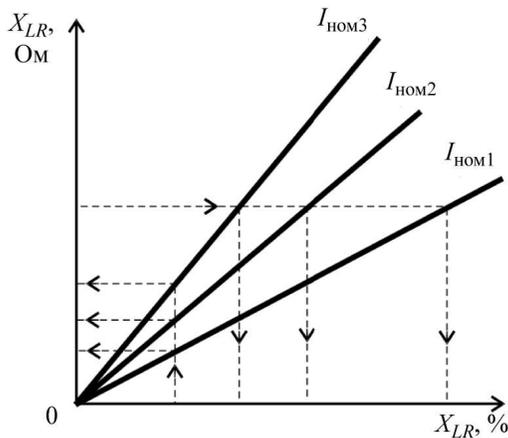


Рис. 14.8. Токоограничивающее действие реакторов с различным номинальным током ($I_{НОМ1} > I_{НОМ2} > I_{НОМ3}$)

Линейный реактор, включаемый последовательно в соответствующую линию (присоединение), ограничивает ток короткого замыкания и поддерживает относительно высокий уровень остаточного напряжения в узлах предвключенной сети. Однако в нем в нормальном режиме имеют место потери активной $\Delta P_{LRнорм}$ и реактивной мощности $\Delta Q_{LRнорм}$, потери энергии $\Delta W_{LRнорм}$, а также падение и потеря напряжения. Применительно к схеме, показанной на рис. 14.9,а, справедливы соотношения:

отношение токов при коротких замыканиях в точках $K2$ и $K1$

$$\frac{I_{K2}}{I_{K1}} = \frac{1}{1 + X_{LR}/X_{GL}}; \quad (14.4)$$

остаточное напряжение на шинах при коротком замыкании в точке $K2$

$$U_{ш.ост} = \sqrt{3}I_K X_{LR} = \frac{E_{GS}}{1 + X_{GL}/X_{LR}}; \quad (14.5)$$

падение напряжения в реакторе в нормальном режиме при токе нагрузки I_{CL}

$$\Delta U_{LRнорм} = \sqrt{3}I_{CL} X_{LR} \sin\varphi_{CL}; \quad (14.6)$$

потери активной мощности в реакторе в нормальном режиме при токе нагрузки I_{CL}

$$\Delta P_{LR\text{норм}} = 3I_{CL}^2 R_{LR} = 3\Delta P_{LR\text{норм}} (I_{CL}/I_{\text{ном}})^2; \quad (14.7)$$

потери реактивной мощности и энергии в реакторе в нормальном режиме

$$\Delta Q_{LR\text{норм}} = 3I_{CL}^2 X_{LR}; \quad (14.8)$$

$$\Delta W_{LR\text{норм}} = 3I_{CL\text{max}}^2 R_{LR} \tau, \quad (14.9)$$

где $U_{\text{ш.ост}}$ – остаточное напряжение на шинах; R_{LR} – активное сопротивление реактора; τ – время максимальных потерь.

Зависимости отношений $U_{\text{ш}}/U_{\text{ш.ост}}$ и I_{K1}/I_{K2} от относительного сопротивления реактора представлены на рис. 14.9,б.

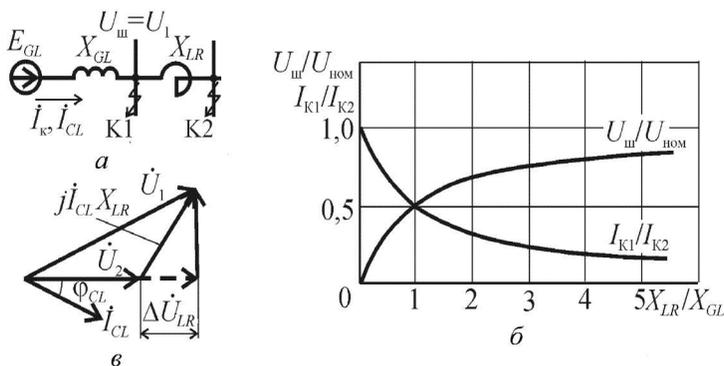


Рис. 14.9. Условия работы линейного реактора:

а – поясняющая схема; *б* – токоограничивающее действие реактора; *в* – векторная диаграмма

В отношении потерь напряжения и реактивной мощности лучшими характеристиками обладают сдвоенные реакторы, т.е. реакторы с выведенной центральной точкой обмотки (см. рис. 14.7,з, е, ж). Наличие магнитной связи между ветвями реактора позволяет уменьшить потерю напряжения в реакторе в нормальном режиме без снижения токоограничивающей способности при коротком замыкании в сети. Коэффициент магнитной связи идентичных ветвей обмотки реактора обычно составляет $K_{\text{св}} = 0,4 - 0,6$.

Секционные реакторы ввиду особенностей схемы их включения (см. рис. 14.7,з и 14.7,и) оказывают при прочих равных условиях меньшее токоограничивающее действие, чем линейные реакторы. Кроме того, они имеют, как правило, значительный номинальный ток по условиям обеспечения необходимых перетоков мощности в послеаварийных и ремонтных режимах; это также снижает их токоограничивающее действие.

В отличие от линейных реакторов для секционных реакторов характерны небольшие потери мощности, энергии и напряжения в нормальном режиме работы электроустановки.

Реакторы с нелинейной характеристикой

К реакторам с нелинейной характеристикой относятся управляемые и насыщающиеся реакторы. Управляемые реакторы – это регулируемые реакторы со сталью, изменение параметров которых осуществляется за счет подмагничивания магнитопровода (обычно магнитным полем постоянного или выпрямленного тока). Различают управляемые реакторы с продольным, поперечным и кольцевым подмагничиванием. Путем специальной схемы соединения обмоток или их соответствующего взаимного расположения в указанных реакторах обеспечивается развязка индуктивных связей цепей постоянного и переменного токов. Реакторы с кольцевым подмагничиванием обладают, кроме того, магнитной симметрией, что позволяет получить практически синусоидальный (без гармоник) ток при широком диапазоне изменения тока подмагничивания.

У управляемых реакторов различают коэффициент регулирования $K_{\text{рег}}$ и коэффициент токоограничения $K_{\text{то}}$. Первый характеризует степень снижения сопротивления реактора за счет подмагничивания при номинальном токе в обмотке переменного тока, а второй – степень увеличения сопротивления реактора при расчетном токе короткого замыкания в цепи по сравнению с сопротивлением реактора в нормальном режиме при номинальном токе в обмотке переменного тока и соответствующем токе подмагничивания в обмотке постоянного тока. Управляемые реакторы различных типов и конструкций имеют $K_{\text{рег}} \approx 8 - 10$ и $K_{\text{то}} \approx 4 - 7$.

Насыщающийся реактор – это неуправляемый реактор с нелинейной характеристикой (со сталью), нелинейность которой обусловлена насыщением магнитной системы или ее части магнитным полем обмотки переменного тока. Реактор состоит из магнитопровода (замкнутого или с воздушными зазорами) той или иной конструкции и посаженной на него обмотки переменного тока. Сопротивление реактора нелинейно зависит от тока его обмотки. При отсутствии воздушных зазоров эта зависимость подобна зависимости $\mu = f(H)$.

14.7. Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения

На электрических станциях и подстанциях нашли применение силовые трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, так как это позволяет существенно

снизить ток короткого замыкания в сети низшего напряжения. Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения используются для формирования укрупненных блоков электростанций, особенно на ГЭС, а понижающие трансформаторы и автотрансформаторы применяются на подстанциях энергосистем и промышленных предприятий; понижающие трансформаторы используются также в системе собственных нужд мощных тепловых и атомных электростанций. Для указанных трансформаторов и автотрансформаторов специфическими являются параметры:

- сопротивление расщепления $X_{\text{расщ}}$, равное сопротивлению между выводами двух произвольных частей расщепленной обмотки. Обычно части расщепленной обмотки полностью идентичны и поэтому

$$X_{\text{расщ}} = X_{\text{Н1-Н2}} = X_{\text{Н1-Н3}} = X_{\text{Н2-Н3}};$$

- сквозное сопротивление $X_{\text{скв}}$, равное сопротивлению между выводами обмотки высшего напряжения (или объединенными выводами обмоток высшего и среднего напряжения) и объединенными выводами частей расщепленной обмотки низшего напряжения;

- коэффициент расщепления $K_{\text{расщ}}$, равный отношению сопротивления расщепления к сквозному сопротивлению:

$$K_{\text{расщ}} = X_{\text{расщ}}/X_{\text{скв}}.$$

14.8. Вставки постоянного тока и переменного тока непромышленной частоты

Сети переменного тока энергосистем могут иметь вставки постоянного тока или переменного тока непромышленной частоты. Вставка постоянного тока (см. рис. 14.10,а) содержит выпрямитель, инвертор, линию постоянного тока L , а также трансформаторы $T1$ и $T2$ соответственно выпрямителя и инвертора.

Вставки предназначены для связи узлов сетей с одинаковыми или различными частотами (например, 50 и 60 Гц). Нормально вставки постоянного тока выполняют функции транспортных линий электропередачи, развязывая в то же время объединяемые подсистемы при возникновении в них переходных процессов. В отдельных частных случаях, если это экономически оправдано, вставки постоянного тока могут иметь короткие линии электропередачи и выполнять не столько транспортные функции, сколько функции элементов, связывающих сети различных частот, и функции ТООУ. При наличии вставки постоянного тока ток короткого

замыкания в точке К1 на стороне выпрямителя (см. рис. 14.10,*а*) определяется только параметрами примыкающей системы *GS1*. А со стороны вставки постоянного тока ток отсутствует. При коротком замыкании в точке К2 на стороне инвертора ток в месте короткого замыкания определяется в основном параметрами системы *GS2*, так как ток со стороны вставки постоянного тока не превышает ее номинального нагрузочного тока.

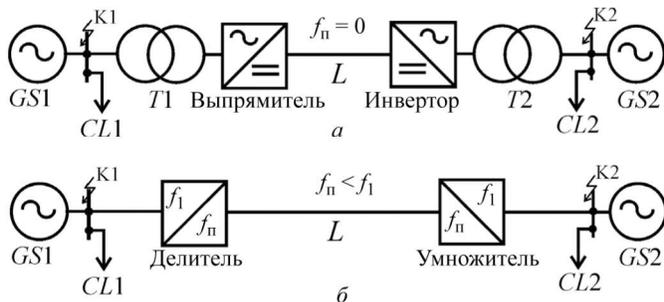


Рис. 14.10. Вставки постоянного и переменного токов:
а – вставка постоянного тока;
б – вставка переменного тока непромышленной частоты

Область и масштабы использования вставок постоянного тока в основном лимитируются их технико-экономическими характеристиками и эксплуатационной надежностью. Стоимость вставок в значительной мере определяется высокой стоимостью выпрямительных и инверторных подстанций. Эти же элементы доминируют и в формировании эксплуатационной надежности.

Вставки переменного тока непромышленной частоты (рис. 14.10,*б*) предназначены для связи узлов сетей промышленной частоты. Нормально они выполняют функции высоконагруженных протяженных транспортных линий электропередачи и развязывающих элементов энергосистем. В отдельных случаях, если это экономически обосновано, они могут иметь короткие линии электропередачи и выполнять функции токоограничивающих устройств.

Вставка переменного тока непромышленной частоты содержит ферромагнитный преобразователь (делитель) частоты, линию электропередачи *L*, а также ферромагнитный преобразователь (умножитель) частоты. Частота передачи $f_n = 25$ Гц. Вставка является нереверсивной по режиму передачи мощности и в этом отношении подобна линии с односторонним питанием. При коротком замыкании в точке К1 ток в месте короткого замыкания определяется только параметрами системы *GS1*, а при коротком замыкании в точке К2 – только параметрами системы *GS2*. Вставки непромыш-

ленной частоты в принципе могут иметь предпочтение перед вставками постоянного тока, поскольку стоимость ферромагнитных преобразователей частоты ниже стоимости выпрямительных и инверторных подстанций.

14.9. Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками

Еще в начале XX в. было обнаружено, что некоторые материалы при температурах, близких к абсолютному нулю (при температуре жидкого тела 4,2 К), становятся сверхпроводниками, т.е. имеют практически нулевое электрическое сопротивление. Однако это явление наблюдается только в зоне, где напряженность магнитного поля H на поверхности сверхпроводника меньше критической напряженности поля $H_{кр}$ при данной температуре ϑ . Последняя должна быть меньше критической температуры $\vartheta_{кр}$, являющейся высшей температурой сверхпроводящего состояния. Экспериментально установлено, что зона сверхпроводящего состояния указанных материалов ограничивается осями координат $H - \vartheta$ и кривой, описываемой выражением

$$H_{кр} = H_0 [1 - (\vartheta/\vartheta_{кр})^2],$$

где H_0 – критическая напряженность магнитного поля при температуре, равной абсолютному нулю.

Изменяя напряженность магнитного поля на поверхности сверхпроводника или его температуру (или то и другое), сверхпроводник можно перевести из сверхпроводящего в резистивное состояние. Такой перевод может быть осуществлен практически мгновенно, что позволяет явление сверхпроводимости материалов принципиально использовать для ограничения токов короткого замыкания в сетях. Принципиально важной характеристикой сверхпроводника является его свойство естественного перехода из состояния сверхпроводимости в нормальное состояние без каких-либо внешних управляющих сигналов, а только за счет увеличения протекающего по нему мгновенного тока сверхкритического значения, что позволяет создать надежное токоограничивающее устройство, не имеющее никаких внешних управляющих систем.

В ряде стран были разработаны опытные ограничители токов короткого замыкания, использующие явление низкотемпературной сверхпроводимости, но эти установки оказались весьма дорогими из-за высокой стоимости охлаждающего элемента.

Появление высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) дает возможность создать на их основе токоограничивающие устройства нового поколения, которые одновременно с функцией токоограничения обеспечивают быстрое отключение тока (за время менее полупериода частоты сети).

Принципиальные схемы токоограничивающих устройств со сверхпроводниками (СП) приведены на рис. 14.11.

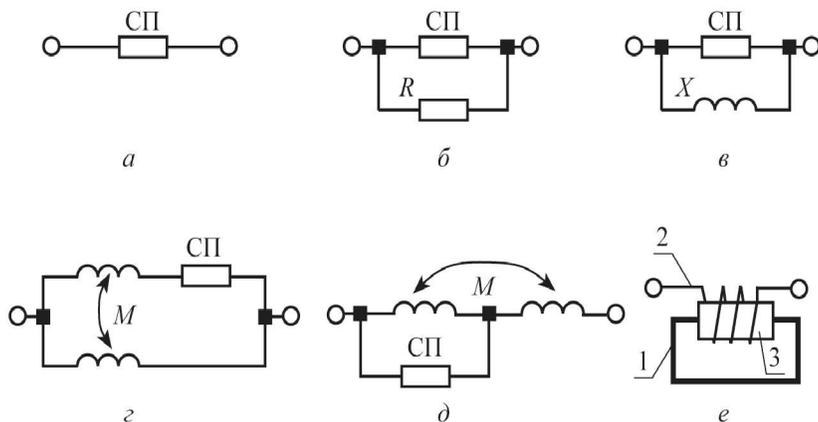


Рис. 14.11. Токоограничивающие устройства со сверхпроводниками:

1 – магнитопровод; 2 – сетевая обмотка; 3 – экранирующий сверхпроводящий цилиндр (набор сверхпроводящих дисков)

На схеме рис. 14.11,*а* показан сверхпроводящий элемент без внешнего управления (элемент резистивного типа). Этот элемент может быть включен либо в защищаемую линию, либо, что целесообразнее, в цепь секционного (шиносоединительного) выключателя распределительного устройства. При коротком замыкании в сети, когда ток в цепи СП становится больше критического (т.е. больше тока, соответствующего критической напряженности магнитного поля $H_{кр}$), сверхпроводник переходит в резистивное состояние, ограничивая ток короткого замыкания. Окончательно цепь отключается силовым выключателем. Более совершенными являются схемы, представленные на рис. 14.11,*б* – *д*, где СП выполняет функции коммутационного аппарата. В схеме на рис. 14.11,*б* СП дешунтирует силовой резистор, а в схеме на рис. 14.11,*в* – силовой реактор. В схеме на рис. 14.11,*г* СП «отключает» одну из ветвей сдвоенного реактора, а в схеме на рис. 14.11,*д* дешунтирует ветвь сдвоенного реактора. На рис. 14.11,*е* представлена схема токоограничивающего устройства, использующего экранирующий эффект сверхпроводников.

14.10. Ограничение токов короткого замыкания на землю

Для ограничения токов короткого замыкания на землю в сетях напряжением 110 – 750 кВ целесообразно увеличивать эквивалентное сопротивление нулевой последовательности относительно точки короткого замыкания. При этом наиболее логичным представляется увеличение сопротивления тех ветвей, которые являются наиболее специфичными с точки зрения циркуляции токов нулевой последовательности. Такими ветвями являются цепи заземления нейтралей трансформаторов и автотрансформаторов и обмотки низшего напряжения автотрансформаторов, соединенные в треугольник. Изменение способа заземления нейтралей трансформаторов приводит к изменению режима заземления соответствующей сети и к изменению условий работы изоляции трансформаторов при коммутационных и атмосферных перенапряжениях, а также при возникновении в сети короткого замыкания на землю.

При коротком замыкании на землю одной или двух фаз трехфазной сети, если нейтрали не всех трансформаторов имеют глухое (непосредственное) заземление, напряжение на неповрежденных фазах относительно земли возрастает. Степень увеличения напряжения характеризуется коэффициентом заземления сети $K_3 = U_{ф-3}/U_{ном}$, где $U_{ф-3}$ – напряжение фазы по отношению к земле. При $K_3 \leq 0,8$ сеть считают эффективно заземленной. Крайним случаем эффективно заземленной сети является глухозаземленная сеть, когда нейтрали всех трансформаторов глухо заземлены. В этом случае токи короткого замыкания на землю оказываются наибольшими, а значение коэффициента K_3 наименьшим. При $K_3 > 0,8$ сеть считают неэффективно заземленной. Крайним случаем неэффективно заземленной сети является изолированная от земли сеть, когда нейтрали всех трансформаторов разземлены. В этом случае значение коэффициента K_3 получается наибольшим, равным единице.

В большинстве случаев короткие замыкания на землю возникают из-за грозových разрядов или коммутационных перенапряжений, при которых защитные разрядники или ограничители перенапряжений (ОПН), установленные в неповрежденных фазах, оказываются в состоянии пробоя.

Ограничение токов короткого замыкания на землю путем заземления нейтралей части трансформаторов или включения в нейтрали трансформаторов токоограничивающих устройств (в частности реакторов и резисторов) является наиболее эффективным способом как с экономической, так и с технической точек зрения. Однако степень их ограничения и соответственно значение сопротивления токоограничивающего устройства, включаемого в нейтраль транс-

форматора, лимитируется допустимыми перенапряжениями на нейтралях и на неповрежденных фазах трансформаторов, значения которых могут быть хотя и немного меньше $U_{\text{гащ}}$ ОПН, но достаточно продолжительными из-за условий работы релейной защиты.

По условиям работы выключателей желательно, чтобы токи однофазного и двухфазного короткого замыкания на землю в любой точке сети напряжением 110 кВ и выше не превышали тока трехфазного короткого замыкания в той же точке, т.е. $I_{\text{к}}^{(1)}/I_{\text{к}}^{(3)} \leq 1$; $I_{\text{к}}^{(1,1)}/I_{\text{к}}^{(3)} \leq 1$. Это требование выполняется, если $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} \geq 1$.

Наиболее просто ограничения токов короткого замыкания на землю можно достичь путем разземления нейтралей части трансформаторов сети, если это допустимо для изоляции их нейтралей и если это не приводит при отключении короткого замыкания к выделению неэффективно заземленных или даже незаземленных участков сети с неустраненным коротким замыканием на землю. Ограничения токов короткого замыкания на землю можно достичь также путем включения в нейтраль силовых трансформаторов реакторов или резисторов. Эффективность этих средств неодинакова. При одном и том же сопротивлении реакторы более существенно ограничивают ток короткого замыкания, чем резисторы. Однако установка реакторов утяжеляет условия работы изоляции нейтралей при перенапряжениях, особенно атмосферных. Установка резисторов менее эффективна с точки зрения токоограничения, но позволяет обеспечить быстрое затухание апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Следует отметить, что выбранные для заземления нейтралей реакторы или резисторы могут быть либо постоянно включены в цепь заземления нейтралей, либо введены в нее только при возникновении в сети короткого замыкания на землю (в нормальном режиме нейтраль может быть либо глухо заземлена, либо разземлена).

Возможных способов ограничения токов короткого замыкания на землю достаточно много. Типовая схема заземления нейтралей трансформаторов напряжением 110 – 220 кВ приведена на рис. 14.12,а. Здесь нейтраль может быть либо глухо заземлена, либо разземлена с помощью заземлителя или короткозамыкателя. В случае разземления нейтрали защита ее изоляции от перенапряжений осуществляется ОПН. Опыт эксплуатации показал недостаточную надежность этого способа. Более совершенной является схема, показанная на рис. 14.12,б; при появлении в цепи ОПН значительного сопровождающего тока срабатывает быстродействующий короткозамыкатель QK , наглухо заземляя нейтраль. В схемах, приведенных на рис. 14.12,в, г, нейтраль трансформаторов нормально изолирована; при возникновении короткого замыкания на землю быстродействующим выключателем или другим быстро-

действующим коммутационным аппаратом в нее вводится реактор или резистор. ОПН служит для защиты нейтрали от перенапряжений. Возможны и многие другие способы изменения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов.

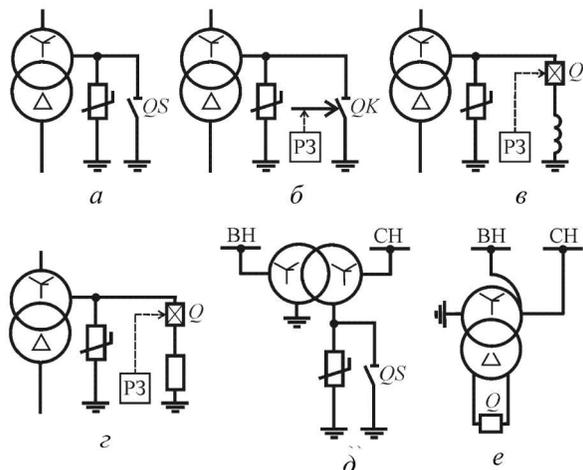


Рис. 14.12. Схемы для ограничения токов короткого замыкания на землю

Эффективным средством ограничения токов короткого замыкания на землю может стать замена автотрансформаторов связи на трансформаторы равной мощности, работающие, как правило, с разземленной нейтралью на стороне среднего напряжения (рис. 14.12,д). При таком решении осуществляется деление схемы нулевой последовательности по месту включения трансформатора. Некоторого ограничения токов короткого замыкания на землю можно добиться путем безынерционного размыкания обмотки низшего напряжения автотрансформаторов, соединенной в треугольник (рис. 14.12,е). Эффективность такого способа токоограничения зависит от мощности нагрузки этой обмотки, а также от суммарных сопротивлений нулевой последовательности примыкающих к автотрансформатору сетей.

Для ограничения токов короткого замыкания на землю могут быть использованы также ТОУ, включаемые не в нейтраль трансформаторов, а непосредственно в цепь линий электропередачи (так называемые реакторы нулевой последовательности).

Реально в энергосистемах для ограничения токов короткого замыкания на землю используются следующие средства:

- ▶ разземление нейтралей части трансформаторов (в сетях 110 кВ);
- ▶ включение в нейтраль трансформаторов и автотрансформаторов реакторов;
- ▶ включение в нейтраль трансформаторов резисторов.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

15.1. Расчетные условия для выбора электрооборудования

Выбор электрооборудования состоит в выборе его по условиям продолжительных режимов и проверке по условиям кратковременных режимов, определяющим из которых, как правило, является режим короткого замыкания.

Выбор электрических аппаратов и проводников, как и другого электрооборудования, производится на основе сформулированных для них расчетных условий и данных электропромышленности о параметрах и технико-экономических характеристиках выпускаемого и осваиваемого перспективного электрооборудования. Таким образом, выбору электрических аппаратов и проводников предшествует выявление расчетных условий, т.е. наиболее тяжелых, но достаточно вероятных условий, в которых может оказаться электрический аппарат или проводник при различных режимах его работы в электроустановке. Расчетные условия – это фактически требования энергосистем и электроустановок к параметрам электрооборудования конкретной электрической цепи.

Различают четыре режима работы электроустановок и их элементов: нормальный, аварийный, послеаварийный и ремонтный. Аварийный режим является кратковременным режимом, остальные – продолжительными. Хотя различные аварийные режимы по продолжительности составляют обычно доли процента от продолжительности рабочих режимов, но их условия могут оказаться крайне опасными для успешного функционирования электрооборудования. Поэтому оно выбирается по расчетным условиям продолжительных рабочих режимов и обязательно проверяется по расчетным условиям аварийных режимов. В ряде случаев проверка электрооборудования по условиям аварийных режимов оказывается определяющей при его выборе.

Для каждого из названных режимов характерны свои специфические расчетные условия. В общем случае расчетные условия для каждого режима включают в себя расчетную схему и расчетную продолжительность режима, расчетные условия окружающей среды, а также расчетные параметры режима цепи или электроустановки (напряжение, ток, частота и т.п.).

Расчетные условия нормального режима электроустановки включают следующее:

- расчетная схема электроустановки;
- расчетные условия окружающей среды (климатические условия – температура окружающей среды, ветровая нагрузка, возможность гололеда, агрессивность внешней среды, высота над уровнем моря);
- способ прокладки проводников (на воздухе, в земле, в воде);
- вид электроустановки (внутренняя или закрытая, наружная или открытая);
- исполнение электрооборудования (открытое, закрытое, защищенное и т.п.);
- сведения о системе принудительного охлаждения; расчетные параметры режима (напряжение, ток, частота);
- значения расчетных перегрузок по различным параметрам режима.

Расчетные условия ремонтного режима электроустановки включают в себя расчетную схему электроустановки, а также расчетные параметры и продолжительность режима. При этом обычно учитывается вывод в ремонт только одного из основных элементов электроустановки (генератора, трансформатора, автотрансформатора, синхронного компенсатора, блока и т.п.). Наложение ремонтов двух или более технологически жестко не связанных элементов электроустановки не рассматривается. Следует, однако, отметить, что при оценке надежности работы электроустановок наложение ремонтных, а также ремонтных и аварийных режимов отдельных элементов электроустановки учитывается в обязательном порядке, естественно, с учетом вероятности таких событий. Оценка допустимости работы конкретного электрооборудования при ремонтных режимах в сети или в электроустановке производится с учетом допустимых систематических нагрузок и аварийных перегрузок данного электрооборудования.

Из возможных аварийных режимов (короткие замыкания различных видов, обрывы проводов, нарушение устойчивости параллельной работы и возникновение асинхронного хода частей электрической системы, сложные виды повреждений и т.п.) расчетным для выбора электрооборудования обычно является режим короткого замыкания.

Расчетные условия короткого замыкания включают следующее:

- расчетная схема электроустановки;
- расчетное место короткого замыкания;
- расчетный вид короткого замыкания;
- расчетная продолжительность короткого замыкания.

В качестве *расчетной схемы*, как правило, принимается схема со всеми включенными в работу элементами электроустановки. В отдельных случаях в качестве расчетной может оказаться схема, в которой тот или иной элемент отключен.

Расчетное место короткого замыкания находится в схеме непосредственно с той или другой стороны от выбираемого электрооборудования в зависимости от того, какой случай короткого замыкания обуславливает большее значение тока в токоведущей части электрооборудования.

Расчетный вид короткого замыкания принимается в зависимости от степени воздействия тока короткого замыкания на электрооборудование. Расчетным видом короткого замыкания при проверке на термическую стойкость проводников и электрических аппаратов электроустановок напряжением свыше 1 кВ вплоть до 35 кВ является трехфазное короткое замыкание, в электроустановках напряжением 110 кВ и выше – трех- или однофазное короткое замыкание, а в электроустановках генераторного напряжения электростанций – трехфазное или двухфазное короткое замыкание, в зависимости от того, какое из них приводит к большему термическому воздействию.

Расчетная продолжительность короткого замыкания принимается в зависимости от назначения расчета.

Электродинамическая стойкость проводников и электрических аппаратов проверяется обычно по условиям воздействия электродинамических сил от ударного тока короткого замыкания ($t \approx 0,01$ с). В отдельных случаях следует учитывать кумулятивное действие токов короткого замыкания за время их существования.

Расчетную продолжительность короткого замыкания при проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при коротком замыкании определяют сложением времени действия основной релейной защиты, в зону действия которой входят проверяемые проводники и аппараты, и полного времени отключения ближайшего к месту короткого замыкания выключателя. Токопроводы и трансформаторы тока, применяемые в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более, проверяют на термическую стойкость, определяя расчетную продолжительность

короткого замыкания путем сложения времени действия основной защиты (при установке двух основных защит) или резервной защиты (при установке одной основной защиты) и полного времени отключения генераторного выключателя. Коммутационные электрические аппараты в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более проверяются на термическую стойкость как по времени воздействия тока короткого замыкания, определяемому действием основной быстродействующей защиты, так и по времени, определяемому действием резервной защиты, если оно превышает время, нормируемое заводом-изготовителем.

При расчетной продолжительности короткого замыкания до 1 с процесс нагрева проводников под действием тока короткого замыкания допустимо считать адиабатическим, а при расчетной продолжительности более 1 с и при небыстродействующих АПВ расчет термического воздействия тока короткого замыкания следует вести с учетом теплоотдачи в окружающую среду.

При наличии АПВ следует учитывать суммарное термическое действие тока короткого замыкания.

При проверке кабелей на невозгораемость расчетную продолжительность короткого замыкания следует определять сложением времени действия резервной релейной защиты и полного времени отключения соответствующего выключателя.

Расчетные условия послеаварийного режима схожи с расчетными условиями ремонтного режима. Они включают в себя расчетную схему электроустановки, расчетные параметры и расчетную продолжительность режима. Здесь также учитывается отказ только одного из основных элементов электроустановки и не учитывается наложение отказов нескольких технологически жестко не связанных элементов электроустановки. В отличие от ремонтного режима, который обычно заранее планируется и намечается на наиболее благоприятный для электроустановки и энергосистемы период, послеаварийный режим может возникнуть в любое время года и суток, в том числе в период наиболее напряженной работы энергосистемы или электроустановки (например, в период годового максимума нагрузки).

Продолжительность послеаварийного режима, определяемая временем оперативных переключений в электроустановке или временем аварийного ремонта, может существенно отличаться от продолжительности ремонтного режима, определяемой временем профилактического или капитального ремонта.

15.2. Выбор электрических аппаратов и проводников по условиям рабочих продолжительных режимов

Электрические аппараты и проводники выбираются по уровню изоляции, допустимому нагреву токоведущих частей в продолжительных режимах, а проводники, за исключением проводников сборных шин электроустановок, выбираются также по экономически целесообразной загрузке. При выборе электрических аппаратов должны быть выполнены следующие соотношения:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}; \quad (15.1)$$

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{норм.расч}}; \quad (15.2)$$

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{п.а.расч}}; \quad (15.3)$$

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{рем.расч}}; \quad (15.4)$$

или с учетом только наибольшего из расчетных продолжительных токов

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}} = I_{\text{раб.наиб}}, \quad (15.5)$$

а с учетом возможной перегрузки аппарата

$$I_{\text{пг.доп}} \geq I_{\text{раб.наиб}}, \quad (15.6)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение аппарата; $U_{\text{сети ном}}$ – номинальное напряжение сети; $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток аппарата; $I_{\text{норм.расч}}$, $I_{\text{п.а.расч}}$, $I_{\text{рем.расч}}$ – соответственно расчетный ток нормального, послеаварийного и ремонтного режимов; $I_{\text{прод.расч}}$ – расчетный ток продолжительного режима, равный большему из расчетных токов нормального, послеаварийного или ремонтного режима; $I_{\text{раб.наиб}}$ – наибольший рабочий ток цепи, равный расчетному току продолжительного режима; $I_{\text{пг.доп}}$ – допустимый ток перегрузки аппарата.

При выборе проводников должны быть выполнены следующие соотношения:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}, \quad (15.7)$$

причем для неизолированных проводников $U_{\text{ном}}$ определяется уровнем опорной изоляции;

$$S = S_{\text{экр}} = I_{\text{норм.расч}}/J_{\text{экр}}; \quad (15.8)$$

$$I_{\text{дл.доп}} = I_{\text{прод.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}} = I_{\text{раб.наиб}}, \quad (15.9)$$

а с учетом возможной перегрузки проводников (кабелей)

$$I_{\text{пг.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}} = I_{\text{раб.наиб}}, \quad (15.10)$$

где S – сечение проводника, мм; $S_{\text{экр}}$ – экономическое сечение проводника, мм; $J_{\text{экр}}$ – нормируемая экономическая плотность тока, А/мм; $I_{\text{прод.доп}}$ – продолжительно допустимый ток проводника; $I_{\text{пг.доп}}$ – ток допустимой перегрузки проводника.

Номинальный ток аппарата и продолжительно допустимый ток проводника устанавливаются при определенной нормированной температуре окружающей среды. Если температура окружающей среды отличается от нормированной, то токи пересчитываются по выражениям:

для электрических аппаратов

$$I'_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{прод.доп}} - \vartheta_{\text{окр}}}{\vartheta_{\text{прод.доп}} - \vartheta_{\text{окр.норм}}}}; \quad (15.11)$$

для проводников

$$I'_{\text{прод.доп}} = I_{\text{прод.доп}} \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{прод.доп}} - \vartheta_{\text{окр}}}{\vartheta_{\text{прод.доп}} - \vartheta_{\text{окр.норм}}}}, \quad (15.12)$$

где $\vartheta_{\text{прод.доп}}$ – продолжительно допустимая температура, °С; $\vartheta_{\text{окр.норм}}$ – нормированная температура окружающей среды, °С; $\vartheta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

Для аппаратов $\vartheta_{\text{окр.норм}} = 35^\circ\text{C}$, для проводников, проложенных на воздухе, $\vartheta_{\text{окр.норм}} = 25^\circ\text{C}$, для проводников, проложенных в земле и в воде, $\vartheta_{\text{окр.норм}} = 15^\circ\text{C}$.

Продолжительно допустимая температура аппаратов и проводников $\vartheta_{\text{прод.доп}}$ обычно лимитируется условиями надежной работы электрических контактов и контактных соединений или условиями работы изоляции. Эти температуры нормируются и их значения приведены в табл. 15.1.

Таблица 15.1

**Продолжительно допустимые температуры нагрева
элементов электроустановок**

| Элемент электроустановки | $t_{\text{прод. доп.}} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
|---|---|
| Провода и окрашенные шины неизолированные | 70 |
| Провода и шнуры с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией | 65 |
| Кабели до 10 кВ с изоляцией из поливинилхлоридного пластика или полиэтилена | 70 |
| Кабели до 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена | 90 |
| Кабели с изоляцией из пропитанной кабельной бумаги напряжением: | |
| до 1 кВ | 80 |
| 6 кВ | 65 |
| 10 кВ | 60 |
| 35 кВ | 50 |
| Контакты из меди и медных сплавов без покрытия: | |
| в воздухе | 75 |
| в элегазе | 90 |
| в изоляционном масле | 80 |
| Соединения (кроме сварных и паяных) из меди, алюминия и их сплавов без покрытия: | |
| в воздухе | 90 |
| в элегазе | 105 |
| в изоляционном масле | 100 |
| Выводы электрических аппаратов из меди, алюминия и их сплавов, предназначенные для соединения с проводниками внешних электрических цепей: | |
| без покрытия | 90 |
| с покрытием оловом, никелем или серебром | 105 |
| То же, но с покрытием контактной поверхности внешнего проводника серебром | 120 |
| Материалы, используемые в качестве изоляции, и металлические детали в контакте с изоляцией следующих классов нагревостойкости: | |
| У | 90 |
| А | 105 |
| Е | 120 |
| В | 130 |
| Ф | 155 |
| Н | 180 |
| 200 | 200 |
| 220 | 220 |
| 250 | 250 |
| Металлические детали или детали из изоляционных материалов, соприкасающиеся с маслом, за исключением контактов | 100 |
| Масло в масляных коммутационных электрических аппаратах в верхнем слое | 90 |
| Токоведущие (за исключением контактов и контактных соединений) и нетоковедущие металлические части, не изолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами | 120 |

15.3. Проверка коммутационных электрических аппаратов на коммутационную способность

На коммутационную способность проверяются все коммутационные аппараты (выключатели, выключатели нагрузки, плавкие предохранители, разъединители, автоматы, контакторы, магнитные пускатели, рубильники и т.п.).

Проверка на коммутационную способность выключателей напряжением свыше 1 кВ состоит в доказательстве того, что предварительно выбранные выключатели удовлетворяют условиям:

$$I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{пт}}; \quad (15.13)$$

$$i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \beta_{\text{ном}} \frac{I_{\text{откл.ном}}}{100} \geq i_{\text{ат}}, \quad (15.14)$$

где $I_{\text{откл.ном}}$ – номинальный ток отключения выключателя (действующее значение периодической оставляющей тока); $I_{\text{пт}}$ – действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в цепи в момент τ прекращения соприкосновения дугогасительных контактов выключателя; $i_{\text{а.ном}}$ – нормированное значение аperiodической составляющей тока отключения; $\beta_{\text{ном}}$ – нормированное процентное содержание аperiodической составляющей номинального тока отключения (оно устанавливается заводом-изготовителем и должно быть не менее значения, определяемого по кривой на рис. 15.1; при $\tau \geq 70$ мс принимать $\beta_{\text{ном}} = 0$); $i_{\text{ат}}$ – расчетное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в цепи в момент τ .

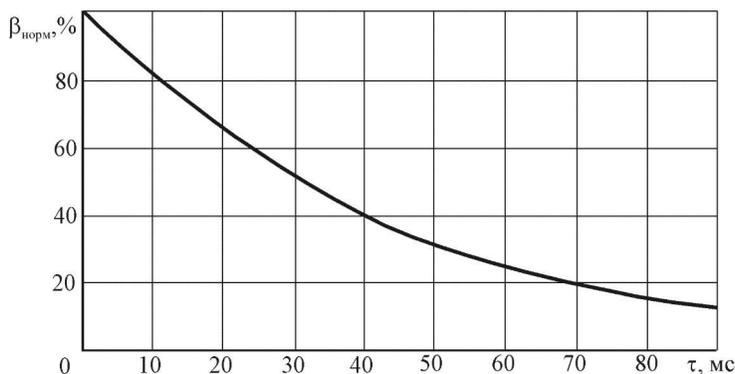


Рис. 15.1. Кривая для определения нормированного процентного содержания аperiodической составляющей номинального тока отключения

Время τ принимают равным собственному времени отключения выключателя (т.е. без учета времени действия привода выключателя с добавлением 0,01 с).

Затем проверяется выполнение условий:

$$I_{\text{вкл.норм}} \geq I_{\text{п0}}; \quad (15.15)$$

$$i_{\text{вкл.норм}} \geq i_{\text{уд}}; \quad (15.16)$$

$$u_{\text{в.норм}} \geq u_{\text{в}}; \quad (15.17)$$

где $I_{\text{вкл.норм}}$ – нормированное действующее значение периодической составляющей тока включения выключателя; $I_{\text{п0}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания; $i_{\text{вкл.норм}}$ – нормированное мгновенное значение тока включения выключателя; $i_{\text{уд}}$ – значение ударного тока короткого замыкания; $u_{\text{в.норм}}$ – нормированное значение собственного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении короткого замыкания в цепи; $u_{\text{в}}$ – собственное восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя при отключении расчетного короткого замыкания в цепи.

Выключатель, удовлетворяющий по своим параметрам условиям (15.13) – (15.17), может быть принят к установке в данной цепи.

15.4. Расчет переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении коротких замыканий в трехфазных эффективно заземленных сетях

Расчет переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) на контактах выключателя при отключении коротких замыканий сводится к определению закона изменения во времени восстанавливающегося напряжения, а именно – скорости восстанавливающегося напряжения (СВН) и максимального значения этого напряжения. Обычно с этой целью используют метод «встречного тока». Последний заключается в следующем: если в момент, когда ток в одном из полюсов выключателя проходит через нуль, ввести между контактами разомкнутого полюса источник тока, который обеспечивал бы ток, равный отключаемому, но направленный в противоположном направлении, и одновременно шунтировать ЭДС всех генераторов и других источников энергии, то напряжение между разомкнутыми контактами оказывается равным ПВН.

Таким образом для расчета ПВН сначала необходимо обычным способом найти ток короткого замыкания, отключаемый выключателем, а затем из пассивной комплексной схемы замещения, учитывающей возникшую продольную несимметрию, вид короткого замыкания и параметры прямой, обратной и нулевой последовательностей исходной расчетной схемы относительно разорванной фазы, найти закон изменения напряжения в месте разрыва цепи, включив туда указанный выше источник тока.

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, необходимые для расчета ПВН, отличаются от схем замещения, используемых для расчета тока короткого замыкания. При расчете ПВН учитывают индуктивности генераторов и трансформаторов рассматриваемой электроустановки, емкость проводников, различных электрических аппаратов и трансформаторов, присоединенных к сборным шинам электростанции, а также параметры воздушных линий электропередачи, которые остаются присоединенными к сборным шинам при отключении короткого замыкания (расчетное число линий n обычно принимают равным $n = n_{\text{л}} - 1$, если $n_{\text{л}} \leq 3$ и $n = n_{\text{л}} - 2$, если $n_{\text{л}} \geq 4$, где $n_{\text{л}}$ – число всех линий, присоединенных к сборным шинам). Такими параметрами линий являются их волновые сопротивления прямой (обратной) и нулевой последовательностей: $Z_{\text{в1}} = \sqrt{L_1 C_1} / n$ и $Z_{\text{в0}} = \sqrt{L_0 C_0} / n$, где L_1, L_2 и C_1, C_0 – индуктивности и емкости прямой и нулевой последовательностей одной линии.

Обычно при расчетах ПВН принимают следующие допущения:

- ▶ не учитывают апериодическую составляющую тока короткого замыкания;
- ▶ сопротивление обратной последовательности генераторов принимают равным их сверхпереходному сопротивлению;
- ▶ отключаемый периодический ток короткого замыкания

$i = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \sin \omega_{\text{снх}} t$ заменяют током $i = \left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} \times t = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \omega_{\text{снх}} t$, т.е.

изменяющимся по линейному закону; это не приводит к большой погрешности, поскольку восстановление напряжения на контактах выключателя любой фазы происходит за гораздо меньшее время, чем время до момента перехода тока следующей фазы через нуль;

- ▶ воздушные линии электропередачи учитывают активными сопротивлениями, численно равными их волновым сопротивлениям, так как при переходных процессах однородные линии воспринимаются как активные сопротивления;
- ▶ не учитывают насыщение стали магнитопроводов трансформаторов, так как магнитная индукция в стали с увеличением частоты уменьшается; это дает возможность использовать метод наложения;

▶ не учитывают коронный разряд на проводах воздушных линий электропередачи, так как амплитуды восстанавливающихся напряжений обычно незначительно превышают фазное напряжение.

В качестве исходной расчетной схемы обычно принимают схему электростанции, показанную на рис. 15.2, к ее шинам повышенного напряжения присоединены блоки генератор-трансформатор $G-T1$ (на рис. 15.2 показан только один такой блок), воздушные линии электропередачи L , трансформатор $T2$ и автотрансформатор AT , с помощью которого осуществляется связь электростанции с энергосистемой GS .

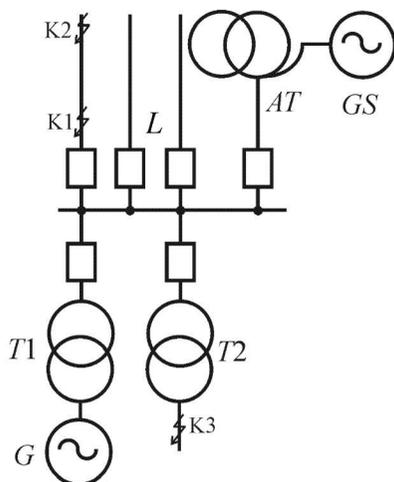


Рис. 15.2. Исходная расчетная схема

Параметры ПВН (т.е. скорость восстанавливающегося напряжения и максимальное значение восстанавливающегося напряжения) зависят от ряда факторов, в том числе от места установки выключателя и от расположения точки короткого замыкания. Наиболее характерными являются короткие замыкания в начале воздушной линии – непосредственно за выключателем (точка $K1$ на рис 15.2), неудаленное короткое замыкание (точка $K2$), т.е. короткое замыкание на воздушной линии, удаленное от соответствующего выключателя на 2–5 км, и короткое замыкание за трансформатором (точка $K3$). Ниже рассмотрен первый случай.

При трехфазном коротком замыкании на землю (практика показывает, что трехфазное короткое замыкание без земли встречается весьма редко) и размыкании первого гасящего полюса выключателя (т.е. полюса, в котором раньше, чем в других полюсах выключателя после момента начала расхождения контактов ток короткого замыка-

ния проходит через нулевое значение) возникает продольная несимметрия и для определения входного сопротивления расчетной схемы относительно места разрыва цепи с использованием метода симметричных составляющих необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей относительно разомкнутых контактов выключателя $L - L'$. На рис. 15.3 показана схема замещения прямой последовательности без ЭДС, где $R_{в1}$, L_1 и C_1 – соответственно эквивалентное волновое сопротивление воздушных линий, индуктивность и емкость различных элементов при коротком замыкании в точке К1. Конфигурация схем замещения обратной и нулевой последовательностей аналогична, только в схеме замещения нулевой последовательности значения $R_{в0}$, L_0 и C_0 не равны соответствующим значениям $R_{в1}$, L_1 и C_1 .

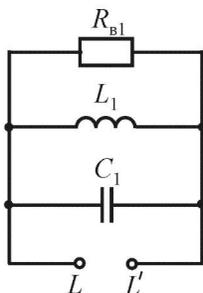


Рис. 15.3. Схема замещения прямой последовательности для расчета ПВН

При обрыве одной фазы трехфазной цепи упрощенная комплексная схема замещения, как известно, представляет собой комбинацию из схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, образованную путем соединения между собой точек схем замещения разных последовательностей, соответствующих одной и той же стороне (т.е. одному и тому же контакту) отключающего полюса выключателя (т.е. точек $L_1 - L_2 - L_0$ и $L'_1 - L'_2 - L'_0$), как показано на рис. 15.4. Поскольку схема замещения прямой последовательности не содержит ЭДС, то схемы замещения разных последовательностей по отношению к источнику тока $\sqrt{2}I_{п0}\omega_{\text{синх}}t$ оказываются включенными параллельно. Напряжения между точками $L_1 - L'_1$, $L_2 - L'_2$ и $L_0 - L'_0$ равны 1/3 от искомого восстанавливающегося напряжения $u_{в}$. Чтобы при том же токе $\sqrt{2}I_{п0}\omega_{\text{синх}}t$ получить полное ПВН, необходимо сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей утроить.

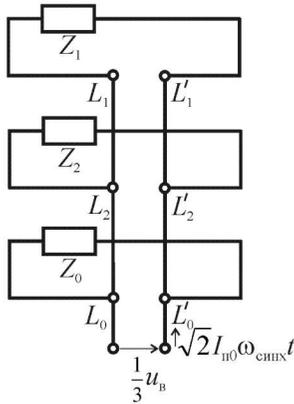


Рис. 15.4. Комплексная схема замещения для расчета ПВН при трехфазном коротком замыкании на землю

Таким образом, при $Z_2 = Z_1$ и трехфазном коротком замыкании на землю эквивалентное сопротивление комплексной схемы

$$\underline{Z}_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)} = \frac{1,5 \underline{Z}_1 \cdot 3 \underline{Z}_0}{1,5 \underline{Z}_1 + 3 \underline{Z}_0} = \frac{3 \underline{Z}_1 \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + 2 \underline{Z}_0}, \quad (15.18)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)} &= \frac{3L_1L_0}{L_1 + 2L_0}; \\ C_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)} &= \frac{2C_1C_0}{3}; \\ R_{\text{в.ЭК}}^{(1,1,1)} &= \frac{3R_{\text{в1}}R_{\text{в0}}}{R_{\text{в1}} + 2R_{\text{в0}}}. \end{aligned} \right\} \quad (15.19)$$

При трехфазном коротком замыкании без соединения точки короткого замыкания с землей напряжение на отключающем полюсе выключателя восстанавливается с обеих сторон, т.е. как со стороны шин электростанции, так и со стороны отключаемой линии, поэтому в схему нулевой последовательности необходимо вводить волновое сопротивление нулевой последовательности поврежденной линии. Однако последнее обычно принимают бесконечно большим, вследствие чего $Z_0 = \infty$ и

$$\underline{Z}_{\text{ЭК}}^{(3)} = 1,5 \underline{Z}_1. \quad (15.20)$$

Начальная скорость восстанавливающегося напряжения на второй фазе выключателя при отключении трехфазного короткого замыкания с землей сопоставима с начальной СВН на первой фазе. А при

отключении трехфазного короткого замыкания без земли в случае отсутствия нагрузки в линии токи в фазах *B* и *C* одновременно достигают нулевого значения и восстанавливающееся напряжение делится между полюсами *B* и *C* выключателя, поэтому эти полюсы оказываются в более благоприятных условиях, чем первый гасящий полюс. Наличие нагрузки в линии приводит к тому, что токи в фазах *B* и *C* проходят через нулевое значение с некоторым смещением (на угол $\pi/180 - \pi/90$), в результате чего восстанавливающееся напряжение сначала полностью ложится на второй отключающий полюс (фазу *B*).

Процессы восстановления напряжения на последнем отключающем полюсе выключателя при отключении трехфазного короткого замыкания с землей и при отключении однофазного короткого замыкания эквивалентны, так как в первом случае восстановление напряжения на втором отключающем полюсе заканчивается значительно раньше перехода тока через нулевое значение в последней отключаемой фазе. Но при однофазном коротком замыкании токи прямой, обратной и нулевой последовательностей равны и каждый из них составляет 1/3 от отключаемого тока. Поэтому эквивалентное сопротивление расчетной схемы по отношению к контактам выключателя как и при обрыве двух фаз (см. п.9.3) при равенстве сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей составляет

$$Z_{\text{ЭК}}^{(1)} = \frac{2Z_1 + Z_0}{3}, \quad (15.21)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{ЭК}}^{(1)} &= \frac{2L_1 + L_0}{3}; \\ C_{\text{ЭК}}^{(1)} &= \frac{3C_1 C_0}{C_1 + 2C_0}; \\ R_{\text{В.ЭК}}^{(1)} &= \frac{2R_{\text{В1}} + R_{\text{В0}}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (15.22)$$

Характер процесса восстановления напряжения при всех рассмотренных случаях определяется значением параметра

$$\eta = 2R_{\text{В.ЭК}}^{(n)} \sqrt{\frac{C_{\text{ЭК}}^{(n)}}{L_{\text{ЭК}}^{(n)}}}, \quad (15.23)$$

где надстрочный индекс (*n*) означает вид короткого замыкания.

Если $\eta > 1$, то переходный процесс имеет колебательный характер; при $\eta < 1$ процесс нарастания напряжения происходит монотонно; $\eta = 1$ указывает на то, что процесс имеет критический характер – даже при незначительном увеличении η процесс становится колебательным.

Выражения, определяющие закон изменения во времени восстанавливающегося напряжения при разных η , являются сравнительно сложными. Поэтому часто вместо них используют упрощенные выражения:

при $\eta > 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \omega_{\text{синх}} L_{\text{ЭК}}^{(n)} \left[1 - \cos \left(t / \sqrt{L_{\text{ЭК}}^{(n)} C_{\text{ЭК}}^{(n)}} \right) \right]; \quad (15.24)$$

при $\eta = 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \omega_{\text{синх}} L_{\text{ЭК}}^{(n)} \left[1 - \left(1 + \frac{2R_{\text{В.ЭК}}^{(n)} t}{L_{\text{ЭК}}^{(n)}} \right) e^{-2R_{\text{В.ЭК}}^{(n)} t / L_{\text{ЭК}}^{(n)}} \right]; \quad (15.25)$$

при $\eta < 1$

$$u_B = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \omega_{\text{синх}} L_{\text{ЭК}}^{(n)} \left[1 - e^{-\frac{2R_{\text{В.ЭК}}^{(n)} t}{L_{\text{ЭК}}^{(n)}}} \right]. \quad (15.26)$$

Важным параметром, определяющим переходный процесс восстановления напряжения на контактах выключателя при отключении короткого замыкания, является скорость восстанавливающегося напряжения.

Если емкость, сосредоточенная на шинах рассматриваемой электростанции, относительно мала, то наибольшая скорость восстановления напряжения имеет место в начале ПВН и определяется как производная выражения (15.26) в момент перехода тока расчетной фазы через нуль, т.е.

$$v_B = \left. \frac{du_B}{dt} \right|_{t=0} = \sqrt{2} I_{\text{п0}} \omega_{\text{синх}} R_{\text{В.ЭК}}^{(n)}. \quad (15.27)$$

При значительной емкости, сосредоточенной на шинах электростанции, кривая изменения ПВН во времени имеет другой вид (см. рис. 15.5): в начальной части кривая имеет выпуклость, обращенную вниз, а после точки перегиба – выпуклость, обращенную вверх, поэтому СВН сначала изменяется во времени от нуля при $t = 0$ до максимума в точке перегиба кривой, а затем снова уменьшается и при максимальном напряжении равна нулю. Для выключателя важна средняя скорость увеличения восстанавливающегося напряжения. Максимальное значение этой скорости определяется касательной к кривой восстанавливающегося напряжения, проведенной из начала координат, т.е.

$$v_{\text{срmax}} = \frac{u_{\text{В.кас}}}{t_{\text{кас}}}, \quad (15.28)$$

где $t_{\text{кас}}$ – время от момента перехода тока отключаемой фазы через нулевое значение до момента, когда восстанавливающееся напряже-

ние достигнет значения $u_{в.кас}$, определяемого точкой касания указанной прямой с кривой ПВН.

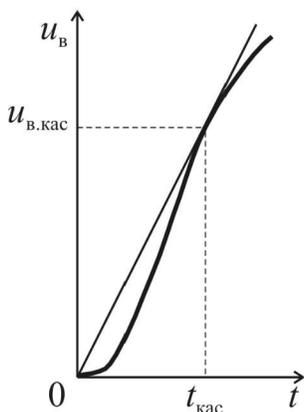


Рис. 15.5. Кривая для определения максимальной средней скорости восстанавливающегося напряжения

Рассмотренное короткое замыкание в начале воздушной линии электропередачи, непосредственно за выключателем, не является для выключателя самым тяжелым (опасным) с точки зрения СВН и максимального значения восстанавливающегося напряжения. Более опасными являются так называемые *неудаленные* короткие замыкания, т.е. короткие замыкания, удаленные от выключателя на несколько километров (точка К2 на рис. 15.2). В этом случае в момент перехода тока первого отключающего полюса выключателя через нулевое значение переходный процесс восстановления напряжения возникает не только на контактах выключателя, обращенных в сторону сборных шин распределительного устройства электростанции, но и на контактах, обращенных в сторону воздушной линии: на них возникают пикообразные напряжения, создаваемые колебаниями высокой частоты остаточного заряда, распределенного на линии между выключателем и точкой короткого замыкания.

Иногда при отключении короткого замыкания за трансформаторами большой мощности (точка К3 на рис. 15.2) СВН и амплитуда первого пика восстанавливающегося напряжения также могут оказаться недопустимыми для выключателя.

Обычно проверка отключающей способности выключателей по СВН производится путем сравнения скорости восстановления напряжения v_B с номинальным значением скорости $v_{в.ном}$ или путем сравнения требуемого запаса номинального тока отключения $I_{откл.ном}$ выключателя по отношению к начальному значению периодической составляющей тока короткого замыкания $I_{п0}$. Проверка по СВН не

требуется, если $I_{\text{откл.ном}} > 3I_{\text{п0}}$. Если же $I_{\text{п0}} < I_{\text{откл.ном}} < 3I_{\text{п0}}$, то минимальный запас по току отключения определяют из выражения

$$I_{\text{откл.ном}} \geq \frac{v_{\text{в}}}{v_{\text{в.ном}}} I_{\text{п0}}, \quad (15.29)$$

где $v_{\text{в}}$ – значение СВН при отключении тока $I_{\text{п0}}$.

Проверку отключающей способности выключателей по СВН следует производить с использованием нормированных характеристик ПВН, которые задаются в виде граничной линии и линии запаздывания (см. рис. 15.6).

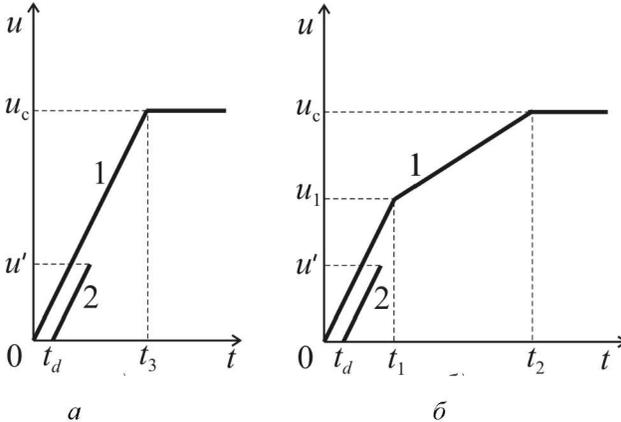


Рис. 15.6. Нормированные характеристики ПВН:

a – для выключателей напряжением до 35 кВ;

б – для выключателей напряжением 110 кВ и выше;

1 – граничная линия ПВН; 2 – линия запаздывания ПВН

Для выключателей напряжением до 35 кВ граничная линия (линия 1 на рис. 15.6,*a*) определяется двумя параметрами: максимальным значением ПВН $u_{\text{с}}$, кВ, и временем t_3 , мкс. Максимальное значение ПВН определяется по формуле

$$u_{\text{с}} = \sqrt{2/3} U_{\text{раб.ноб}} K_{\text{п.г}} K_{\text{а}}, \quad (15.30)$$

где $U_{\text{раб.ноб}}$ – наибольшее рабочее напряжение, кВ; $K_{\text{п.г}}$ – коэффициент первого гасящего полюса, равный 1,5; $K_{\text{а}}$ – коэффициент амплитуды: $K_{\text{а}} = 1,4$ при отключаемом токе, равном номинальному току отключения $I_{\text{откл.ном}}$ и $K_{\text{а}} = 1,5$ при отключаемых токах, равных 60 и 30 % от $I_{\text{откл.ном}}$.

Время t_3 зависит от номинального напряжения установки, наибольшего рабочего напряжения и отключаемого тока.

Линия запаздывания (прямая 2 на рис. 15.6,а) параллельна граничной линии, причем $u' = u_c/3$ и $t_d = 0,15t_3$.

Для выключателей напряжением 110 кВ и выше граничная линия состоит из двух линейных участков (см. линию 1 на рис. 15.6,б) и определяется четырьмя параметрами – u_1 , u_c , t_1 и t_2 , причем

$$u_1 = \sqrt{2/3} U_{\text{раб.нб}} K_{\text{п.г}}, \quad (15.31)$$

а коэффициент $K_{\text{п.г}}$ принимается равным 1,3.

Напряжение u_c определяется по формуле

$$u_c = K_a u_1; \quad (15.32)$$

коэффициент K_a имеет то же значение, что и для выключателей напряжением до 35 кВ.

Время t_1 зависит от номинального напряжения выключателя, наибольшего рабочего напряжения, номинального тока отключения и отключаемого тока, а время $t_2 = 3t_1$.

Линия запаздывания (линия 2 на рис. 15.6,б) ограничена напряжением $u' = 0,5u_1$, а время t_d составляет 2 мкс при отключаемом токе $I_{\text{откл}} = I_{\text{откл.ном}}$, 4 мкс при $I_{\text{откл}} = 0,6I_{\text{откл.ном}}$ и 8 мкс при $I_{\text{откл}} = 0,3I_{\text{откл.ном}}$.

Выбранный предварительно выключатель удовлетворяет требованиям в отношении СВН, если расчетная кривая ПНВ не выходит (должна быть не выше) за граничную линию ПНВ и, кроме того, один раз пересекает линию запаздывания, а вторично ее не пересекает.

15.5. Условия выбора и проверки проводников и электрических аппаратов разных видов

Выбор и проверка по условиям короткого замыкания проводников и электрических аппаратов разных видов имеет некоторую специфику и особенности. Особенности проверки электрооборудования на термическую стойкость и невозгораемость кабелей при коротких замыканиях изложены в главе 12, а на электродинамическую стойкость при коротких замыканиях – в главе 13.

Специфика условий выбора и проверки проводников и электрических аппаратов отдельных видов отражена в табл. 15.2.

**Условия выбора и проверки проводников
и электрических аппаратов**

| Электрический аппарат или проводник | Условия выбора проверки |
|-------------------------------------|---|
| Выключатель | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}} = I_{\text{раб.нб}}$ $I_{\text{пг.доп}} \geq I_{\text{пг.расч}} \text{ (при допустимости перегрузки выключателя)}$ $I_{\text{вкл.ном}} \geq I_{\text{п0}}$ $i_{\text{вкл.ном}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{пр.скв}} \geq I_{\text{п0}}$ $i_{\text{пр.скв}} = i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{откл}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{пт}}$ $i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \frac{\beta_{\text{ном}}}{100} I_{\text{откл.ном}} \geq i_{\text{ат}}$ <p>Далее проверяется $u_{\text{в.ном}} \geq u_{\text{в}}$</p> |
| Разъединитель | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}} = I_{\text{раб}}$ $i_{\text{пр.скв}} = i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{откл}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{откл.доп}} \geq I_{\text{рабт}} \text{ (допускается в строго оговоренных частных случаях)}$ |
| Отделитель | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $i_{\text{пр.скв}} = i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{откл}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{откл.доп}} \geq I_{\text{раб}} \text{ (допускается в строго оговоренных частных случаях)}$ |
| Короткозамыкатель | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $i_{\text{пр.скв}} = i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{откл}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.ном}}$ |
| Предохранитель | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{пр.ож}}$ <p>Соответствие времятоковой характеристики предохранителя расчетным условиям защищаемой цепи</p> |

| Электрический аппарат или проводник | Условия выбора проверки |
|-------------------------------------|--|
| Выключатель нагрузки | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $I_{\text{вкл.доп}} \geq I_{\text{п0}}$ $i_{\text{вкл.доп}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{пр.скв}} \geq I_{\text{п0}}$ $i_{\text{пр.скв}} = i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} \geq t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{откл}} \geq B_{\text{к}} \text{ при } t_{\text{откл}} < t_{\text{тер.ном}}$ $I_{\text{откл.ном}} = I_{\text{ном}} \geq I_{\text{раб}}$ <p>В отдельных случаях допускается $I_{\text{откл.ном}} > I_{\text{ном}}$ (соотношение указывается изготовителем). Соответствие временной характеристики предохранителя расчетным условиям защищаемой цепи (при установке выключателя нагрузки последовательно с предохранителем)</p> |
| Трансформатор тока | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $i_{\text{дин}} = k_{\text{дин}} \sqrt{2} I_{\text{ном}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} = \left(k_{\text{тер}} I_{\text{ном}} \right)^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}}$ $Z_{2\text{ном}} > Z_{2\text{расч}} = r_{2\text{расч}} \text{ (в необходимом классе точности)}$ |
| Трансформатор напряжения | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $S_{\text{ном}} > S_{2\text{расч}} \text{ (в необходимом классе точности)}$ $S_{\text{пред}} = S_{\text{max}} \geq S_{2\text{нб}} \text{ (в режиме наибольшей отдаваемой мощности)}$ |
| Опорный изолятор | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $F_{\text{доп}} = 0,6 F_{\text{разр}} \geq F_{\text{расч}} \text{ (для одиночных изоляторов)}$ $F_{\text{доп}} = F_{\text{разр}} \geq F_{\text{расч}} \text{ (для спаренных изоляторов)}$ |
| Проходной изолятор | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $F_{\text{доп}} = 0,6 F_{\text{разр}} \geq F_{\text{расч}}$ |
| Реактор | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.ном}}^2 t_{\text{тер.ном}} \geq B_{\text{к}}$ $X_{LR} \geq X_{LR\text{расч}} \text{ (определяется по условиям необходимого ограничения токов короткого замыкания и предельно допустимой потере напряжения на реакторе в нормальном режиме работы)}$ |

| Электрический аппарат или проводник | Условия выбора проверки |
|-------------------------------------|--|
| Шина, провод неизолированный | $S \approx S_{\text{эки}} = I_{\text{норм.расч}}/J_{\text{эки}}$ (за исключением сборных шин электроустановок напряжением до 1 кВ с $T_{\text{нб}} < 5000$ ч, сетей временных сооружений и ответвлений к электроприемникам напряжением до 1 кВ, резисторам, реакторам и т.п.) Сечение проводников воздушных линий 330 – 1150 кВ выбирается по экономическим интервалам $I_{\text{прод.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $\sigma_{\text{доп}} \geq \sigma_{\text{расч}}$ $\vartheta_{\text{кр.доп}} \geq \vartheta_{\text{кн}}$ ИЛИ $S \geq S_{\text{тер.мин}} = \sqrt{B_{\text{к}}}/C_{\text{тер}}$ |
| Кабель, провод изолированный | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $S \approx S_{\text{эки}} = I_{\text{норм.расч}}/J_{\text{эки}}$ $I_{\text{прод.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $I_{\text{пг.доп}} \geq I_{\text{пг.расч}}$ $\vartheta_{\text{кр.доп}} \geq \vartheta_{\text{кн}}$ ИЛИ $S \geq S_{\text{тер.мин}} = \sqrt{B_{\text{к}}}/C_{\text{тер}}$ |
| Закрытый шинный токопровод | $U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $I_{\text{тер.норм}}^2 t_{\text{тер.норм}} \geq B_{\text{к}}$ |

Примечания. 1. В правых частях неравенств величины $I_{\text{п0}}$, $i_{\text{уд}}$, $B_{\text{к}}$, $I_{\text{пт}}$, $i_{\text{ат}}$, $u_{\text{в}}$, $I_{\text{п0.ож}}$, $I_{\text{пт.ож}}$, $\vartheta_{\text{кн}}$ должны быть представлены расчетными значениями, т.е. наибольшими в условиях установки или цепи.

2. В таблице приняты следующие обозначения: $I_{\text{п0ож}}$ – действующее значение периодической составляющей ожидаемого тока короткого замыкания в начальный момент; $I_{\text{птож}}$ – то же в момент начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного аппарата; $I_{\text{рабт}}$ – рабочий ток цепи в момент начала расхождения дугогасительных контактов коммутационного аппарата; $T_{\text{нб}}$ – время использования наибольшей нагрузки.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ВЫБОР И ПРОВЕРКА ШИННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

16.1. Общие положения

Условия выбора и проверки шинных конструкций зависят от места их установки: в открытых или закрытых (в том числе комплектных) распределительных устройствах, номинального напряжения (которое определяет конструктивные особенности ошиновки и прежде всего длину пролета) и других факторов. В таблице 16.1 приведены основные виды проверок: расчетные (аналитические), испытания (экспериментальные) и экспериментально-аналитические, а также области применения этих конструкций по месту установки и номинальному напряжению (с учетом типовых конструктивных особенностей).

Таблица 16.1

Основные виды проверок шинных конструкций и области их применения

| Условия выбора и виды проверок | Метод проверки | Место установки | Номинальное напряжение установки, кВ |
|---|--------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Выбор изоляторов по длине пути утечки | Расчет | ОРУ, ЗРУ | 6 и выше |
| Проверка изоляционных расстояний (в том числе при ветровых и электродинамических нагрузках) | Расчет | ЗРУ (ОРУ) | 0,4 и выше (35 и выше) |
| Проверка ошиновки по условиям короны и радиопомех | Испытания и расчет | ОРУ, ЗРУ | 6 и выше |
| Проверка шин по допустимым прогибам: - от собственного веса (включая ответвления) - от собственного веса (включая ответвления), а также веса гололеда | Расчет, испытания | ЗРУ ОРУ ОРУ | 110 и выше 35 и выше 35 и выше |

Окончание таблицы 16.1

| Условия выбора и виды проверок | Метод проверки | Место установки | Номинальное напряжение установки, кВ |
|--|----------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Проверка шинодержателей и компенсаторов по допустимым температурным деформациям шин (удлинением и сжатиям) | Расчет | ОРУ и ЗРУ | 0,4 и выше |
| Проверка жесткой ошиновки и ее узлов по нагреву в рабочих режимах | Расчет, испытания | ОРУ и ЗРУ | 0,4 и выше |
| Проверка шин на термическую стойкость | Расчет, испытания | ОРУ и ЗРУ | 0,4 и выше |
| Проверка шинной конструкции на электродинамическую стойкость | Расчет, испытания | ОРУ и ЗРУ | 0,4 и выше |
| Проверка шинной конструкции на ветровую стойкость | Экперим.-аналитический | ОРУ | 35 и выше |
| Проверка эффективности отстройки шин от ветровых резонансов | Экперим.-аналитический | ОРУ | 35 и выше |
| Проверка стойкости (прочности) изоляторов и шин при различных сочетаниях внешних нагрузок (ветровых, гололедных и электродинамических) | Расчет | ОРУ | 35 и выше |
| Проверка на сейсмостойкость | Испытания,экперим.-аналитический | ОРУ, ЗРУ | 0,4 и выше |

В предыдущих главах рассматривались методы расчета ошиновки на термическую и электродинамическую стойкость. Ниже рассматриваются основные методы расчетов шинных конструкций по условиям рабочих режимов, а также от воздействия ветровых и гололедных нагрузок.

16.2. Выбор изоляторов

Изоляторы и изоляционные опоры выбираются по удельной эффективной длине пути утечки в зависимости от степени загрязненности (СЗ) в месте расположения электроустановки и ее номинального напряжения. Выбор изоляторов и изоляционных опор может производиться также по разрядным характеристикам.

Геометрическая длина пути утечки изолятора $L_{ут}$, см, должна отвечать условию

$$L_{ут} \geq \lambda_3 U k, \quad (16.1)$$

где λ_3 – удельная эффективная длина пути утечки, зависящая от СЗ атмосферы, см/кВ; U – наибольшее рабочее междуфазное напряжение, кВ; k – коэффициент использования длины пути утечки изоляционной конструкции.

Нормированные Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) значения параметров λ_3 приводятся в табл.16.2. Эти значения зависят от номинального напряжения электроустановки и СЗ. Сте-

пень загрязнения определяется видом и удаленностью от естественных (природных) и промышленных источников загрязнения. В качестве примера в табл.16.3 приводится СЗ в прибрежной зоне морей и озер площадью более 10 000 м² в зависимости от засоления водоема и расстояния от него, а в табл.16.4 – СЗ вблизи теплоэлектростанции или промышленной котельной в зависимости от вида топлива, мощности ТЭС, высоты дымовых труб и расстояния от них.

Таблица 16.2

Удельная эффективная длина пути утечки поддерживающих гирлянд изоляторов и штыревых изоляторов ВЛ на металлических и железобетонных опорах, внешней изоляции электрооборудования и изоляторов ОРУ

| Степень загрязнения | $\lambda_{\text{э}}$, см/кВ (не менее), при номинальном напряжении, кВ | |
|---------------------|--|-----------|
| | до 35 включительно | 110 – 750 |
| 1 | 1,90 | 1,60 |
| 2 | 2,35 | 2,00 |
| 3 | 3,00 | 2,50 |
| 4 | 3,50 | 3,10 |

Таблица 16.3

Степень загрязнения в прибрежной зоне морей и озер площадью более 10000 м²

| Засоленность | Расчетная соленость воды, г/л | Расстояние от береговой линии, км | СЗ |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----|
| Незасоленный | до 2 | до 0,1 | 1 |
| Слабозасоленный | от 2 до 10 | до 0,1 | 2 |
| | | от 0,1 до 1,0 | 1 |
| Среднезасоленный | от 10 до 20 | до 0,1 | 3 |
| | | от 0,1 до 1,0 | 2 |
| | | от 1,0 до 5,0 | 1 |
| Сильнозасоленный | от 20 до 40 | до 1,0 | 3 |
| | | от 1,0 до 5,0 | 2 |
| | | от 5,0 до 10,0 | 1 |

Таблица 16.4

Степень загрязнения вблизи ТЭС и промышленных котельных

| Вид топлива для ТЭС и котельных | Мощность ТЭС или котельной, МВт | Высота дымовых труб, м | СЗ при расстоянии от источника загрязнения, м | | | | | |
|--|---------------------------------|------------------------|---|---------|---------|-----------|-----------|---------|
| | | | до 250 | 250–499 | 500–999 | 1000–1499 | 1500–2999 | от 3000 |
| Угли при зольности менее 30%, мазут, газ | Независимо от мощности | любая | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Угли при зольности более 30% | до 1000 | любая | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | от 1000 до 4000 | до 180 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | | от 180 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Сланцы | до 500 | любая | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| | от 500 до 2000 | до 180 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| | | от 180 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |

Коэффициенты использования длины пути утечки k для одностоячных изоляционных опор составляют 1,0...1,3. Для значительно-го числа изоляторов коэффициент k равен единице.

16.3. Выбор изоляционных расстояний

Наименьшие расстояния в свету между неизолированными токоведущими частями, элементами оборудования и изоляции, находящимися под напряжением, до заземленных конструкций $a_{\phi-31}$, а также между токоведущими частями разных фаз $a_{\phi-\phi1}$ должны оставаться больше наименьших (допустимых) расстояний, соответственно, $A_{\phi-3}$ и $A_{\phi-\phi}$, установленных ПУЭ:

$$a_{\phi-31} \geq A_{\phi-3}; \quad (16.2)$$

$$a_{\phi-\phi1} \geq A_{\phi-\phi}. \quad (16.3)$$

В закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) $a_{\phi-31}$ и $a_{\phi-\phi1}$ соответствуют монтажным расстояниям в свету $a_{\phi-30}$ и $a_{\phi-\phi0}$ (рис. 16.1) и определяются без учета внешних воздействий. В открытых распределительных устройствах (ОРУ) $a_{\phi-31}$ и $a_{\phi-\phi1}$ определяются с учетом воздействия ветровой нагрузки, равной 60% максимальной расчетной.

Наименьшие расстояния в свету между ошиновкой и заземленными элементами ОРУ определяются по формуле

$$a_{\phi-z1} = a_{\phi-z0} + y_{1\max}, \quad (16.4)$$

где $a_{\phi-z0}$ – расстояние в свету между ошиновкой и заземленными элементами без учета внешних воздействий (монтажные расстояния); $y_{1\max}$ – максимальный прогиб ошиновки (шины или изолятора) при воздействии ветровой нагрузки в плоскости изменения габарита (рис. 16.1).

С запасом $y_{1\max}$ может быть принят равным наибольшему прогибу шины (как правило, в среднем сечении) y_{\max} .

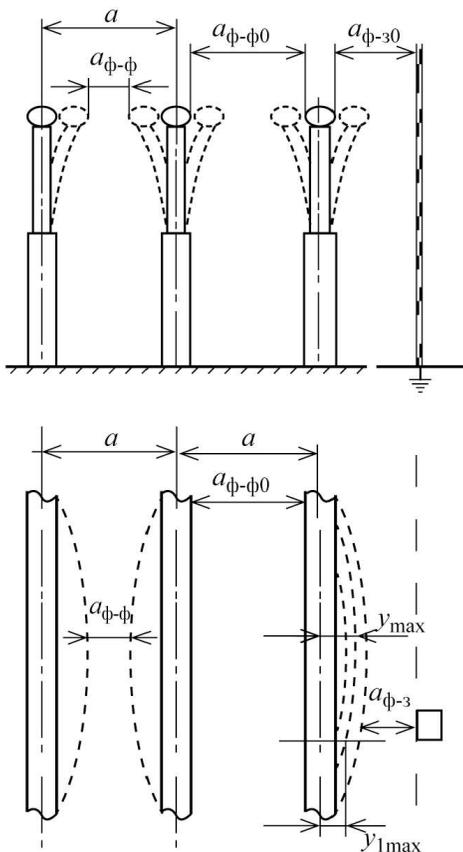


Рис.16.1. К определению наименьших расстояний в свету $a_{\phi-z}$ и $a_{\phi-\phi}$.

В ОРУ наибольшие расстояния в свету между фазами зависят от взаимного расположения шин, а также изоляторов соседних фаз. Если шины расположены в одной горизонтальной плоскости, а изоляторы соседних фаз на одной оси, перпендикулярной шинам

(см. рис. 16.1), наименьшие расстояния в свету между фазами определяются по формуле

$$a_{\text{ф-ф1}} = (a - D) - 2y_{\text{max}}, \quad (16.5)$$

где a – расстояние между фазами (осями шин фазы), м; D – диаметр шины, м; y_{max} – наибольший прогиб шины при ветровой нагрузке, равной 60% максимальной.

Расчет прогибов при ветровых нагрузках рассматривается ниже (см. п. 16.8).

16.4. Проверка ошиновки по условиям короны

Шины должны проверяться по условиям короны. Общая корона на шинах не возникает, если выполняется неравенство

$$E_{\text{max}} \leq 0,9E_0, \quad (16.6)$$

где E_{max} – максимальная напряженность электрического поля на поверхности шин при среднем эксплуатационном напряжении; E_0 – начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда, которая определяется с учетом среднегодовых значений плотности воздуха и температуры на высоте расположения шин.

В распределительных устройствах (РУ) напряжением до 35 кВ шины, изготовленные по действующим техническим условиям и выбранные в соответствии с другими техническими требованиями (нагрузочной способности, термической и электродинамической стойкости), независимо от их формы как правило удовлетворяют требованиям отсутствия коронного разряда. В РУ напряжением 110 кВ и выше для устранения коронного разряда используются шины только круглого кольцевого сечения. Для шин круглого сечения условие (16.6) выполняется, если внешний диаметр шины D больше или равен минимальному допустимому диаметру по условию короны, т. е.

$$D \geq D_{\text{доп.}} \quad (16.7)$$

Минимальные допустимые диаметры трубчатых одиночных шин при нормальных атмосферных условиях (давление воздуха $p_{\text{в}} = 1,013 \cdot 10^5$ Па, т.е. 760 мм рт. ст., температура воздуха $\vartheta_{\text{в}} = 20$ °С) при наименьших допустимых расстояниях между фазами, а также фазами и землей приведены в табл. 16.5.

**Минимальные допустимые диаметры
шин по условиям короны**

| | | | | | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $U_{\text{доп}}$, кВ | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 | 1150 |
| $D_{\text{доп}}$, мм | 9 | 24 | 36 | 55 | 84 | 140 |

Как правило шины, удовлетворяющие другим требованиям, отвечают условию (16.7) и, следовательно, (16.6).

Кроме проверки по условию (16.6) или (16.7), необходимо проведение испытаний по условиям короны и радиопомех элементов ошиновки (в частности, узлов крепления шины к опорным изоляторам, электрическим аппаратам и измерительным трансформаторам, а также узлов поворотов и ответвлений шин), поскольку расчеты сложных узлов представляют собой достаточно трудоемкую задачу. Кроме того, испытания позволяют учесть все особенности конструкции, включая технологические отклонения.

**16.5. Проверка элементов ошиновки
по допустимым температурным
деформациям шин**

Температурные деформации (удлинения или сжатия) шин не должны приводить к дополнительным усилиям на изоляционные опоры и механическим напряжениям в шинах, что обеспечивается соответствующей конструкцией шинодержателей, установкой компенсаторов тепловых расширений (деформаций) и другими конструктивными решениями. Неправильно выбранные или установленные температурные компенсаторы могут приводить к серьезным технологическим нарушениям или авариям. На рис. 16.2 приведена фотография сборных шин ОРУ 220 кВ, поврежденных в результате недостаточной температурной компенсации при снижении токовой нагрузки и охлаждении шин до температуры воздуха в зимний период.

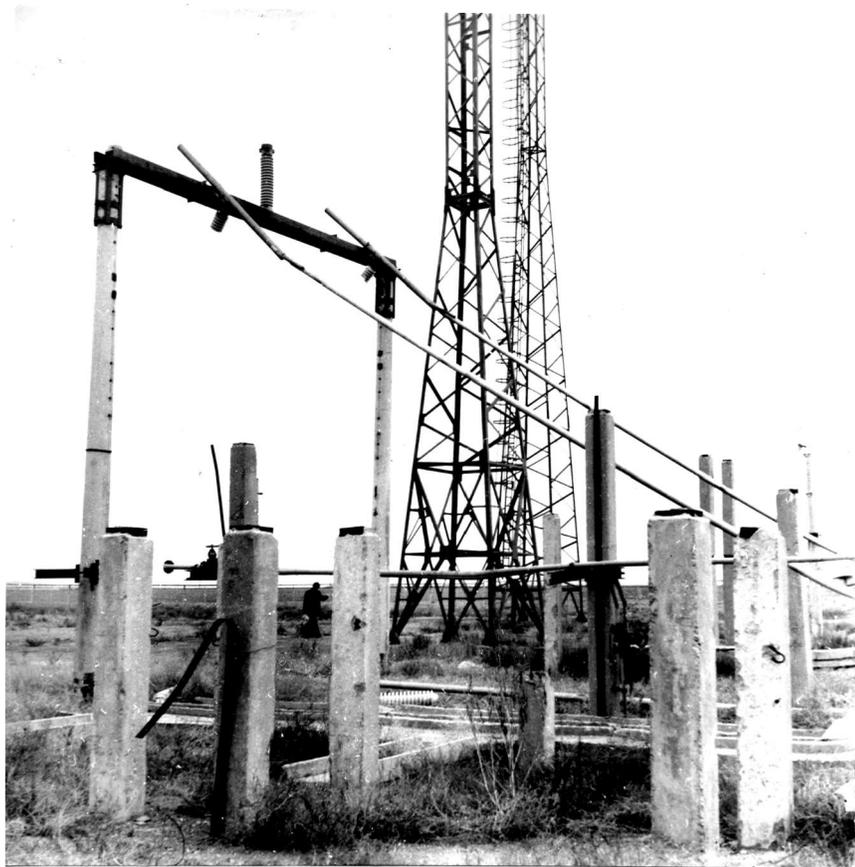


Рис. 16.2. Поврежденные сборные шины ОРУ 220 кВ

Для выполнения указанных выше требований длина неразрезного (целого или сварного) участка шины должна отвечать условиям

$$L(\vartheta_{\min}) \geq L_{\text{доп min}}; \quad (16.8a)$$

$$L(\vartheta_{\max}) \leq L_{\text{доп max}}; \quad (16.8б)$$

где $L_{\text{доп min}}$ и $L_{\text{доп max}}$ – минимальные и максимальные допустимые длины неразрезного отрезка шины, м, определяемые конструкцией шины, шинодержателей и температурных компенсаторов; $L(\vartheta_{\min})$ и $L(\vartheta_{\max})$ – длины этого отрезка соответственно при минимальной ϑ_{\min} и максимальной ϑ_{\max} температурах шины.

Минимальная температура шины ϑ_{\min} наступает при отключении цепи в зимний период и равна абсолютной минимальной температуре воздуха $\vartheta_{\text{в min}}$ в районе расположения ОРУ или ожидаемой температуре в помещении ЗРУ. В РУ всех типов эту температуру можно принимать равной минимальной температуре окружающей среды, установленной для оборудования соответствующего климатического исполнения (например, для ХЛ1 $\vartheta_{\min} = -60$ °С).

Максимальная температура шины ϑ_{\max} наступает при коротком замыкании. С запасом эту температуру ϑ_{\max} можно принять равной допустимой температуре нагрева шин при коротком замыкании (например для шин из алюминия и его сплавов она равна 200 °С).

Длина неразрезного отрезка шины при различных температурах составляет

$$L(\vartheta) = L_0 \prod_{i=1}^k (1 + \alpha_{ji} \Delta\vartheta_i) \approx L_0 (1 + \alpha_{\text{ср}} \Delta\vartheta), \quad (16.9)$$

где L_0 – начальная (монтажная) длина шины при температуре ϑ_0 ; $\Delta\vartheta_i = \vartheta_i - \vartheta_{i-1}$ – температурный интервал, °С; $i = 1, 2, \dots, k$ – номер температурного интервала; α_{ji} – коэффициент температурного удлинения на i -ом интервале, $1/^\circ\text{C}$; $\alpha_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента температурного удлинения в интервале температур ($\vartheta_{\min}, \vartheta_{\max}$), $1/^\circ\text{C}$; $\Delta\vartheta$ – средний температурный интервал, °С, равный $\vartheta - \vartheta_0$.

Значения коэффициента температурного удлинения некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл. 16.6.

Таблица 16.6

Коэффициенты температурного удлинения алюминиевых сплавов

| Марка сплава | Коэффициент α_{ji} , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, в интервале температур, °С | | | |
|----------------------|--|----------|-----------|-----------|
| | -60 ÷ +20 | 21 ÷ 100 | 101 ÷ 200 | 201 ÷ 300 |
| АД, АД0, АД1 | 22,0 | 23,5 | 25,4 | 27,4 |
| АМг5 | 22,5 | 24,1 | 26,3 | 28,2 |
| АД31, АД31Т, АД 31Т1 | – | 23,4 | 25,3 | 28,2 |
| АД33, АД33Т, АД 33Т1 | – | 23,2 | 25,1 | 26,7 |
| АД35, АД35Т, АД 35Т1 | – | 23,6 | 25,5 | 27,1 |
| АВ, АВТ, АВТ1 | 21,8 | 23,5 | 25,1 | 27,6 |
| 1915, 1915Т | – | 25,6 | 27,2 | 27,0 |

16.6. Выбор шин по нагреву в рабочих режимах

В рабочих режимах температура нагрева шин ϑ не должна превышать (длительно) допустимого значения $\vartheta_{\text{доп}}$, т.е.

$$\vartheta \leq \vartheta_{\text{доп}} . \quad (16.10)$$

Допустимые температуры нагрева алюминиевых и медных шин, а также разъемных контактных соединений в рабочих режимах приведены в табл.16.7. Они определяются требованиями надежности разъемных контактных соединений, а также необходимостью иметь достаточный уровень «запаса» по возможности дополнительного нагрева шин при коротком замыкании.

Для шин, не имеющих разъемных контактов, допустимая температура составляет 120 °С (см. табл.16.7). Для разъемных контактных соединений (например, болтовых) медь-медь или алюминий-алюминий (а также их сплавов) допустимая температура равна 90 °С. Следует отметить, что температура шин вблизи контактных соединений (например, с выводами электрических аппаратов) не должна превышать допустимой температуры контакта. При этом принято, что нормативное значение температуры окружающей среды (воздуха) равно 40 °С. Поэтому, кроме предельной допустимой температуры нормируется допустимый перепад температур между проводниками и воздухом, значения которого также указаны в табл. 16.7.

Таблица 16.7

**Допустимые температуры нагрева шин и разъемных
контактных соединений**

| Части токопроводов и материалы, из которых они изготовлены | Наибольшая допустимая температура нагрева, °С | Допустимый перепад темпе- ратур, °С |
|--|--|---|
| Токоведущие неизолированные проводники (шины) | 120 | 80 |
| Контактные (разъемные) соединения на воздухе: | | |
| – из меди, алюминия и их сплавов без покрытий; | 90 | 50 |
| – из меди и медных сплавов с покрытием серебром; | 120 | 80 |
| – из алюминия и его сплавов с покрытием серебром | 110 | 70 |

Наибольший рабочий ток, при котором выполняется неравенство (16.10), называется допустимым током $I_{\text{доп}}$ (или номинальным током шин $I_{\text{ном}}$). Поэтому работоспособность шин по условию нагрева в рабочем режиме можно проверить по условию

$$I_{\text{раб.нб}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (16.11)$$

где $I_{\text{раб.нб}}$ – наибольший рабочий ток, А.

Наибольший рабочий ток определяется для сборных шин станций и подстанций, а также шин в цепи секционных и шиносоединительных выключателей – при наиболее неблагоприятных эксплуатационных условиях (при наибольших перепадах мощности); для цепи трансформаторов – с учетом их перегрузочной способности; для параллельных или взаиморезервирующих цепей – при отключении одной из них; для цепи генератора – при работе с номинальной мощностью и снижении напряжения на 5% от номинального значения.

Допустимый (номинальный) ток шин определяется, как правило, экспериментально. Однако такие испытания обычно проводятся в закрытых помещениях. Для учета особенностей теплообмена в наружных установках выполняют контрольные расчеты.

Уравнение теплового баланса шины в рабочем режиме (при условии достаточно длительной неизменной нагрузке) в общем виде записывается так:

$$I^2 R_{\text{аф}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{л}} - Q_{\text{с}}, \quad (16.12)$$

где I – рабочий ток; $R_{\text{аф}}$ – активное сопротивление шины при температуре ϑ ; $Q_{\text{к}}$ и $Q_{\text{л}}$ – тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением (лучеиспусканием); $Q_{\text{с}}$ – тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации.

Активное сопротивление шины на один метр длины, Ом/м, при допустимой температуре шины равно

$$R_{\text{а}} = k_{\text{п}} R = k_{\text{п}} \frac{\rho}{S} \left[1 + \alpha_{\text{р}} (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0) \right], \quad (16.13)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент поверхностного эффекта; R – сопротивление шины постоянному току на 1 м длины, Ом/м, при температуре $\vartheta_{\text{доп}}$; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре ϑ_0 , обычно равной 20 °С; $\alpha_{\text{р}}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления в интервале температур от ϑ_0 до $\vartheta_{\text{доп}}$, равный, для алюминия и его сплавов 0,004 1/°С; S – площадь поперечного сечения шины, м².

Значения удельного электрического сопротивления алюминиевых сплавов разных марок при температуре 20 °С приведены в табл. 16.8.

Удельные электрические сопротивления алюминиевых сплавов

| Марка сплава | Удельное электрическое сопротивление ρ при температуре 20 °С, 10^{-6} Ом·м |
|--------------|---|
| АД0 | 0,029 |
| АД0М, АД1М | 0,029 |
| АД31Т | 0,035 |
| АД31Т1 | 0,0325 |
| АД33Т | 0,043 |
| АД33Т1 | 0,040 |
| АВТ | 0,041 |
| АВТ1 | 0,038 |
| 1911Т1 | 0,045 |
| 1915, 1915Т | 0,0517 |

Рассмотрим расчет шин круглого или кольцевого сечений. Коэффициент поверхностного эффекта таких шин приближенно можно определить по формуле

$$k_{\text{ш}} = 1 + 3,3 \cdot 10^{-10} \left(\frac{b}{DR} \right)^2, \quad (16.14)$$

где b и D – собственная толщина стенки и внешний диаметр шины; постоянный коэффициент $3,3 \cdot 10^{-10}$ имеет размерность Ом^2 .

Для шин РУ 110 – 500 кВ, как правило, коэффициент поверхностного эффекта может быть принят равным единице.

Тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением, на метр длины, Вт/м, определяются как

$$Q_{\text{к}} = F_{\text{к}} q_{\text{к}}; \quad (16.15,а)$$

$$Q_{\text{л}} = F_{\text{л}} q_{\text{л}}, \quad (16.15,б)$$

где $q_{\text{к}}$ и $q_{\text{л}}$ – плотности теплового потока (удельные теплоотдачи) конвекцией и излучением, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $F_{\text{к}} = F_{\text{л}} = \pi D$ – конвектирующие и излучающие поверхности трубчатых шин (на 1 м длины), $\text{м}^2/\text{м}$.

Удельная теплоотдача конвекцией определяется по формуле

$$q_k = \alpha_k \theta = \frac{Nu \lambda_v}{D} \theta, \quad (16.16)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи при конвекции, Вт·°С /м²; $\theta = \vartheta - \vartheta_B$ – перепад температур между шиной и воздухом, °С; λ_v – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С), значения которого указаны в табл.16.9; Nu – число Нуссельта, которое для газов является критериальной зависимостью вида $Nu = f(Gr, Re)$, где Gr – число Грасгофа; Re – число Рейнольдса.

Числа Грасгофа и Рейнольдса определяются по формулам:

$$Gr = g\beta_v \theta D^3 / v_B^2; \quad (16.17)$$

$$Re = VD / v_B, \quad (16.18)$$

где $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; β_v – температурный коэффициент объемного расширения воздуха, примерно равный $1/T_B$; v_B – кинетический коэффициент вязкости воздуха, м²/с (см. табл.16.9); V – скорость ветра, м/с; $T_B = \vartheta_B + 273$ – термодинамическая температура воздуха, К.

Внутри помещения (в ЗРУ) теплоотдача q_k в основном определяется свободной (естественной) конвекцией ($Re = 0$); вне помещений (в ОРУ) преобладает вынужденная конвекция, однако при малых скоростях ветра (в том числе при штиле), теплообмен происходит в условиях смешанной (вынужденной и естественной) конвекции.

Число Нуссельта для трубчатых шин определяется по формулам:

– при свободной конвекции в области чисел Грасгофа $1,4 \cdot 10^3 \leq Gr \leq 1,4 \cdot 10^8$ (характерных для жестких трубчатых шин)

$$Nu = 0,46Gr^{0,25}; \quad (16.19)$$

– при вынужденной конвекции (без учета естественной)

$$Nu = \begin{cases} 0,437Re^{0,5}, & \text{при } 5 < Re \leq 10^3; \\ 0,218Re^{0,6}, & \text{при } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,0201Re^{0,8}, & \text{при } 3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6. \end{cases} \quad (16.20)$$

Таблица 16.9

Физические свойства сухого воздуха

| Температура $t_{в}, ^\circ\text{C}$ | Плотность $\delta, \text{кг/м}^3$ | Коэффициент теплопроводности $\lambda_{в} \cdot 10^{-2}, \text{Вт/(м} \times ^\circ\text{C)}$ | Кинетический коэффициент вязкости $\nu_{в} \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$ |
|--|--------------------------------------|--|---|
| -50 | 1,584 | 2,04 | 9,23 |
| -40 | 1,515 | 2,12 | 10,04 |
| -30 | 1,453 | 2,20 | 10,80 |
| -20 | 1,395 | 2,28 | 11,61 |
| -10 | 1,342 | 2,36 | 12,43 |
| 0 | 1,290 | 2,44 | 13,28 |
| 10 | 1,247 | 2,51 | 14,16 |
| 20 | 1,205 | 2,59 | 15,06 |
| 30 | 1,165 | 2,67 | 16,00 |
| 40 | 1,128 | 2,76 | 16,96 |
| 50 | 1,093 | 2,83 | 17,95 |

Примечание. Параметры приведены при давлении воздуха $1,013 \cdot 10^5$ Па, что соответствует 760 мм рт. ст.

Наиболее тяжелые условия для шин ОРУ возникают при штиле (V не более 0,6 м/с). Тем не менее, конвективная теплоотдача шин в ОРУ за счет естественного движения воздуха оказывается выше, чем в ЗРУ (при естественной конвекции).

Если свободный и вынужденный потоки имеют одно и тоже направление, что характерно для штиля (при наличии восходящих воздушных потоков), в формулу (16.20) вместо Re следует подставлять эквивалентный критерий Рейнольдса Re^* , определяемый по формуле

$$Re^* = Re + \sqrt{0,5Gr}. \quad (16.21)$$

Если вынужденный поток (ветер) направлен в горизонтальной плоскости, то эквивалентный критерий Рейнольдса Re^* определяется по формуле

$$Re^* \approx \sqrt{Re^2 + 0,5Gr}. \quad (16.22)$$

Расчет удельного конвективного теплообмена шин ОРУ при штиле проводится при скорости ветра 0,6 м/с по формуле (16.16) с учетом (16.19) и (16.20).

Экспериментально установлено, что удельная теплоотдача конвекцией, Вт/м^2 , при штиле приближенно может быть определена по формуле

$$q_k \approx 1,610^{1,3} D^{-0,25}. \quad (16.23)$$

Расчеты удельной теплоотдачи конвекцией при штиле по формуле (16.23) и (16.16) дают весьма близкие результаты.

Конвективные тепловые потоки в ЗРУ и ОРУ (при штиле) на 1 м длины шины можно определить по формуле, удобной для расчетов

$$Q_k = C_k D^{0,75}. \quad (16.24)$$

Значения параметра C_k , Вт·м^{-1,75} при температуре воздуха 40 °С и температурах нагрева шин 90 и 120 °С приведены в табл. 16.10.

Таблица 16.10

Значения параметров C_k и $C_{л}$

| Обозначение параметра и его размерность | Условия эксплуатации | Значения параметров при температуре воздуха $\vartheta_B = 40$ °С и | |
|---|----------------------|---|------------------------|
| | | $\vartheta_1 = 90$ °С | $\vartheta_2 = 120$ °С |
| C_k , Вт·м ^{-1,75} | ЗРУ | 542 | 975 |
| | ОРУ (штиль) | 818 | 1506 |
| $C_{л}$, Вт/м ² | ЗРУ и ОРУ | 1383 | 2539 |

Теплоотдача излучением в соответствии с уравнением Стефана – Больцмана и Кирхгофа определяется по формуле

$$q_{л} = \varepsilon c_o \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right], \quad (16.25)$$

где ε – степень черноты или коэффициент излучения поверхности шины (см. табл.16.11); $c_o = 5,67$ – излучающая способность абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $T = \vartheta + 273$ – термодинамическая температура шины, К; $T_B = \vartheta_B + 273$ – термодинамическая температура воздуха, К.

Тепловой поток излучением (см. 16.15б) удобно определять по формуле

$$Q_{л} = C_{л} \varepsilon D, \quad (16.26)$$

где $C_{л} = (T/100)^4 - (T_B/100)^4$ – параметр, Вт/м², значения которого при температурах шин 90 и 120 °С приведены в табл.16.10.

Тепловой поток Q_c , поглощаемый шиной от солнечной радиации, в ЗРУ, а также в ОРУ в ночное время и при облачности равен нулю. В наружных установках в солнечный день тепловой поток,

поглощаемый цилиндрической поверхностью шины длиной 1 м, составляет

$$Q_c = a_c q_c D, \quad (16.27)$$

где a_c – коэффициент поглощения солнечной радиации; q_c – интенсивность солнечной радиации, Вт/м².

Интенсивность солнечной радиации зависит от широты местности, времени года и суток, состояния атмосферы, а также угла наклона шины к солнечным лучам. Наибольшие значения q_c на территории РФ получаются в летний период и достигают 900 – 950 Вт/м².

Значения коэффициентов ϵ и a_c для различных поверхностей указаны в табл.16.11. В инженерных расчетах обычно принимают для неокрашенных шин из алюминия и его сплавов $\epsilon = 0,15$ и $a_c = 0,5$; для окрашенных шин $\epsilon = 0,9$ (при любом цвете), а a_c – средним значениям, указанным в табл. 16.11 (в зависимости от цвета краски).

Таблица 16.11

Степень черноты и коэффициент поглощения солнечной радиации при разных материалах шин и разных цветах краски

| Материал шины или цвет краски | Степень черноты, ϵ | Коэффициент поглощения солнечной радиации, a_c |
|-------------------------------|-----------------------------|--|
| Алюминий и его сплавы | | |
| полированный | 0,04–0,06 | 0,15–0,26 |
| шероховатый | 0,05–0,1 | 0,25–0,52 |
| окисленный | 0,11–0,19 | 0,32–0,65 |
| Эмаль белая | 0,6–0,8 | 0,3 |
| Масляная краска | | |
| белая | 0,81 | 0,3 |
| желтая | 0,9–0,92 | 0,44 |
| зеленая | 0,9–0,92 | 0,61–0,7 |
| черная | 0,9–0,92 | 0,9–0,98 |

Как видно из данных табл.16.11 окраска шин в ЗРУ позволяет в 4–5 раз повысить тепловой поток излучением и тем самым снизить температуру шины и соответственно увеличить рабочий ток. В ОРУ эффективность теплоотдачи в значительной мере зависит от цвета краски. Наилучшие результаты достигаются при окраске проводников белой краской. Именно поэтому так окрашивают экраны мощных генераторных токопроводов.

В соответствии с (16.12) допустимый (номинальный) рабочий ток шины определяется по формуле

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{Q_k + Q_{\text{л}} - Q_c}{R_a}}, \quad (16.28)$$

в которой значения R_a , Q_k и $Q_{\text{л}}$ должны соответствовать длительно допустимой температуре шины $\vartheta_{\text{доп}}$.

В качестве примера на рис. 16.3 приведены зависимости допустимых токов неокрашенных шин, выполненных из сплава 1915Т и проложенных в ОРУ (рис. 16.3,а) и ЗРУ (рис. 16.3,б) при температуре воздуха 40 °С и длительно допустимой температуре 120 °С от диаметра шин при различной толщине их стенок.

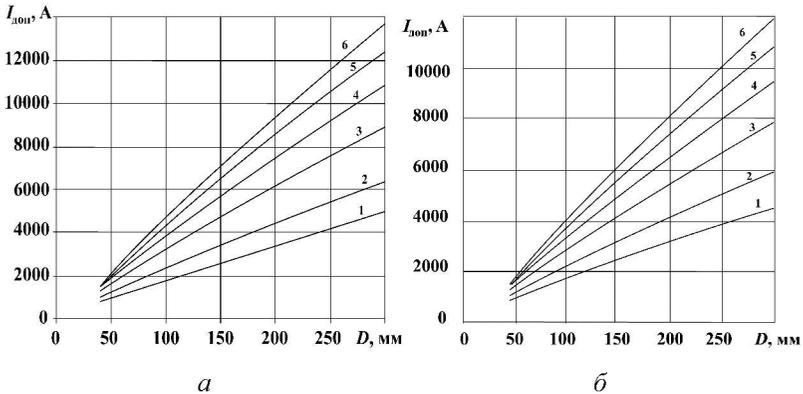


Рис. 16.3. Допустимые токи неокрашенных шин, выполненных из сплава 1915Т и проложенных в ОРУ (а) и ЗРУ (б) при температуре воздуха 40 °С и длительно допустимой температуре 120 °С:

кривая 1 для шин с толщиной стенки 3 мм; 2–5 мм;
3–10 мм; 4–15 мм; 5–20 мм; 6–25 мм

При известном значении $I_{\text{доп1}}$, определенном при температуре окружающего воздуха $\vartheta_{\text{в1}}$ или допустимой температуре $\vartheta_{\text{доп1}}$, значения допустимого тока $I_{\text{доп2}}$ при иной температуре воздуха $\vartheta_{\text{в2}}$ или $\vartheta_{\text{доп2}}$ приближенно определяются по формуле

$$I_{\text{доп2}} \approx I_{\text{доп1}} \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{доп2}} - \vartheta_{\text{в2}}}{\vartheta_{\text{доп1}} - \vartheta_{\text{в1}}}}. \quad (16.29)$$

16.7. Проверка шин по допустимым прогибам

Длиннопролетные жесткие шины могут иметь значительный прогиб, даже при отсутствии внешних воздействий. Если значение прогиба шины велико, это вызывает негативную реакцию эксплуатационного персонала. Имели место случаи, когда при заметных прогибах шин от собственного веса, устанавливали дополнительные изоляторы в середине пролета, чтобы устранить отрицательное воздействие на персонал. Относительно большие прогибы шин имеют место как в ЗРУ, так и в ОРУ напряжением 110 кВ и выше, а в ряде случаев и в ОРУ 35 кВ.

По эстетико-психологическим требованиям наибольший (статический) прогиб шин от собственного веса $y_{ст\ max1}$, а также от силы тяжести ответвлений не должен превышать допустимого значения $y_{ст\ доп1}$, принятого равным $l/100$ от длины пролета шины l , т.е.

$$y_{ст\ max1} \leq y_{ст\ доп1} = l/100. \quad (16.30)$$

В ОРУ при гололеде максимальный прогиб шин $y_{ст\ max2}$ не должен быть более $l/80$ длины пролета, т.е.

$$y_{ст\ max2} \leq y_{ст\ доп2} = l/80. \quad (16.31)$$

В пролетах без ответвлений, а также в пролетах с ответвлениями, выполненными у осей опор (изоляторов), максимальные прогибы шин обусловленные только собственным весом, определяются по формуле

$$y_{ст\ max1} = mgl/c_{ш}, \quad (16.32)$$

где m – масса шины на единицу длины, кг/м; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; l – длина пролета шины, м; $c_{ш}$ – жесткость шины, Н/м, которая зависит от расчетной схемы пролета шины (способа закрепления шины) и определяется по формулам, указанным в табл. 16.12.

Максимальный статический прогиб шин при гололеде $y_{ст\ max2}$ определяется по формуле (16.32), в которой масса m принимается равной сумме погонных масс шины и гололеда $m_{г}$ на единицу длины.

Для шин круглого сечения масса гололедных отложений на единицу длины определяется по формуле

$$m_{г} = \rho_{г}(Db_{п} + b_{п}^2) \cdot 10^{-6}, \quad (16.33)$$

где $\rho_{г}$ – нормативная плотность гололеда, равная 900 кг/м³; D – диаметр шины, мм; $b_{п} = b_{г}k_{г}k_{д}$ – расчетная толщина стенки гололеда, мм; $b_{г}$ – нормированная толщина стенки гололеда на высоте 10 м над поверхностью земли, мм, (см. табл. 16.13); $k_{г}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда по высоте, (см. табл. 16.14); $k_{д}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки гололеда в зависимости от диаметра шины (см. табл. 16.15).

Таблица 16.12

Определение жесткости шины при различных схемах пролета

| Расчетная схема пролета шины | Жесткость шины $c_{ш}$ |
|---|-----------------------------|
|  | $\frac{384EJ}{5 \cdot l^3}$ |
|  | $\frac{185EJ}{l^3}$ |
|  | $\frac{384EJ}{l^3}$ |

Примечание. E – модуль упругости материала шины, Па; J – момент инерции шины, m^4 .

Таблица 16.13

Значения нормированной толщины стенки гололеда b_r на высоте 10 м над поверхностью земли

| Гололедные районы России | I | II | III | IV | V | VI | VII | особый |
|-----------------------------|----|----|-----|----|----|----|-----|----------|
| Толщина стенки гололеда, мм | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | свыше 40 |

Таблица 16.14

Значения коэффициента k_r , учитывающего изменение толщины стенки гололеда по высоте

| Высота прокладки шины над поверхностью земли, м | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| Коэффициент k_r | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 |

Таблица 16.15

Значения коэффициента k_d , учитывающего изменение толщины стенки гололеда от диаметра шины

| Диаметр шины, мм | 30 | 50 | 70 и более |
|-------------------|-----|-----|------------|
| Коэффициент k_d | 0,8 | 0,7 | 0,6 |

Следует отметить, что проверка шин по допустимому статическому прогибу от собственного веса, а также от собственного веса и гололеда часто является определяющей для выбора диаметра и толщины стенки длиннопролетных шин. В качестве примера на рис. 16.4 приведены кривые зависимости прогиба $y_{ст \max l}$ трубчатых шин длиной $l = 30$ м, выпол-

ненных из сплава 1915Т, от диаметра D и толщины стенки b , при отсутствии гололеда. Штрихпунктирная прямая на рис. 16.4 ограничивает область допустимых прогибов от собственного веса шины.

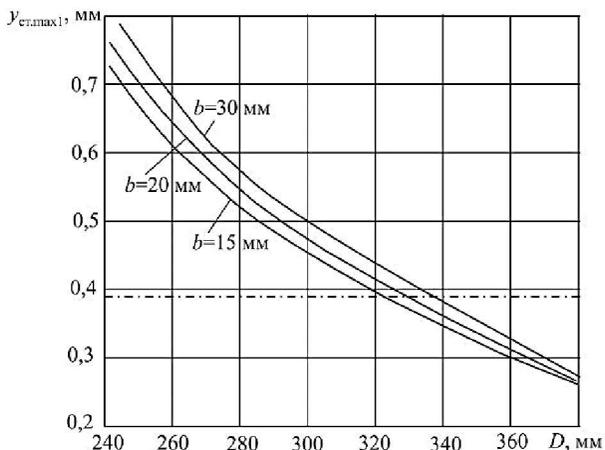


Рис. 16.4. Зависимость прогиба трубчатых шин длиной $l = 30$ м, выполненных из сплава 1915Т, под действием собственного веса от диаметра и толщины стенки шин

На рисунке 16.5 приведены кривые, ограничивающие область (показана серым цветом) допустимых значений внешнего D и внутреннего d диаметров шин, выполненных из сплава 1915Т, с длиной пролета 17,5 мм, отвечающих условию (16.30). Условия опирания шин на изоляционные опоры в примерах (рис.16.4 и 16.5) приняты шарнирными.

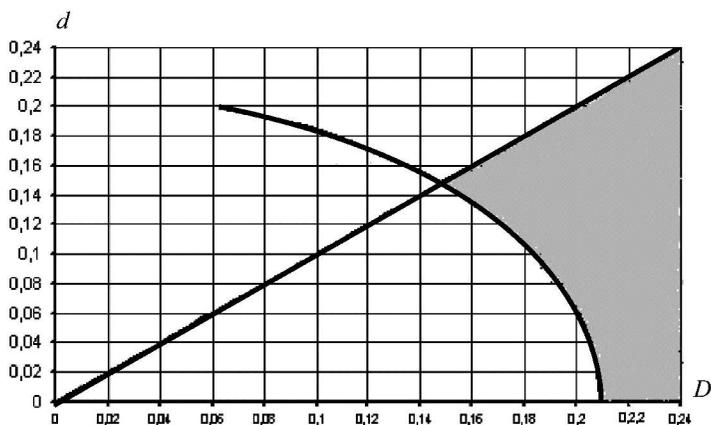


Рис. 16.5. Область допустимых значений внешнего D и внутреннего d диаметров шин,

16.8. Расчет шин на ветровую стойкость

При достаточно больших скоростях ветра движение воздуха в атмосфере всегда турбулентное, поэтому скорость ветра V можно представить как сумму статической \bar{V} и переменной (пульсирующей) $V(t)$ составляющих (см. рис. 16.6), т.е.

$$V(t) = \bar{V} + V(t). \quad (16.34)$$

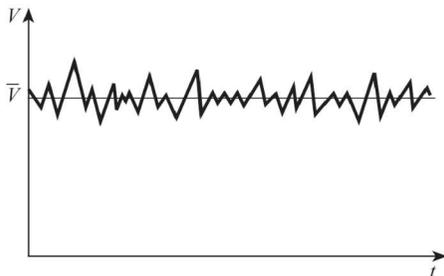


Рис. 16.6. Изменение скорости ветра во времени

Пульсации ветра вызваны торможением частиц воздуха из-за влияния поверхности земли, строений и других препятствий, конвективных потоков между различно нагретыми слоями, трения между слоями, движущимися с разной скоростью.

Соответственно ветровую нагрузку следует рассматривать как сумму ее средней (статической) и пульсационной (переменной) составляющих.

Статическая ветровая нагрузка, H , определяется по формуле

$$q_B = 0,5 \rho_B c_x D_{\text{эк}} \bar{V}_h^2 = c_x D_{\text{эк}} w_h, \quad (16.35)$$

где ρ_B — плотность воздуха, равная $1,23 \text{ кг/м}^3$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$; c_x — аэродинамический коэффициент (коэффициент лобового сопротивления); $D_{\text{эк}}$ — эквивалентный диаметр шины, м; \bar{V}_h — средняя скорость ветра на высоте расположения шины над поверхностью земли h , м/с; w_h — среднее значение составляющей ветрового давления на высоте h , Па.

Аэродинамический коэффициент c_x зависит от числа Рейнольдса (16.18). Для цилиндрических поверхностей c_x определяется по кривой на рис. 16.7.

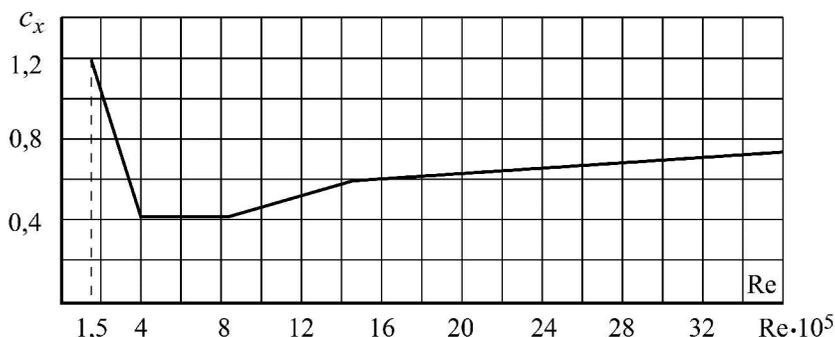


Рис. 16.7. К определению коэффициента лобового сопротивления шин круглого сечения

Средняя скорость ветра, а также ветровое давление на высоте h вычисляются по формулам:

$$\bar{V}_h = \sqrt{K_w} V_0 ; \quad (16.36)$$

$$\bar{w}_h = K_w w_0 , \quad (16.37)$$

где V_0 и w_0 – нормативные скорость ветра и ветровое давление на высоте 10 м над поверхностью земли в зависимости от ветрового района; K_w – коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра (ветрового давления) по высоте.

Нормативные значения ветрового давления и скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли согласно ПУЭ и другим документам приведены в табл. 16.16.

Таблица 16.16

Нормативные значения ветрового давления и скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью земли

| Район по ветру | Нормативное ветровое давление w_0 , Па | Нормативная скорость ветра V_0 , м/с |
|----------------|--|--|
| I | 400 | 25 |
| II | 500 | 29 |
| III | 650 | 32 |
| IV | 800 | 36 |
| V | 1000 | 40 |
| VI | 1250 | 45 |
| VII | 1500 | 49 |
| особый | выше 1500 | выше 49 |

Значения коэффициента K_w , учитывающего изменение скорости ветра (ветрового давления) по высоте, зависят от типа местности, где расположено ОРУ (см. табл. 16.17). Различают три типа местности:

А – открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи и тундра;

В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой от 10 до 25 м;

С – городские районы с застройкой зданиями высотой более 10 м.

Открытое РУ считается расположенным в местности данного типа, если эта местность простирается с наветренной стороны на расстоянии не менее $30h$ (где h – высота расположения шин над поверхностью земли) от ошиновки.

Таблица 16.17

Значения коэффициента, учитывающего изменение скорости ветра и ветрового напора по высоте

| Высота расположения шин над поверхностью земли h , м | Значение коэффициента K_w для типов местности | | |
|--|---|------|------|
| | А | В | С |
| 5 | 0,75 | 0,5 | 0,4 |
| 10 | 1,0 | 0,65 | 0,4 |
| 20 | 1,25 | 0,85 | 0,55 |
| 40 | 1,5 | 1,1 | 0,8 |
| 60 | 1,7 | 1,3 | 1,0 |

Скорость и давление пульсационной (переменной) составляющей ветра в пролете жесткой шины без существенной погрешности можно принять неизменными по фронту. Вместе с тем, пульсации скорости ветра во времени носят нерегулярный, случайный характер. В течение интервала времени, существенно превышающего преобладающий период пульсаций, статистические свойства переменной составляющей скорости ветра $v(t)$ и, следовательно, значения ветрового давления и нагрузки можно считать практически неизменными. Поэтому эти параметры можно трактовать как стационарные случайные функции времени.

Для описания характеристик стационарного случайного процесса удобно использовать спектральную плотность, называемую также спектральной мощностью или спектральной плотностью энергии. В качестве примера на рис. 16.8 приведена зависимость спектральной плотности скорости ветра S_V от (угловой) частоты пульсаций ω . Произведение спектральной плотности скорости ветра S_V на элементарную частоту пульсаций $d\omega$ соответствует мощности этих пульсаций, заключенных в интервале от ω до $(\omega + d\omega)$.

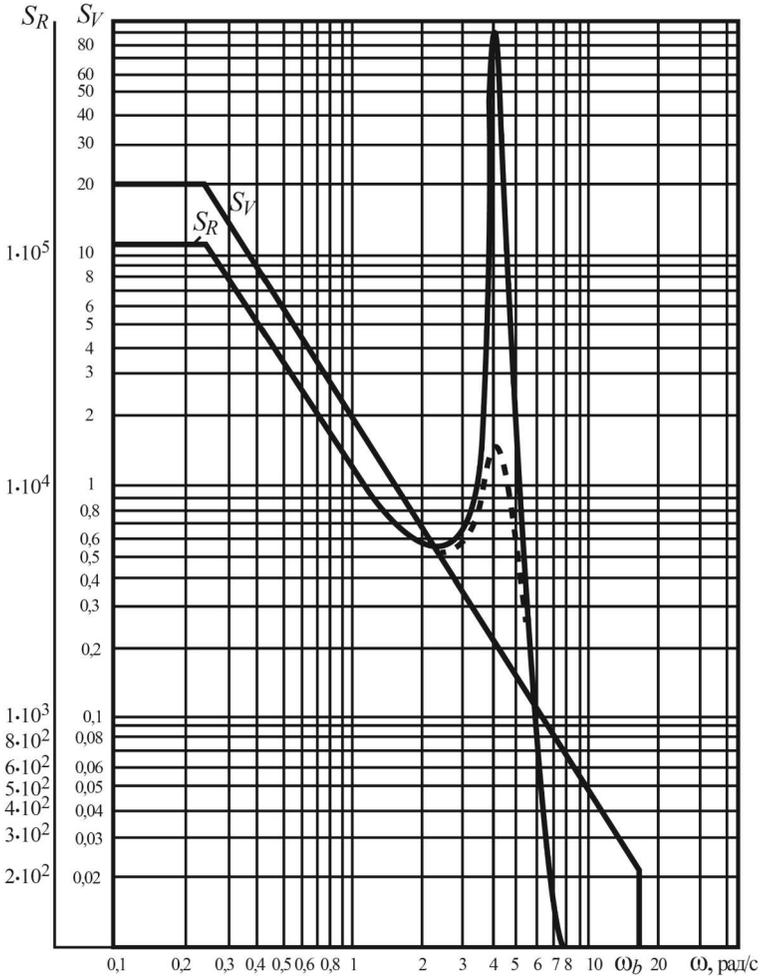


Рис. 16.8. Зависимости спектральной плотности скорости ветра и спектральной плотности нагрузок на изоляторы от частоты пульсаций

Спектральную плотность скорости ветра можно аппроксимировать по закону $\omega^{-5/3}$. Вместе с тем в области низких частот пульсаций ($\omega \leq \omega_H \approx 0,25$ рад/с) спектральная плотность скорости ветра пропорциональна нулевой степени частоты. В области высоких частот пульсаций ($\omega > \omega_B \approx 15,7 \dots 31,4$ рад/с), мощность пульсаций очень мала. Кроме того, они «отфильтровываются» колебательной системой (шинной конструкцией). Поэтому в инженерных расчетах при $\omega \geq \omega_B$ спектральная плотность S_V принимается равной нулю.

Пульсирующая составляющая ветровой нагрузки, действуя на жесткую ошиновку, вызывает прогибы шинной конструкции, нагрузки на изоляторы, напряжения в материале шины, которые также носят случайный характер. На рисунке 16.8 приведены зависимости спектральных плотностей нагрузок на изоляторы S_R шинной конструкции напряжением 220 кВ с длиной пролета 15 м и внешним диаметром шин 130 мм, имеющей частоту собственных колебаний 0,7 Гц ($\Omega = 4,4$ рад/с), при шарнирном опирании на опоры. Условия атмосферы приняты равными: давление – 760 мм рт. ст., температура 15 °С, плотность воздуха 1,23 кг/м³. Средняя (статическая) скорость

ветра на высоте расположения шины $V_h = 20$ м/с. Сплошная кривая S_R построена для конструкции с логарифмическим декрементом затухания $\delta = 0,1$, штрихпунктирная – $\delta = 0,8$.

Если затухание невелико ($\delta = 0,1$), то упругая система шин-изоляторы выполняет роль «фильтра», пропуская пульсации с частотой близкой к собственной частоте ошиновки Ω . Здесь имеет место явление, похожее на резонанс вынужденных колебаний при детерминированном периодическом воздействии. Составляющая нагрузки в этой зоне несет существенную часть мощности всего процесса. По мере роста рассеяния энергии значения S_R в этой области снижаются и мощность процесса определяется главным образом низкочастотными пульсациями нагрузки.

Ожидаемые максимальные прогибы шины, m , напряжения в ее материале (в сечении с координатой z), Pa , и нагрузки на изоляторы, N , с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки определяются по формулам:

$$y_{\max} = \eta \eta_B; \quad (16.38)$$

$$\sigma_{\max}(z) = \bar{\sigma}(z) \eta_B; \quad (16.39)$$

$$F_{\max} = \bar{F} \eta_B, \quad (16.40)$$

где $\bar{\sigma}$ и \bar{F} – напряжение в материале шины и нагрузка на изоляторы, обусловленные средней ветровой нагрузкой; η_B – динамический коэффициент при ветровых нагрузках.

Прогибы и напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы, обусловленные средней (статической) ветровой нагрузкой, вычисляются по формулам

$$\bar{y} = \frac{\bar{q}l^2}{c_{ш}}, \quad (16.41)$$

где $c_{ш}$ – жесткость шины, Н/м, указанная в табл.16.12.

$$\sigma(z) = \frac{ql^2}{\lambda_c(z)W}; \quad (16.42)$$

$$F = \beta ql, \quad (16.43)$$

Динамический коэффициент при ветровых нагрузках определяется по формуле

$$\eta_b = 1 + \xi_b \bar{V}^{1/3}, \quad (16.44)$$

где ξ_b – параметр динамичности, $(\text{м/с})^{-1/3}$, определяемый дисперсией случайной функции (прогиба, нагрузки или напряжения), а также требованиями надежности шинной конструкции.

На рисунке 16.9 приведены зависимости параметра ξ_b от частоты собственных колебаний (в горизонтальной плоскости) шинной конструкции f_{1x} и декремента затухания δ_x . При частоте $f_{1x} > 5$ Гц параметр динамичности ξ_b остается практически постоянным и примерно равным $0,3 (\text{м/с})^{-1/3}$.

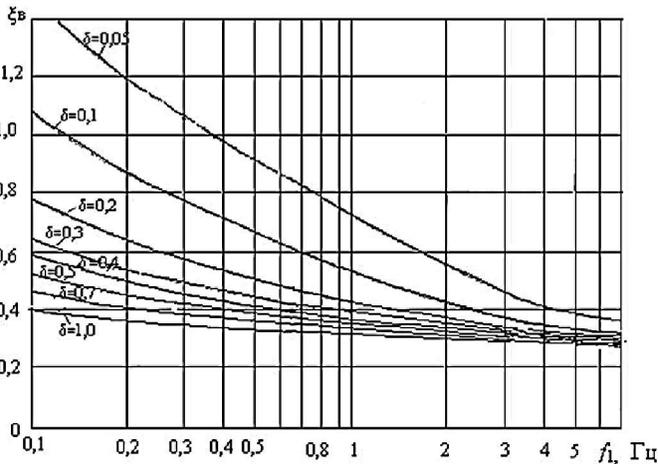


Рис. 16.9. Зависимость параметра динамичности при ветровых нагрузках от первой частоты собственной колебаний шинной конструкции при различных логарифмических декрементах затухания

Выше рассматривалась методика расчета ветровой стойкости жесткой ошиновки без учета воздействия ветра на шинные опоры. В РУ напряжением 150–220 кВ и выше ветровые нагрузки, действующие на изоляторы, могут оказать существенное влияние на их ветровую стойкость. В этом случае необходимо определять результирующие силы, действующие на изоляторы, которые приближенно можно вычислить по формуле

$$F_{\max} \approx (\bar{F} + \Delta \bar{F}) \eta_{\text{в}}, \quad (16.45)$$

где F – сила, определяемая по формуле (16.43); $\Delta \bar{F}$ – поправка, обусловленная воздействием ветрового потока на изоляционную опору. Последнюю можно определить по формуле

$$\Delta \bar{F} \approx \bar{q}_{\text{в.из}} H/2, \quad (16.46)$$

где H – высота изоляционной опоры, м; $\bar{q}_{\text{в.из}}$ – средняя (статическая) ветровая нагрузка на опору, Н/м, определяемая по приближенной формуле

$$\bar{q}_{\text{в.из}} \approx \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} c_{\text{х.из}} d_{\text{из}} \bar{V}_h^2; \quad (16.47)$$

здесь $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $d_{\text{из}}$ – среднее арифметическое значение наибольшего и наименьшего диаметра фарфорового тела изоляторов (опоры), м; $c_{\text{х.из}}$ – коэффициент лобового сопротивления изолятора, определяемый по кривым на рис. 16.7 в зависимости от числа Рейнольдса.

Наибольший прогиб шинной конструкции при ветре находят по формуле

$$y_{\max} = \frac{\bar{q}_{\text{в}} l}{c_{\text{ш}}} \eta_{\text{в}} + \frac{F_{\max}}{c_{\text{оп}}}, \quad (16.48)$$

где $c_{\text{оп}}$ – жесткость опоры, Н/м; F_{\max} – результирующая сила, действующая на опору (изолятор) при ветре, Н, определяемая по формуле (16.45).

Если опоры считаются абсолютно жесткими, второе слагаемое в уравнении (16.48) следует принять равным нулю.

Логарифмический декремент затухания определяют экспериментально. Он зависит от рассеяния энергии в материале шин (и, следовательно, от ее геометрических размеров), в узлах крепления шины (и таким образом от конструкции шинодержателей), в изоляторах и их крепежных деталях, а также в демпфирующих устройствах (специально устанавливаемых в длиннопролетных шинных конструкциях).

Логарифмические декременты затухания шинных конструкций

| Тип оши- новки, $U_{ном}$, кВ | Вид опоры | Шиннодержатель | Демпфирующее устройство | Параметры | | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------------|--|-----------|----------|---------|------------|------------|
| | | | | D , мм | b , мм | l , м | δ_x | δ_y |
| КРУБ-110 | Вертикальная надставка + изолятор типа ИОС-110-2000 | Скоба из круглого прутка | Стальной пруток 4 – 6 мм | 100 | 4,5 | 9 | 0,4–0,6 | 0,012–0,04 |
| 110 | ИОС 110/1250М | Сварной, объемного типа | Без демпфера | 100 | 90 | 9 | 0,19–0,32 | 0,03–0,04 |
| 110 | ИОС 110/1250М | Сварной, объемного типа | Провод марки А185 длиной 8,7 м | 100 | 90 | 9 | 0,32–0,36 | 0,06–0,09 |
| 110 | ОСК 10-110-Б02-2 | Литой, объемного типа | Стержень диаметром 8 мм и длиной 4 м | 80 | 60 | 9 | 0,04–0,08 | 0,04–0,05 |
| 220 | С 8 | Литой, объемного типа | Провод марки АС 500/26 длиной 7,8 м | 160 | 150 | 15,4 | 0,27–0,33 | 0,014–0,02 |
| 220 | С 8 | Литой, объемного типа | Провод марки АС 500/26 длиной 4 м | 160 | 150 | 8 | 0,31–0,57 | 0,19–0,24 |
| 500 | С 12 | Литой, объемного типа | Без демпфера | 220 | 212 | 19 | 0,15–0,20 | 0,11–0,14 |
| 500 | С 12 | Литой, объемного типа | Провод марки АС 630/43,6 длиной 12,5 м | 220 | 212 | 19 | 0,22–0,27 | 0,13–0,16 |
| 500 | С 12 | Литой, объемного типа | Демпфер «Бабочка» НТЦ «ЭДС», расположенный сверху шины | 220 | 212 | 19 | 0,29–0,40 | 0,25–0,30 |

Примечание. НТЦ «ЭДС» – Научно-технический центр «Электротехнический, Диагностика и Сервис».

Определение логарифмического декремента затухания может, например, проводиться по осциллограммам свободных колебаний шинной конструкции с использованием формулы

$$\delta = \frac{1}{k - m} \ln \frac{A_m}{A_k} \quad (k > m), \quad (16.49)$$

где k и m – номера амплитуд свободных колебаний; A_k и A_m – амплитуды свободных колебаний.

Значения логарифмических декрементов затухания δ для шинных конструкций некоторых типов приведены в табл. 16.18.

16.9. Проверка шин по условиям ветрового резонанса

Жесткие круглые трубчатые шины ОРУ напряжением 110 кВ и выше подвержены поперечным колебаниям от воздействия ветра, даже при относительно небольших (порядка нескольких метров в секунду) его скоростях. Колебания обусловлены вихревым следом и получили название ветрового резонанса. При числах Рейнольдса $Re > 5$ шина кольцевого сечения представляет собой плохо обтекаемое тело. За шиной образуются два вихря. При увеличении числа Re вихри вытягиваются по течению, а затем (при $Re \geq 40$) периодически отрываются от шины, причем направление сбегających вихрей попеременно меняется. Возникает вихревая дорожка Кармана (рис. 16.10).

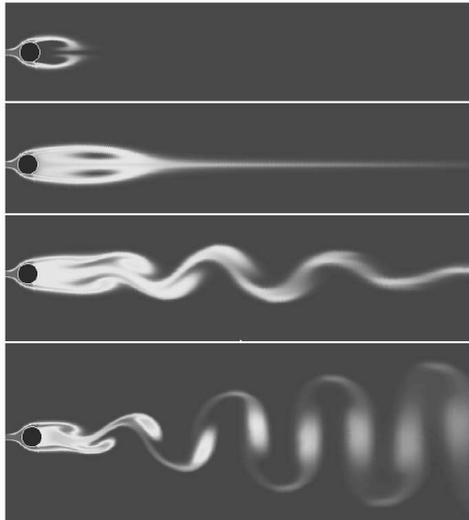


Рис. 16.10. Возникновение вихревой дорожки Кармана за шиной круглого сечения при постепенном увеличении скорости потока

Частота срыва вихрей f_v характеризуется числом Струхала Sh (приведенной частотой). Эти величины связаны соотношением:

$$Sh = f_v D / V, \quad (16.50)$$

где V – скорость ветра, м/с.

В интервале чисел Рейнольдса от $Re = 10^3$ до $Re_{кр} = 2 \cdot 10^5$, характерном для устойчивых резонансных колебаний ошиновки, число Струхала практически постоянное и для неподвижного цилиндра $Sh \approx 0,2$. При критическом числе Рейнольдса $Re_{кр} = 2 \cdot 10^5$ наблюдается переход устойчивого ламинарного потока в турбулентный и вихревого резонанса не возникает.

В результате срыва вихрей на шину действуют периодические силы $q_{пу}$ поперек воздушного потока, а также продольные силы $q_{пр}$. Продольные силы весьма малы и не оказывают заметного влияния на шинную конструкцию.

Если частота срыва вихрей совпадает с частотой собственных колебаний шины, может наступить ветровой резонанс (вихревое возбуждение). Скорость ветра, при которой частота срыва вихрей равна частоте собственных колебаний шины, называется Струхалевской скоростью, м/с, которая связана с числом Струхала соотношением:

$$V_s = D f_{1y} / Sh, \quad (16.51)$$

где D – внешний диаметр шины, м; f_{1y} – первая (основная) частота собственных колебаний шины в вертикальной плоскости, Гц.

В качестве примера в табл. 16.19 приводятся значения Струхалевской скорости для различных типов шинных конструкций.

Таблица 16.19

Параметры шинных конструкций и Струхалевская скорость ветра

| Номинальное напряжение, кВ | Условия опирания шин на опорах | Параметры шинной конструкции и V_s | | | | | |
|----------------------------|---|--------------------------------------|----------|---------|------------|------------|-------------|
| | | D , мм | b , мм | l , м | m , кг/м | f_1 , Гц | V_s , м/с |
| 220 | Шарнирное | 100 | 4,5 | 12,5 | 3,74 | 1,71 | 0,85 |
| 500 | Шарнирное | 250 | 8,0 | 20,0 | 16,85 | 1,69 | 2,11 |
| 500 | Шарнирное на одной, заземление на др. опоре | 250 | 8,0 | 20,0 | 16,85 | 2,64 | 3,30 |
| 500 | Жесткое | 250 | 8,0 | 20,0 | 16,85 | 3,83 | 4,79 |

Примечание: b – толщина стенки шины.

Частота собственных колебаний шин в вертикальной плоскости вычисляется по формуле (13.32). При этом опоры шин принимают абсолютно жесткими, а параметр первой частоты собственных колебаний r_1 определяют согласно указаниям (табл. 13.4).

При ветровом резонансе происходят достаточно устойчивые длительные колебания шин поперек воздушного потока, поскольку происходит синхронизация отрыва вихрей с частотой колебания шины. При этом в диапазоне изменения скорости ветра примерно от $0,7$ до $1,3V_S$ продолжаются устойчивые вихревые колебания. Ветровые вибрации оказывают отрицательное психологическое воздействие на персонал ОРУ, приводят к ослаблению болтовых соединений (а, следовательно, повышают вероятность повреждения ошиновки), а в ряде случаев вызывают усталостные повреждения в элементах конструкции. Поэтому ветровые резонансы должны быть конструктивно устранены.

Устойчивые (стабилизированные) ветровые резонансные колебания шин не наступают, если наибольший прогиб шин при периодическом срыве воздушных вихрей с резонансной частотой $y_{p \max}$ не достигает допустимых значений $y_{p, \text{доп}}$, т.е.

$$y_{p \max} \leq y_{p, \text{доп}} \quad (16.52a)$$

Успешная отстройка от резонансных колебаний в критериальной форме отвечает неравенству

$$y_{* p \max} \leq y_{* p, \text{доп}} \quad (16.52б)$$

где $y_{* p \max} = y_{p \max} / D$ – относительный максимальный расчетный прогиб шины при резонансных ветровых колебаниях, м; D – внешний диаметр шины, м; $y_{* p, \text{доп}} = y_{p, \text{доп}} / D$ – относительный допустимый прогиб шины при вихревых возбуждениях, равный $0,02$ для шин диаметром 250 мм и больше и $0,04$ – для шин диаметром $90 - 150$ мм.

Приближенно наибольший расчетный прогиб шины при ветровых резонансах определяется по формуле

$$y_{p \max} \approx 1,08 \frac{\rho_v D^3}{m \delta_y} \quad (16.53)$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м^3 ; D – внешний диаметр шины, м; δ_y – логарифмический декремент затухания при колебании шины в вертикальной плоскости, значения которого приведены, например, в табл. 16.18.

Анализ выражения (16.53) показывает, что для снижения амплитуды колебаний при вихревых возбуждениях и успешного подавления (отстройки) от устойчивых ветровых резонансных колебаний необходимо увеличение рассеяния энергии (декремента затухания),

а также массы шины при снижении ее внешнего диаметра. Поэтому для снижения ветровых вибраций ошиновки увеличивают массу шины путем увеличения толщины ее стенки или установки дополнительных грузов. Однако наиболее эффективной мерой является применение шинодержателей с повышенным уровнем рассеяния энергии, а также установка специальных демпфирующих устройств. В простейшем случае в качестве демпферов используют провода или тросы, проложенные внутри трубчатых шин и закрепленные с одной или двух сторон, а также стержни, свободно лежащие внутри шины. В случае, если простейшие демпферы не устраняют колебания, применяют специальные гасители вибраций.

16.10. Проверка стойкости (прочности) изоляторов и шин при сочетании внешних нагрузок

Изоляторы и шины испытывают воздействие гололедных, ветровых и электродинамических нагрузок (ЭДН), а также силы тяжести шины и ответвлений.

Расчеты изоляторов и шин ОРУ на прочность должны проводиться при следующих сочетаниях внешних нагрузок:

- вес ошиновки, нормативная гололедная нагрузка и ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра;
- вес ошиновки, ветровая нагрузка при нормативной скорости ветра и ЭДН, без учета АПВ, равная 65% максимального расчетного значения (т.е. при токе короткого замыкания равном 80% от максимума);
- вес ошиновки, максимальная электродинамическая нагрузка (без учета АПВ) и ветровая нагрузка, равная 60% нормативного значения;
- вес ошиновки и электродинамическая нагрузка при максимальном расчетном токе короткого замыкания, в том числе при неуспешных АПВ (при повторных включениях на короткое замыкание).

Кроме того, шины должны проверяться по условиям возникновения ветрового резонанса. Ошиновка ЗРУ проверяется только при учете веса ошиновки и электродинамической нагрузке при максимальном расчетном токе короткого замыкания, в том числе при неуспешных АПВ.

Внешние силы (нагрузки) действуют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 16.11): вертикальной yOz (вдоль оси y) и горизонтальной xOz (вдоль оси x). В вертикальной плоскости приложены вес шины, ответвлений, гололеда, а также составляющая

электродинамической нагрузки, действующая в конструкциях сложной пространственной конфигурации (например, на ответвлениях от сборных шин). В горизонтальной плоскости действуют ветровая и электродинамическая нагрузки.

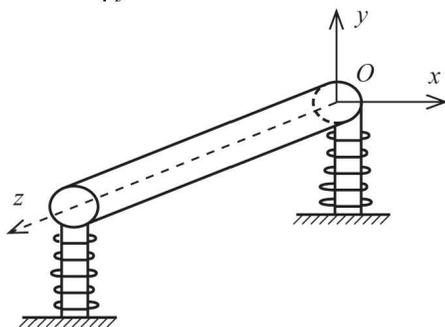


Рис. 16.11. К расчету ошиновки при сложных видах нагружения

Внешние силы вызывают механические напряжения в материале шины и нагрузки на изоляторы. Максимальные результирующие значения напряжения в материале круглых трубчатых шин и нагрузки на опорные изоляторы следует определять по формулам

$$\sigma_{\max} = \max \sqrt{\sigma_x^2(z, t) + \sigma_y^2(z, t)}, \quad (16.54)$$

$$F_{\max} = \max \sqrt{F_x^2(t) + F_y^2(t)}, \quad (16.55)$$

где σ_x и σ_y – напряжения в шине, являющиеся функциями координаты шины z и времени t , обусловленные действиями сил в горизонтальной и вертикальной плоскостях; F_x и F_y – нагрузки на изоляторы по оси x и y , которые являются функциями времени t .

Если шины расположены в одной плоскости, например горизонтальной, то электродинамические нагрузки действуют только в этой плоскости. В этом случае без существенной погрешности максимальные результирующие напряжения в шине и нагрузки на изоляторы можно определить как

$$\sigma_{\max} = \max \sqrt{\sigma_x^2(z) + \sigma_y^2(z)}, \quad (16.56)$$

$$F_{\max} = \sqrt{F_{x \max}^2 + F_{y \max}^2}, \quad (16.57)$$

где $\sigma_x(z)$ – максимальные (по времени) напряжения в шине от горизонтальных сил в сечении с координатой z ; $\sigma_y(z)$ – напряжения от нагрузок и сосредоточенных сил, направленных по оси y ; $F_{x \max}$ и $F_{y \max}$ – максимальные (по модулю) нагрузки на изоляторы по осям x и y .

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 КВ

17.1. Основные факторы, влияющие на процесс короткого замыкания

В электроустановках напряжением до 1 кВ активные сопротивления токопроводящих цепей превышают индуктивные сопротивления, причем влияние активных сопротивлений тем больше, чем меньше номинальное напряжение электроустановки. Это объясняется тем, что в низковольтных электроустановках более широко используются проводники относительно небольших сечений, а расстояние между проводниками разных фаз значительно меньше, чем в высоковольтных электроустановках.

Расчет коротких замыканий в цепях с преобладающей активной составляющей сопротивления оказывается более сложным, так как активное сопротивление элементов электроустановок, в отличие от индуктивного сопротивления, более чувствительно к изменению внешних факторов и режимных параметров электроустановки. Оно изменяется при изменении температуры окружающей среды и при нагреве проводников протекающим по ним током; при возникновении электрической дуги; при окислении поверхности соединительных контактов проводников, вызванном агрессивным характером среды. Индуктивное сопротивление цепи более консервативно. Оно изменяется лишь при изменении размеров и взаиморасположения проводников и при изменении магнитной проницаемости окружающей среды, что позволяет в большинстве случаев считать его неизменным. Учет нелинейного характера индуктивности может потребоваться лишь при расчете однофазных коротких замыканий в цепях с трехжильными кабелями, проложенными в непосредственной близости со стальными конструкциями.

Влияние температуры ϑ на активное сопротивление проводников обычно учитывается с помощью температурного коэффициента сопротивления:

$$\alpha_{\vartheta} = \frac{1}{\vartheta_{\text{усл}} + \vartheta},$$

где $\vartheta_{\text{усл}}$ – условная температура, равная $234,5^{\circ}\text{C}$ для меди и 236°C для алюминия.

В упрощенных расчетах температурный коэффициент сопротивления принимается независящим от температуры проводника и равным для меди и алюминия $0,004\text{ 1}/^{\circ}\text{C}$. Соответственно при изменениях температуры проводников от $+20^{\circ}\text{C}$ до -40°C и от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+80^{\circ}\text{C}$, обусловленных сезонными колебаниями температуры окружающей среды и нагревом проводников токами продолжительных эксплуатационных режимов, их сопротивление изменяется в $(1 + 0,004 \cdot 60) = 1,24$ раза. Очевидно, пренебрегать столь существенным фактором нежелательно, так как методическая погрешность расчетов не должна превышать 10%.

При коротких замыканиях проводники могут нагреваться еще больше. Так, ориентируясь на предел невозгораемости поливинилхлоридной изоляции, равный 350°C , можно ожидать увеличения сопротивления жил кабелей в $(1 + 0,004 \cdot 330) = 2,32$ раза. Уменьшение тока, обусловленное нагревом и соответствующим увеличением сопротивления проводников цепи, называется *тепловым спадом тока*. На рисунках 17.1 и 17.2 показаны характерные изменения температуры жил кабеля и тока при коротком замыкании.

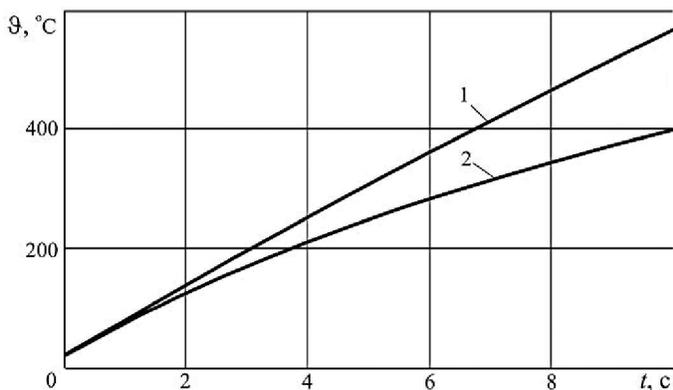


Рис. 17.1. Изменение температуры жил кабеля во время короткого замыкания:

1 – при неизменном токе; 2 – при спаде тока, обусловленном возрастанием температуры жил

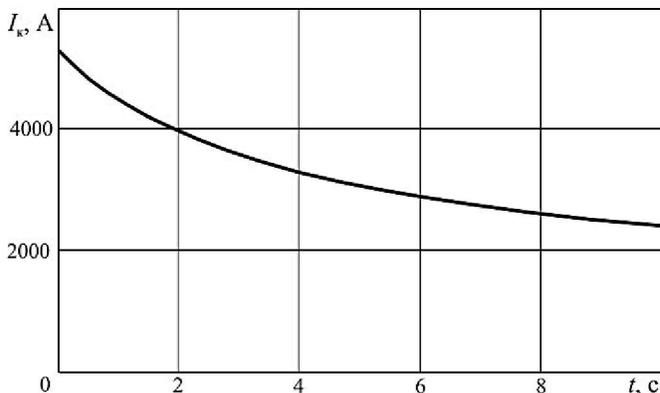


Рис.17.2. Изменение действующего значения тока короткого замыкания, обусловленного нагревом жил кабеля (тепловой спад тока короткого замыкания)

На процесс короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ большое влияние оказывает электрическая дуга, которая вносит в короткозамкнутую цепь нелинейное активное сопротивление. Напряжение на дуге на начальной стадии ее возникновения составляет десятки вольт. Поэтому токоограничивающее действие дуги проявляется тем значительнее, чем меньше разница между напряжением источника питания и напряжением на дуге. При дуговых коротких замыканиях в электроустановках напряжением 380 В переменного тока и 220 В постоянного тока ток короткого замыкания примерно в 2 раза меньше, чем при металлических коротких замыканиях. В процессе короткого замыкания дуга под действием электромагнитных сил вытягивается и может перемещаться, удаляясь от источника тока. Сопротивление дуги при этом обычно увеличивается и она может самопроизвольно погаснуть. При токах короткого замыкания в сотни и тысячи ампер электрическая дуга горит более устойчиво, тепло дуги разрушает изоляцию и расплавляет соприкасающиеся с дуговым столбом металлические элементы конструкций. Электродинамические силы, обусловленные током короткого замыкания, стремятся раздвинуть проводники с током и «выбросить» наружу их расплавленные частицы. Если ток короткого замыкания быстро не прервать, то короткое замыкание может возникнуть в соседних цепях. Например, с большой вероятностью однофазное короткое замыкание в кабеле через 0,5 с может перейти в двухфазное или трехфазное короткое замыкание. Короткое замыкание, возникшее в одном из кабелей, может стать причиной пожара в кабельном коробе или лотке.

Еще одной особенностью расчетов коротких замыканий в электроустановках до 1 кВ является необходимость учета особого влияния асинхронных двигателей, которое обусловлено быстрым затуханием аperiodической составляющей их тока ротора. Эта составляющая возникает в начальный момент короткого замыкания и первые, примерно 20 мс, обуславливает увеличение периодической составляющей тока статора двигателя и соответствующую «подпитку» электрически близких к нему коротких замыканий. Далее аperiodическая составляющая тока ротора быстро уменьшается, вместе с ней стремится к нулю и периодическая ЭДС двигателя, в результате чего обмотка статора двигателя шунтирует цепь короткого замыкания и ток в последней уменьшается. На рисунке 17.3 показано изменение тока короткого замыкания при расчетных условиях, соответствующих наибольшему проявлению шунтирующего действия асинхронного двигателя. За единицу принят ток короткого замыкания, рассчитанный для схемы без асинхронного двигателя. В начальный момент асинхронный двигатель увеличивает ток короткого замыкания, затем ток от асинхронного двигателя резко уменьшается и через некоторое время изменяется его направление, ветвь с асинхронным двигателем начинает шунтировать ветвь короткого замыкания.

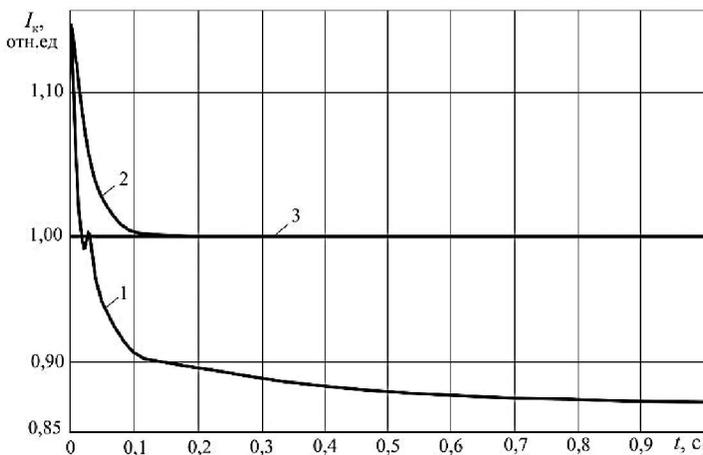


Рис. 17.3. Переходный процесс при коротком замыкании:
 1 – суммарный ток короткого замыкания с учетом подпитки и шунтирования асинхронным двигателем цепи короткого замыкания; 2 – суммарный ток короткого замыкания с учетом только подпитки от асинхронного двигателя; 3 – ток короткого замыкания без учета влияния асинхронного двигателя

В отличие от высоковольтных электроустановок расчет коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1 кВ следует проводить с учетом переходного сопротивления разъемных и разборных контактов. Новые не окисленные контакты в силовых цепях имеют сопротивление менее одного миллиома, а во многих случаях не превышают единиц микроом. Столь малыми сопротивлениями при расчете коротких замыканий можно было бы пренебречь. Однако опыт свидетельствует, что со временем переходное сопротивление контактов может достигнуть сотен миллиом, а в слаботочных цепях может даже возникнуть электрический разрыв. Это происходит вследствие окисления и электроэрозии контактных поверхностей. При приложении к окисной пленке напряжения, превышающего 100–200 В, последняя пробивается. При токе 20 мА и более пленка, как правило, разрушается и электрический контакт восстанавливается. Результаты экспериментального измерения токов короткого замыкания в цепях с изношенными и окисленными контактами часто оказываются нестабильными и заниженными по сравнению с расчетными значениями. Для поддержания электроустановок в надлежащем состоянии правилами эксплуатации предусматривается регулярная зачистка и протяжка контактов.

Отключающие защитные аппараты, используемые в электроустановках напряжением до 1 кВ, кроме разъемных и разборных контактов имеют еще и встроенные элементы, сопротивление которых необходимо дополнительно учитывать при расчете коротких замыканий. В предохранителях такими элементами являются плавкие вставки, а в автоматических выключателях – катушки электромагнитных расцепителей, нагревательные элементы тепловых расцепителей, встроенные шунты и трансформаторы тока полупроводниковых и микропроцессорных расцепителей. Чем меньше номинальный ток отключающего защитного аппарата, тем больше его суммарное внутреннее сопротивление. У автоматических выключателей с номинальным током менее 1 А полное сопротивление одного полюса может превышать 10 Ом.

Наличие в трехфазной цепи элементов с нелинейным характером сопротивлений отражается на точности расчетов несимметричных коротких замыканий с использованием метода симметричных составляющих, так как в этом случае возникает или увеличивается разница активных сопротивлений различных фаз короткозамкнутой цепи. Однако в большинстве случаев дополнительная погрешность, обусловленная использованием метода симметричных составляющих, оказывается приемлемой для инженерных расчетов, поэтому этот метод применяется и для трехфазных электроустановок напряжением до 1 кВ. В редких случаях, когда требуется учесть гармонические составляющие в токах и напряжениях, используют более сложные математические модели, построенные в фазных координатах.

Для расчета однофазных коротких замыканий в системах электроснабжения зданий иногда применяются упрощенные методы, ба-

зирующиеся на использовании сопротивлений петли «фаза–ноль». Значения этого сопротивления можно найти в справочниках или измерить с помощью специальных приборов.

Ток однофазного короткого замыкания можно определить как через сопротивление петли «фаза–ноль» $\underline{Z}_{\phi-0}$, так и через сопротивления прямой \underline{Z}_1 , обратной \underline{Z}_2 и нулевой \underline{Z}_0 последовательностей:

$$\dot{I}_k^{(1)} = \frac{\dot{U}_\phi}{\underline{Z}_{\phi-0}} = 3 \frac{\dot{U}_\phi}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}, \quad (17.1)$$

откуда

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 = 3 \underline{Z}_{\phi-0}. \quad (17.2)$$

Для определения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей опытным путем необходимо знать не только сопротивление петли «фаза–ноль», но и сопротивление петли «фаза–фаза» и ток двухфазного короткого замыкания $\dot{I}_k^{(2)}$, так как в этом случае

$$\dot{I}_k^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_\phi}{\underline{Z}_{\phi-\phi}} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3} \dot{U}_\phi}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad (17.3)$$

откуда

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = \sqrt{3} \underline{Z}_{\phi-\phi}. \quad (17.4)$$

С приемлемой для практики точностью можно принять $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ и тогда на основании формул (17.2) и (17.4) сопротивление нулевой последовательности составляет

$$\underline{Z}_0 = 3 \underline{Z}_{\phi-0} - \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2 = 3 \underline{Z}_{\phi-0} - \sqrt{3} \underline{Z}_{\phi-\phi}. \quad (17.5)$$

Следует помнить, что полученные таким образом сопротивления цепи отражают состояние последней на момент, предшествующий короткому замыканию, и могут значительно измениться при коротком замыкании, причем как правило – в сторону увеличения.

При расчете токов короткого замыкания в однофазных осветительных сетях индуктивной составляющей сопротивления петли «фа-

за–ноль» можно пренебречь. При этом полное сопротивление петли принимают равным сумме активных составляющих сопротивлений фазного и рабочего проводников, вычисленных с поправкой на их температуру. В прочих случаях расчет токов короткого замыкания следует проводить с учетом индуктивного сопротивления короткозамкнутой цепи. Причем последнее недопустимо представлять как сумму индуктивных сопротивлений фазного и нулевого проводников, так как необходимо учитывать еще и взаимную индуктивность между проводниками, которая при однофазных коротких замыканиях увеличивает индуктивное сопротивление цепи, а при трехфазных коротких замыканиях уменьшает его. В любом случае расчет минимальных значений тока короткого замыкания должен производиться с учетом сопротивления электрической дуги и других факторов, снижающих ток короткого замыкания.

Расчет коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1 кВ обычно выполняется с использованием системы именованных единиц. Использование системы относительных единиц затрудняет учет нелинейности сопротивлений элементов расчетной схемы. Наиболее часто используются следующие сочетания размерностей величин: мощность в киловольтамперах, напряжение в киловольтах, ток в амперах и сопротивления в миллиомах или мощность в мегавольтамперах, напряжение в киловольтах, ток в килоамперах и сопротивления в омах. Напряжения, токи и сопротивления задаются комплексными величинами.

17.2. Параметры элементов электроустановок переменного тока

Сетевой источник питания. Основным источником питания электроустановок напряжением до 1 кВ является высоковольтная сеть. При расчете коротких замыканий высоковольтная сеть замещается эквивалентным источником с ЭДС $E_{ф.эк}$ и эквивалентными сопротивлениями $Z_{эк}$ различных последовательностей, как правило активно-индуктивного характера. Значение ЭДС эквивалентного источника определяется с учетом напряжения в режиме, предшествующем короткому замыканию, и выраженного в относительных единицах (оно обозначается $U_{*(0)}$):

$$E_{ф.эк} = \frac{U_{*(0)} U_{ср.В}}{\sqrt{3}},$$

где $U_{ср.В}$ – среднее номинальное напряжение сети.

Эквивалентное полное сопротивление прямой последовательности источника определяется на основе расчетного значения тока трехфазного короткого замыкания $I_{\kappa}^{(3)}$:

$$Z_1 = \frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3}I_{\kappa}^{(3)}}. \quad (17.6)$$

Для определения активной R_1 и индуктивной X_1 составляющих полного сопротивления прямой последовательности источника можно использовать усредненное значение отношения $X_1/R_1 = 20$. Для сети переменного тока частотой 50 Гц это отношение можно вычислить и по известному значению ударного коэффициента $K_{\text{уд}}$:

$$\frac{X_1}{R_1} = -\frac{0,01\omega_{\text{синх}}}{\ln(K_{\text{уд}} - 1)} = -\frac{\pi}{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}. \quad (17.7)$$

Как правило, уточнять значение отношения X_1/R_1 нет необходимости, так как в связи с малостью значения полного сопротивления сетевого источника по сравнению с полным сопротивлением других элементов цепи разброс возможных значений указанного отношения не оказывает существенного влияния на результаты расчета коротких замыканий на стороне 0,4 кВ.

При найденных значениях Z_1 и X_1/R_1 с учетом (17.7) индуктивное сопротивление прямой последовательности сетевого источника питания составляет

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{X_1/R_1}\right)^2}} = \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}} = \\ &= \frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3}I_{\kappa}^{(3)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}}, \end{aligned} \quad (17.8)$$

а его активное сопротивление

$$R_1 = \sqrt{Z_1^2 - X_1^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3}I_{\kappa}^{(3)}}\right)^2 - X_1^2}. \quad (17.9)$$

Составляющие сопротивления обратной последовательности сетевого источника определяются аналогичным образом – по известному значению тока двухфазного короткого замыкания в узле питающей сети:

$$X_2 = \frac{U_{\text{ср В}}}{I_{\text{к}}^{(2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi} \right]^2}} - X_1; \quad (17.10)$$

$$R_2 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ср В}}}{I_{\text{к}}^{(2)}} \right)^2 - (X_1 + X_2)^2} - R_1. \quad (17.11)$$

Если высоковольтные синхронные машины электрически удалены от питающего узла, то эквивалентное сопротивление обратной последовательности питающей сети можно считать равным сопротивлению прямой последовательности, т.е. $Z_2 = Z_1$.

Для электроустановок напряжением до 1 кВ, получающих питание от сетей напряжением 3 – 35 кВ с изолированной нейтралью, нет необходимости определять эквивалентное сопротивление нулевой последовательности. Для сети напряжением 110 кВ и более составляющие сопротивления нулевой последовательности до питающего узла определяются по известному значению тока однофазного короткого замыкания

$$X_0 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср В}}}{I_{\text{к}}^{(1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi} \right]^2}} - X_1 - X_2; \quad (17.12)$$

$$R_0 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}U_{\text{ср В}}}{I_{\text{к}}^{(1)}} \right)^2 - (X_1 + X_2 + X_0)^2} - R - R_2. \quad (17.13)$$

При расчете составляющих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей сетевого источника питания по значениям токов короткого замыкания предполагается, что для указанных последовательностей отношение индуктивных и активных сопротивлений одинаковое.

Эквивалентные сопротивления питающей сети необходимо привести к ступени напряжения, для которой выполняется расчет короткого замыкания. Для этого можно использовать коэффициент трансформации, определенный через отношение средних номинальных напряжений распределительной сети электроустановки $U_{\text{ср Н}}$ и питающей сети $U_{\text{ср В}}$:

$$\overset{\circ}{Z} = Z \frac{U_{\text{ср Н}}^2}{U_{\text{ср В}}^2}.$$

Если требуется учесть использование отводов от обмотки высшего напряжения трансформатора, переключаемых без возбуж-

дения (ПБВ) или регулируемых под нагрузкой (РПН), то вместо средних номинальных напряжений необходимо использовать фактический коэффициент трансформации питающего трансформатора.

Синхронные генераторы. В электроустановках до 1 кВ в качестве резервных источников питания иногда используются синхронные генераторы. Расчет параметров последних практически не отличается от расчета параметров высоковольтных синхронных машин по известным паспортным или каталожным данным, к которым относятся:

- номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, МВт;
- номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, кВ;
- сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной

оси $X_{*d(\text{ном})}''$;

- индуктивное сопротивление обратной последовательности

$X_{*2(\text{ном})}$;

- постоянная времени затухания апериодической составляющей тока якоря при трехфазном коротком замыкании на выводах машины $T_a^{(3)}$, с.

Для генераторов, работающих в сетях с заземленной нейтралью, в исходных данных дополнительно должны быть указаны сопротивления нулевой последовательности $X_{*0(\text{ном})}$ и $R_{*0(\text{ном})}$. Значения этих сопротивлений имеют большой разброс и определяются по результатам натурных испытаний. Индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей генераторов в именованных единицах вычисляются по формулам:

$$X_1 = X_{*d(\text{ном})}'' \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{ном}} / \cos\varphi_{\text{ном}}}; \quad (17.14)$$

$$X_2 = X_{*2(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{ном}} / \cos\varphi_{\text{ном}}}, \quad (17.15)$$

а их активные сопротивления прямой и обратной последовательностей по формуле

$$R_1 = R_2 = \frac{X_2}{\omega_{\text{синх}} T_a^{(3)}}. \quad (17.16)$$

Модуль фазной ЭДС генератора к моменту короткого замыкания вычисляется с учетом параметров предшествующего режима:

$$E_{\Phi} = \frac{U_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(U_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}} \cos \varphi_{(0)} \right)^2 + \left(U_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}} \sin \varphi_{(0)} + X_{* d(\text{НОМ})}'' I_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}} \right)^2}, \quad (17.17)$$

где $U_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}}$ – напряжение генератора в предшествующем режиме в долях от номинального напряжения;

$I_{* (0)\chi_{\text{НОМ}}}$ – ток генератора в предшествующем режиме в долях от номинального тока;

$\cos \varphi_{(0)}$ – коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Для большинства синхронных генераторов напряжением до 1 кВ сверхпереходное сопротивление $X_{* d(\text{НОМ})}'' = 0,054 \div 0,18$. В приближенных расчетах можно принять $X_{* 2(\text{НОМ})} = X_{* d(\text{НОМ})}''$, а $R_{* 1(\text{НОМ})} = R_{* 2(\text{НОМ})} = 0,15 X_{* d(\text{НОМ})}''$.

Трансформаторы. В электроустановках напряжением до 1 кВ в основном используются трехфазные двухобмоточные трехстержневые трансформаторы. Расчет сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформаторов выполняется аналогично расчету соответствующих сопротивлений высоковольтных трансформаторов. В качестве исходных для расчетов используются следующие паспортные или каталожные данные:

- номинальная мощность $S_{\text{НОМ}}$, кВ·А;
- номинальные напряжения обмоток и фактический коэффициент трансформации;
- напряжение короткого замыкания между обмотками u_{κ} , %;
- потери короткого замыкания ΔP_{κ} , кВт.

Составляющие сопротивления трансформатора целесообразно вычислять приведенными к напряжению обмотки низшего напряжения:

$$R_1 = R_2 = \frac{\Delta P_{\kappa} U_{\text{НОМ H}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}; \quad (17.18)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{U_{\text{НОМ H}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\left(\frac{u_{\kappa}}{100} \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\kappa}}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2}. \quad (17.19)$$

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с обмоткой высшего напряжения, соеди-

ненной в треугольник, принимают равными сопротивлениям прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X_1; \\ R_0 &= R_1. \end{aligned} \right\} \quad (17.20)$$

Если магнитопровод трехфазного трансформатора имеет трех-стержневую конструкцию, а его обмотки соединены по схеме «звезда-звезда с нулем» (Y/Y_0), то параметры нулевой последовательности могут быть определены только экспериментальным путем или в результате сложного расчета, использующего детальную информацию о конструкции трансформатора. Значения сопротивлений таких трансформаторов, приводимые в справочниках, могут значительно отличаться от реальных параметров этих трансформаторов. Следует иметь в виду, что на индуктивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 могут повлиять металлоконструкции, расположенные в непосредственной близости к трансформаторам и изменяющие пути замыкания магнитных потоков.

Автоматические выключатели. Активное сопротивление автоматических выключателей складывается из сопротивлений катушек электромагнитного расцепителя $R_{\text{расц}}$, нагревательного элемента теплового расцепителя или встроенного трансформатора тока, главных контактов полюсов и присоединительных зажимов $R_{\text{к.с}}$. Значения этих сопротивлений по отдельности не нормируются и в паспортных или каталожных данных на автоматические выключатели не приводятся. В них указывается лишь значение нормируемых номинальных потерь мощности в трех полюсах выключателя $\Delta P_{\text{пот}}$, по которому можно только ориентировочно оценить суммарное активное сопротивление всех вышеперечисленных элементов выключателя:

$$R_1 = (R_{\text{расц}} + R_{\text{к.с}}) \leq \frac{\Delta P_{\text{пот}}}{I_{\text{ном}}^2}; \quad (17.21)$$

$$R_2 = R_0 = R_1; \quad (17.22)$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = X_{\text{расц}}. \quad (17.23)$$

Более точно значения сопротивлений автоматических выключателей можно определить на основе измерений. Значения сопротивлений автоматических выключателей не имеют привязки к конкретным типам выключателей. Сопротивления полюсов выключателей зависят в основном от их номинального тока. На основе имеющихся статистических оценок не представляется возможным определить сопротивления отдельно для каждого типа выключателей. У выключателей современных типов наблюдается тенденция уменьшения со-

противления по сравнению с аналогичными по номинальному току выключателями устаревших типов.

При параметризации расчетной схемы следует учитывать тип расцепителей, имеющих у выключателей. Если у выключателя нет ни одного расцепителя, то его следует учитывать как рубильник с сопротивлением $R_{к.с.}$.

Рубильники, магнитные пускатели и контакторы. Эти электрические аппараты в схемах замещения представляются только активными сопротивлениями своих разъемных контактов и присоединительных зажимов, так как индуктивное сопротивление таких аппаратов пренебрежимо мало (можно принять $X_1 = X_2 = X_0 = 0$), причем активные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей считаются одинаковыми, т.е. $R_1 = R_2 = R_0 = R_{к.с.}$.

Плавкие предохранители. Активное сопротивление плавких предохранителей складывается из сопротивлений плавких вставок $R_{вст.}$, переходных сопротивлений держателей плавких вставок и сопротивлений присоединительных зажимов. По аналогии с автоматическими выключателями активное сопротивление плавких предохранителей можно оценить по нормируемым номинальным потерям мощности $\Delta P_{пот}$:

$$R_1 = (R_{вст.} + R_{к.с.}) \leq \frac{\Delta P_{пот}}{I_{НОМ}^2}, \quad (17.24)$$

причем сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей считаются одинаковыми, т.е. $R_1 = R_2 = R_0$.

Индуктивными сопротивлениями предохранителей обычно пренебрегают, т.е. $X_1 = X_2 = X_0 = 0$.

В новых стандартах на плавкие предохранители отдельно указываются номинальные потери мощности в плавкой вставке и номинальная мощность, рассеиваемая держателем. Сопротивление присоединительных зажимов зависит от сечения внешних проводов или жил кабелей.

Измерительные трансформаторы тока. Измерительные трансформаторы тока с многовитковыми первичными обмотками в схеме замещения учитываются активными и индуктивными сопротивлениями, которые принимаются одинаковыми для всех симметричных составляющих тока. Эти сопротивления зависят от номинального коэффициента трансформации и от класса точности трансформатора. Шинные и другие одновитковые трансформаторы тока при расчете коротких замыканий можно не учитывать.

Кабельные линии. В кабельных линиях используются кабели различных видов: трех-, четырех- и пятижильные; с проводящей оболочкой или броней (алюминиевой, свинцовой или в виде стальной ленты) и с непроводящей пластмассовой оболочкой. Кабельная ли-

ния может иметь один или несколько параллельно соединенных кабелей («пучок» кабелей).

Сопротивление нулевой последовательности кабельных линий, выполненных трехжильными кабелями, зависит не только от параметров кабелей, но и от конструктивных особенностей их прокладки. В сетях с заземленной нейтралью ток нулевой последовательности, не имея возможности вернуться к трансформатору по четвертой жиле кабеля ввиду ее отсутствия, замыкается по строительной арматуре, контуру заземления, металлическим коммуникациям (трубам). Наибольшая часть тока замыкается по металлическим элементам, расположенным в непосредственной близости от фазных проводников кабеля. Даже при наличии путей для возврата тока, обладающих малым активным сопротивлением, но удаленных от фазных жил кабеля, доля тока, замыкающегося по ним, уменьшается из-за увеличения их индуктивного сопротивления по сравнению с близко расположенными металлоконструкциями. При наличии у кабеля проводящей оболочки основная часть тока нулевой последовательности замыкается по оболочке. Возможность магнитного насыщения брони кабеля, выполненной из стальной ленты, и расположенных вблизи стальных металлоконструкций делает индуктивное сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей нелинейным. В современных трехфазных электроустановках преимущественно используются четырех- и пятижильные кабели, индуктивное сопротивление нулевой последовательности которых можно считать линейным и практически не зависящим от внешних факторов.

Активное сопротивление кабельных линий должно определяться с учетом температуры жил в момент, предшествующий возникновению короткого замыкания, и с учетом увеличения температуры жил в процессе нагрева их током короткого замыкания. Строго говоря, подобный учет следовало бы производить и при определении сопротивлений других элементов электроустановок напряжением до 1 кВ. Однако в практических расчетах температурный фактор учитывается только при расчете сопротивления кабельных линий. Это оправдано тем, что именно у кабельных линий значение активного сопротивления существенно больше индуктивного, к тому же кабельные линии в основном и определяют суммарное сопротивление короткозамкнутой цепи. При коротких замыканиях вблизи сборных шин существенно увеличивается активное сопротивление трансформатора, шинных конструкций, расцепителей автоматических выключателей или плавких вставок предохранителей, но это увеличение на изменении тока короткого замыкания сказывается незначительно, так как указанные элементы имеют большие номинальные токи и у них преобладает индуктивная составляющая сопротивления.

Значения погонных активных составляющих сопротивлений кабелей в справочниках обычно приводят соответствующие значения, пересчитанными к продолжительно допустимой температуре материала изоляции жилы. Поэтому сопротивления кабелей с одинаковым сечением и материалом жил, но с разными видами изоляции жил, например, поливинилхлоридной (ПВХ) и бумажной, должны отличаться друг от друга на 0,4 – 2,4%.

При расчете тока в начальный момент короткого замыкания активное сопротивление жил кабелей следует привести к температуре жил в момент, предшествующий короткому замыканию

$$\vartheta_{\text{нач}} = \vartheta_{\text{окр}} + K_z^2 (\vartheta_{\text{доп.прод}} - \vartheta_{\text{окр.норм}}), \quad (17.25)$$

где $\vartheta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$K_z = I_{\text{расч}} / I_{\text{доп.прод}}$ – коэффициент загрузки кабеля (обычно $K_z = 0,6$);

$\vartheta_{\text{доп.прод}}$ – допустимая температура нагрева изоляции в продолжительном режиме, °С (для ПВХ она равна 70 °С, для бумажной изоляции – 80 °С);

$\vartheta_{\text{окр.норм}}$ – нормированная температура окружающей среды, °С (например, для кабельных каналов внутри зданий электростанций $\vartheta_{\text{окр.норм}} = 40$ °С);

$I_{\text{расч}}$ – расчетный ток режима, предшествующего короткому замыканию, А;

$I_{\text{доп.прод}}$ – допустимый ток продолжительного режима для кабеля с жилами данного сечения, А.

Коэффициент для приведения активного сопротивления кабелей к температуре $\vartheta_{\text{нач}}$, соответствующей начальному моменту короткого замыкания, вычисляется по аппроксимирующей формуле:

$$K_{\vartheta} = \frac{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_{\text{нач}}}{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_{\text{ном}}}, \quad (17.26)$$

где $\vartheta_{\text{ус}}$ – условная температура (для меди $\vartheta_{\text{ус}} = 234,5$ °С, для алюминия $\vartheta_{\text{ус}} = 236$ °С);

$\vartheta_{\text{ном}}$ – номинальная температура, для которой заданы исходные значения погонных сопротивлений кабелей, °С.

Эта формула позволяет учесть нелинейность температурного коэффициента сопротивления меди и алюминия в диапазоне возможных температур нормального и аварийного режимов.

Сопротивления различных последовательностей кабельной линии в начальный момент короткого замыкания вычисляются по следующим формулам:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{\text{пор}} l}{n_{\text{ц}}}; \quad (17.27)$$

$$X_0 = \frac{X_{\text{опор}} l}{n_{\text{ц}}}; \quad (17.28)$$

$$R_{\text{нач}} = R_{2\text{нач}} = K_{\vartheta} \frac{R_{\text{пор}} l + k_{\text{к.с}} R_{\text{к.с}}}{n_{\text{ц}}}; \quad (17.29)$$

$$R_{\text{онач}} = K_{\vartheta} \frac{R_{\text{опор}} l + k_{\text{к.с}} R_{\text{к.с}}}{n_{\text{ц}}}, \quad (17.30)$$

где l – длина линии, м;

$n_{\text{ц}}$ – количество параллельных кабелей в линии;

$k_{\text{к.с}}$ – количество разборных контактных соединений по длине одной жилы;

$R_{\text{к.с}}$ – сопротивление одного разборного контактного соединения, МОм.

При расчете тока короткого замыкания для произвольного момента времени t следует учитывать увеличение активного сопротивления проводников, обусловленное их нагревом. Для этого вместо K_{ϑ} в соответствующих формулах используется коэффициент K_{ϑ_t} , который определяется с учетом повышения температуры жил за счет тока короткого замыкания:

$$K_{\vartheta_t} = \frac{\vartheta_{\text{yc}} + \vartheta_t}{\vartheta_{\text{yc}} + \vartheta_{\text{нач}}} \quad (17.31)$$

и тогда температура жил к моменту отключения короткого замыкания определяется по формуле

$$\vartheta_t = \left(\vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{yc}} \right) \epsilon \frac{\frac{I^2 t}{K^2 S^2} + \vartheta_{\text{нач}}}{K^2 S^2} - \vartheta_{\text{yc}}, \quad (17.32)$$

где $I_{\text{к}}$ – среднеквадратичное значение тока короткого замыкания, А;

S – площадь поперечного сечения жилы, мм²;

K – константа, зависящая от физических свойств материала жилы (для меди $K = 226 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$, для алюминия $K = 148 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$);

ϵ – коэффициент, учитывающий теплообмен между жилами кабеля, жилой изоляцией, оболочкой и броней кабеля (при адиабатическом процессе нагрева жил $\epsilon = 1$ и возрастает при увеличении отношения l/S).

Значение коэффициента ϵ определяется по формуле

$$\epsilon = \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 B \left(\frac{t}{S} \right)}, \quad (17.33)$$

где F – коэффициент полноты теплового контакта между жилой и изоляцией (для твердой изоляции он принимается равным 0,7, а для маслонаполненных кабелей – 1,0);

A и B – эмпирические постоянные (измеряемые соответственно в мм/с^{0,5} и в мм²/с), определяющие термические характеристики окружающих или соседних неметаллических материалов.

Значения этих постоянных определяются по формулам:

$$A = \frac{C_1}{\sigma_{ж}} \sqrt{\frac{\sigma_{и}}{\rho_{и}}};$$

$$B = \frac{C_2}{\sigma_{ж}} \frac{\sigma_{и}}{\rho_{и}},$$

где $C_1 = 2464$ мм/м; $C_2 = 1,22$ К·мм²/Дж; $\sigma_{ж}$ – удельная объемная теплоемкость жил, равная для меди $3,45 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), для алюминия – $2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³); $\sigma_{и}$ – удельная объемная теплоемкость изоляции жил, которая для бумажной пропитанной изоляции кабелей равна $2 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), для полиэтиленовой изоляции – $2,4 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), для поливинилхлоридной (ПВХ) изоляции – $1,7 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³); $\rho_{и}$ – удельное термическое сопротивление изоляции жил, равное для бумажной пропитанной изоляции кабелей 6,0 К·м/Вт, для полиэтиленовой изоляции – 3,5 К·м/Вт, для ПВХ изоляции – 5 К·м/Вт.

Среднеквадратичное значение тока короткого замыкания зависит от сопротивления кабелей, а значит и от температуры жил, поэтому расчет активного сопротивления кабеля носит итерационный характер. В итоге получаем искомые сопротивления к моменту отключения короткого замыкания:

$$\left. \begin{aligned} R_{1t} &= K_{\vartheta} R_{1нач}; \\ R_{2t} &= K_{\vartheta} R_{2нач}; \\ R_{0t} &= K_{\vartheta} R_{0нач}. \end{aligned} \right\} \quad (17.34)$$

Если отношение продолжительности короткого замыкания к сечению жил $t/S < 0,1$ с/мм², влияние теплообмена между жилами и изоляцией жил незначительно, т.е. процесс нагрева жил можно считать адиабатическим. В этом случае $\varepsilon = 1$ и погрешность расчета токов короткого замыкания не превышает 5%.

Шинопроводы. Активное сопротивление шинопроводов определяется их длиной, сечением и материалом, из которого они выполнены. В небольшой степени активное сопротивление шинопроводов зависит от профиля поперечного сечения шин и их взаимного расположения, которые оказывают влияние на степень проявления поверхностного эффекта и эффекта близости. Суммарное сопротивле-

ние шинпровода зависит и от сопротивлений разборных контактных соединений, количество которых может быть большим, если шинпровод собирается из отрезков (секций) шин небольшой длины.

Индуктивное сопротивление шинпровода зависит от расстояния (просвета) между шинами и их взаимного расположения. Поэтому индуктивное сопротивление некомплектных шинпроводов надо рассчитывать исходя из их конструктивных особенностей. Для расчетов можно использовать те же формулы, что и для трехфазных воздушных линий с молниезащитным тросом. Погонные индуктивные сопротивления комплектных шинпроводов приводятся в справочниках.

При отсутствии данных изготовителя или эксперимента погонные параметры шинпроводов могут быть получены расчетным методом.

Погонное активное сопротивление прямой последовательности шинпровода при нормированной температуре $\vartheta_{\text{норм}}$ (как правило, $\vartheta_{\text{норм}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) рассчитывают по формуле

$$R_{\text{пог}} = \frac{\rho}{S} \cdot 10^3, \quad (17.35)$$

где ρ – удельное сопротивление материала шины при указанной температуре, Ом·мм²/м; для меди $\rho = 0,01724$ Ом·мм²/м, для алюминия $\rho = 0,031$ Ом·мм²/м;

S – сечение шины, мм².

Погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности шинпровода $X_{\text{пог}}$ определяют как среднее арифметическое значение погонных индуктивных сопротивлений отдельных фаз:

$$X_{\text{пог}} = \frac{X_{\text{порA}} + X_{\text{порB}} + X_{\text{порC}}}{3}. \quad (17.36)$$

Входящие в формулу (17.36) погонные индуктивные сопротивления фаз шинпровода при отсутствии вблизи них других нагруженных шинпроводов и при частоте тока в сети 50 Гц могут быть определены по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X_{\text{порA}} &= 0,145 \lg \frac{\sqrt{g_{AB} g_{AC}}}{g_0}, \\ X_{\text{порB}} &= 0,145 \lg \frac{\sqrt{g_{BC} g_{AB}}}{g_0}, \\ X_{\text{порC}} &= 0,145 \lg \frac{\sqrt{g_{AC} g_{BC}}}{g_0}, \end{aligned} \right\} \quad (17.37)$$

где g_{AB} , g_{AC} , g_{BC} – средние геометрические расстояния между площадями сечений соответствующих фаз, см;

g_0 – среднее геометрическое расстояние между элементарными площадями сечения шины, см.

Среднее геометрическое расстояние между площадями сечений двух одиночных шин разных фаз, входящее в формулу (17.37), может быть определено по одной из формул:

– для сплошных и трубчатых шин круглого сечения и сплошных шин квадратного сечения

$$g = d, \quad (17.38)$$

где d – расстояние между центрами сечений шин, см;

– для шин, имеющих любой профиль поперечного сечения, но удаленных друг от друга на расстояние, значительно превышающее линейные размеры сечения, допустимо принять

$$g \approx d, \quad (17.39)$$

– для шин прямоугольного сечения, имеющих небольшую толщину (отношение толщины к ширине не превышает 0,2) и обращенных друг к другу широкими сторонами (см. рис. 17.4);

$$g = kd, \quad (17.40)$$

где d – расстояние между осями шин, см;

k – коэффициент, значения которого определяются по кривой, приведенной на рис. 17.4;

– для шин прямоугольного сечения, лежащих в одной плоскости, среднее геометрическое расстояние между площадями сечений можно приближенно определить по кривой, приведенной на рис. 17.5.

Среднее геометрическое расстояние между элементарными площадями сечения шины для одиночной шины может быть определено по одной из приведенных ниже формул:

– для одиночной шины круглого сечения

$$g_0 = 0,779r, \quad (17.41)$$

где r – радиус сечения, см;

– для одиночной шины прямоугольного сечения

$$g_0 = 0,224(b + h), \quad (17.42)$$

где b и h – размеры сторон прямоугольника, см;

– для одиночной шины квадратного сечения

$$g_0 = 0,447b, \quad (17.43)$$

где b – размер стороны квадрата, см;

– для одиночной трубчатой шины квадратичного сечения

$$g_0 = 0,58Cb_{\text{вн}}, \quad (17.44)$$

где C – коэффициент, значения которого приведены в табл. 17.1;
 $b_{\text{вн}}$ – размер наружной (внешней) стороны шины, см.

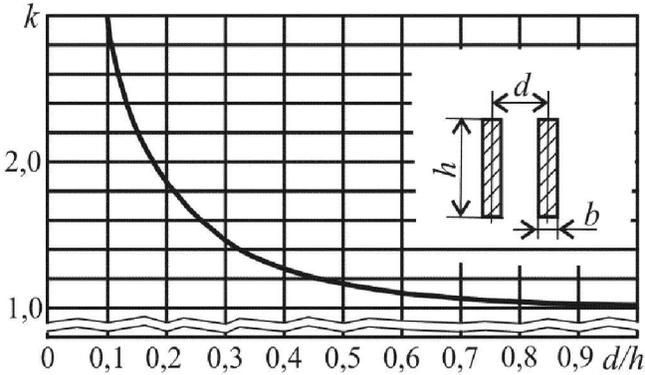


Рис. 17.4. Кривая для определения коэффициента k

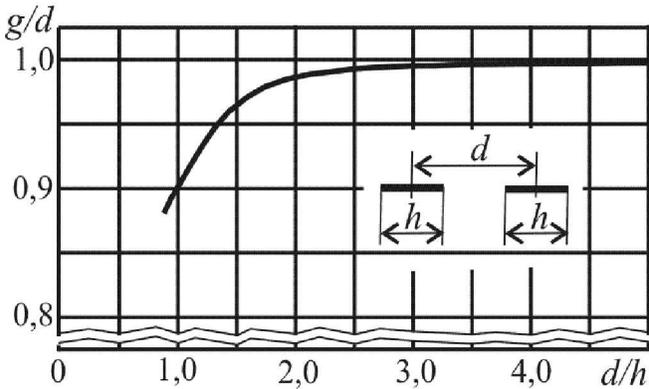


Рис. 17.5. Кривая для определения среднего геометрического расстояния между площадями сечений

Значения коэффициента C

| Отношение внутреннего радиуса трубы круглого сечения к внешнему радиусу или внутренней стороны трубы квадратного сечения к внешней стороне | Значение коэффициента C |
|--|---------------------------|
| 0,1 | 0,78 |
| 0,2 | 0,79 |
| 0,3 | 0,81 |
| 0,4 | 0,83 |
| 0,5 | 0,85 |
| 0,6 | 0,88 |
| 0,7 | 0,91 |
| 0,8 | 0,94 |
| 0,9 | 0,97 |
| 1,0 | 1,00 |

Среднее геометрическое расстояние между элементарными площадями сечения шины для пакета шин рассчитывают по следующим формулам:

– для двухполосного пакета

$$g_0 = \sqrt{0,224(b+h)dk}, \quad (17.45)$$

где b и h – соответственно толщина и ширина одной полосы шины (см. рис. 17.4), см;

d – расстояние между продольными осями (центрами масс) сечений шин пакета (см. рис. 17.4), см;

k – коэффициент, зависящий от отношения d/h ; его определяют по кривой, приведенной на рис. 17.4;

– для трехполосного пакета

$$\ln g_0 = \frac{1}{9} [3 \ln 0,224(b+h) + 2 \ln d_{12}k_{12} + 2 \ln d_{23}k_{23} + 2 \ln d_{13}k_{13}], \quad (17.46)$$

где d_{12} , d_{23} и d_{13} – расстояния между центрами масс сечений соответствующих шин пакета, см;

k_{12} , k_{23} и k_{13} – коэффициенты, зависящие от отношения d_{12}/h , d_{23}/h , d_{13}/h и определяемые по кривой, приведенной на рис. 17.4.

Значения средних геометрических расстояний между элементарными площадями сечения шины (g_0) наиболее употребляемых пакетов шин с зазорами между шинами, равными толщине шины, приведены в табл. 17.2.

**Значения средних геометрических расстояний между
элементарными площадями сечения шины g_0
некоторых пакетов шин**

| Сечение пакета, мм ² | g_0 , см |
|---------------------------------|------------|
| 2(80×10) | 1,53 |
| 2(100×10) | 3,0 |
| 2(120×10) | 3,45 |
| 3(80×10) | 2,99 |
| 3(100×10) | 3,50 |
| 3(120×10) | 3,95 |

Найденные значения погонных активных сопротивлений шинопровода, соответствующие температуре $\vartheta_{\text{норм}}$, следует приводить к рабочей температуре к моменту короткого замыкания $\vartheta_{\text{нач}}$ путем их умножения на коэффициент K_{ϑ} , вычисляемый по формуле (17.26).

Добавочные потери, обусловленные влиянием поверхностного эффекта и эффекта близости, а также добавочные потери от гистерезиса и вихревых токов в расположенных вблизи металлических элементах учитывают путем умножения погонного активного сопротивления шинопровода на коэффициент K_d , значения которого для алюминиевых шин сечением 100×10 мм² при числе шин m составляют: $K_d \approx 1,18$ при $m = 1$; $K_d \approx 1,25$ при $m = 2$; $K_d \approx 1,6$ при $m = 3$; $K_d \approx 1,72$ при $m = 4$. При прокладке шинопровода в галерее или туннеле коэффициент добавочных потерь следует брать на 0,25 больше, чем при его прокладке на открытом воздухе.

Значения индуктивных и активных сопротивлений прямой и нулевой последовательностей шинопровода при рабочей температуре определяют по формулам:

$$X_1 = X_{1\text{пог}} l, \quad (17.47)$$

$$X_0 = X_{0\text{пог}} l, \quad (17.48)$$

$$R_1 = R_{1\text{пог}} l K_{\vartheta} K_d + k_{\text{к.с}} R_{\text{к.с}}, \quad (17.49)$$

$$R_0 = R_{0\text{пог}} l K_{\vartheta} K_d + k_{\text{к.с}} R_{\text{к.с}}, \quad (17.50)$$

где $X_{1\text{пог}}$ и $X_{0\text{пог}}$ – погонное индуктивное сопротивление прямой и нулевой последовательностей шинопровода, мОм/м;

$R_{1\text{пог}}$ и $R_{0\text{пог}}$ – погонное активное сопротивление прямой и нулевой последовательностей шинопровода, мОм/м;

l – длина шинопровода, м;

$k_{к.с}$ – число разборных контактных соединений по длине;

$R_{к.с}$ – сопротивление одного разборного контактного соединения шинпровода, мОм.

При определении активного сопротивления нулевой последовательности расчетным методом допустимо принимать $R_0 = R_1$.

При расчете токов короткого замыкания в произвольный момент времени необходимо учитывать увеличение активного сопротивления шинпровода при коротком замыкании используя формулу (17.34). При этом коэффициент K'_3 определяют по формуле (17.31).

Активные и индуктивные сопротивления обратной последовательности шинпроводов следует считать равными соответствующим сопротивлениям прямой последовательности, т.е. $R_2 = R_1$ и $X_2 = X_1$. Их определяют по формулам

$$\left. \begin{aligned} R_1 = R_2 = R_{1\text{пог}} l [1 + \alpha (\vartheta_{\text{нач}} - 20)] + R_{к.с} (n_{\text{ш}} + 1); \\ X_1 = X_2 = X_{1\text{пог}} l, \end{aligned} \right\} \quad (17.51)$$

а соответствующие сопротивления нулевой последовательности по формулам:

$$\left. \begin{aligned} R_0 = R_{0\text{пог}} l [1 + \alpha (\vartheta_{\text{нач}} - 20)] + 3R_{к.с} (n_{\text{ш}} + 1); \\ X_0 = X_{0\text{пог}} l, \end{aligned} \right\} \quad (17.52)$$

где $R_{1\text{пог}}$ и $R_{0\text{пог}}$ – погонные активные сопротивления прямой и нулевой последовательности шинпровода при 20 °С, мОм/м;

$X_{1\text{пог}}$ и $X_{0\text{пог}}$ – погонные индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности шинпровода, мОм/м;

$R_{к.с}$ – сопротивление разборного контактного соединения отрезков шин, мОм;

α – коэффициент температурного изменения активного сопротивления материала шинпровода (для алюминия и меди можно принять $\alpha = 0,004$);

$\vartheta_{\text{нач}}$ – температура, соответствующая начальному моменту короткого замыкания, которая определяется также как и для кабеля, с учетом температуры окружающей среды и тока в предшествующем режиме;

l – длина шинпровода, м;

$n_{\text{ш}}$ – число последовательно соединенных отрезков шин в каждой фазе.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности шинпровода рекомендуется уточнять экспериментальным путем после его прокладки.

Воздушные линии электропередачи. В сетях напряжением 0,4 кВ преимущественно используются четырехпроводные воздушные линии.

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности воздушной линии можно вычислять по данным проводов, а именно, исходя из площади их поперечного сечения и расстояния между центрами сечений.

Погонное активное сопротивление провода в миллиомах:

$$R_{\text{пог}} = \frac{\rho}{nS} \cdot 10^3, \quad (17.53)$$

где ρ – удельное сопротивление материала круглых проводов: для меди $\rho = 0,0178$ Ом·мм²/м, для алюминия $\rho = 0,03$ Ом·мм²/м;

n – число проводников в проводе;

S – площадь поперечного сечения проводника.

Погонное индуктивное сопротивление провода в милиомах:

$$X_{\text{пог}} = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4n} + \ln \left(\frac{d}{r_{\text{ср}}} \right) \right] \cdot 10^3, \quad (17.54)$$

где ω – угловая частота напряжения сети, рад/с;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;

μ – относительная магнитная проницаемость материала проводника;

$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{13}d_{23}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами, см,

d_{12}, d_{13}, d_{23} – расстояния между осями проводов, см;

$r_{\text{ср}} = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ – средний геометрический радиус системы проводников одного провода, см;

R – радиус окружности, проходящей по осям крайних проводников, см (см. рис. 17.6);

r – радиус проводника.

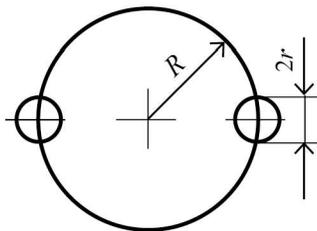


Рис. 17.6. Многожильный провод

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности воздушной линии в миллиомах определяют по формулам:

$$R_{0\text{пор}} = \left(\frac{P}{nS} + 3 \frac{\omega \mu_0}{8} \right) \cdot 10^3; \quad (17.55)$$

$$X_{0\text{пор}} = \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu}{4n} + 3 \ln \frac{d_m}{\sqrt[3]{r_{\text{cp}} d^2}} \right) \cdot 10^3, \quad (17.56)$$

где $d_m = \sqrt[3]{d_{14} d_{24} d_{34}}$ – среднее геометрическое расстояние между фазными проводами 1, 2, 3 и нулевым проводом 4, см.

При расчете сопротивления нулевой последовательности сопротивление земли можно не учитывать, так как сопротивление заземляющих устройств может достигать 30 Ом и петля тока, возвращающегося по земле, имеет индуктивность, значительно превышающую индуктивность петли тока, замыкающегося по нулевому проводу линии.

Токоограничивающие реакторы. В электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ применяются только одиночные токоограничивающие реакторы, сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей которых определяются также, как и сопротивления реакторов напряжением 6 и 10 кВ.

Наибольшее распространение в электроустановках собственных нужд электростанций получил реактор типа РТТ-0,38-50 на номинальный ток 50 А. Сопротивления такого реактора равны: $R_1 = R_2 = R_0 = 56$ мОм и $X_1 = X_2 = X_0 = 151$ мОм.

Синхронные двигатели. Основная особенность учета синхронных двигателей при расчете коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1 кВ заключается в необходимости более тщательного определения активного сопротивления их обмотки статора. Если в паспорте двигателя отсутствуют сведения об активном и индуктивном сопротивлениях прямой последовательности, то их значения можно определить на основе паспортных или каталожных параметров пусковых характеристик:

$$R_1 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0,9976 \cdot \left(\frac{2M_{*0,05}}{I_{*II}} \right)^2}}{39,9 M_{*0,05}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}; \quad (17.57)$$

$$X_1 = 20 \sqrt{\frac{0,05 R_1}{M_{*0,05}^2} - R_1^2 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}}, \quad (17.58)$$

где $M_{*0,05}$ – кратность момента при скольжении 5%;

$I_{*\Pi}$ – кратность пускового тока;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, В;

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность (электрическая полная), кВт·А.

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС двигателя определяется по параметрам режима, предшествующего короткому замыканию. Расчет выполняется методом последовательных приближений. Расчет ЭДС для первой итерации в предположении работы двигателя с перевозбуждением и при номинальном напряжении на его выводах вычисляется по формуле:

$$E''_{\phi} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} + \left[(R_1 + jX_1) \cos \varphi_{(0)} + (X_1 - jR_1) \sin \varphi_{(0)} \right] \times \\ \times \frac{100 P_{* (0)} P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{(0)} \eta_{\text{НОМ}}}, \quad (17.59)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность (механическая на валу), кВт;

$P_{* (0)}$ – относительная механическая мощность в предшествующем режиме;

$\cos \varphi_{(0)}$ – коэффициент мощности в предшествующем режиме;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – коэффициент полезного действия, %.

Приведенные формулы позволяют рассчитать ток от двигателя в начальный момент короткого замыкания. Изменение тока синхронного двигателя в процессе короткого замыкания зависит от типа и параметров его системы возбуждения, а также от остаточного напряжения на его выводах. Для расчета переходных процессов в электроустановках с синхронными двигателями целесообразно использовать математические модели, позволяющие учесть поведение системы возбуждения и механическую инерционность вращающихся частей.

Асинхронные двигатели. Влияние асинхронных двигателей на ток короткого замыкания зависит от электрической удаленности точки короткого замыкания от двигателя и момента короткого замыкания. Если в начальный момент короткого замыкания сверхпереходная ЭДС двигателя оказывается больше напряжения на его выводах, то последний работает в генераторном режиме и увеличивает ток в точке короткого замыкания. ЭДС двигателя в процессе короткого замыкания уменьшается и при электрически близких коротких замыканиях стремится к нулю. Скорость изменения ЭДС определяется

скоростью изменения свободных токов в роторе. Чем меньше номинальное напряжение двигателя и чем меньше его номинальная мощность, тем больше декремент затухания эквивалентных роторных контуров и тем быстрее происходит спад ЭДС при коротком замыкании. Через 20–100 мс после возникновения короткого замыкания вектор напряжения на выводах двигателя «догоняет» вектор ЭДС, и двигатель начинает шунтировать ветвь с коротким замыканием. Шунтирующий эффект асинхронного двигателя проявляется и при коротком замыкании на его выводах, так как даже в этом случае имеется значительное остаточное напряжение в точке короткого замыкания, обусловленное сопротивлением электрической дуги.

Для расчета тока в начальный момент короткого замыкания активное сопротивление прямой последовательности асинхронного электродвигателя вычисляется по формуле:

$$R_1 = \left[\frac{s_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{M_{* \text{ П}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}} (1,62 - 0,0054 \eta_{\text{НОМ}})}{I_{* \text{ П}}^2 (100 - s_{\text{НОМ}})} \right] \times \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{100 P_{\text{НОМ}}}, \quad (17.60)$$

где $s_{\text{НОМ}}$ – скольжение номинальное, %;

$M_{* \text{ П}}$ – кратность пускового момента;

$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ – номинальный коэффициент мощности;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – коэффициент полезного действия, %;

$U_{\text{НОМ}}$ – напряжение номинальное, В;

$I_{* \text{ П}}$ – кратность пускового тока;

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность (механическая на валу), кВт.

Используемые в формуле числовые коэффициенты соответствуют допущению, что сумма механических и добавочных потерь составляет половину общих потерь в асинхронном двигателе.

Индуктивное сопротивление прямой последовательности асинхронного двигателя вычисляется по формуле:

$$X_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{I_{* \text{ П}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{100 P_{\text{НОМ}}} \right)^2 - R_1^2}. \quad (17.61)$$

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС асинхронного электродвигателя определяется из расчета предшествующего режима по формуле:

$$E''_{\phi} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} - \left[(R_1 + jX_1) \cos\varphi_{(0)} + (X_1 - jR_1) \sin\varphi_{(0)} \right] \times \frac{100 P_{*(0)} P_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{(0)} \eta_{\text{НОМ}}} \quad (17.62)$$

Для определения минимального тока короткого замыкания с учетом шунтирующего эффекта двигателя его ЭДС следует принять равной нулю, а составляющие сопротивления считать такими же, как при пуске. В расчетах, требующих особо высокой точности, влияние асинхронных двигателей следует определять с учетом зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя от скольжения ротора. Пример такой зависимости приведен на рис. 17.7 и 17.8.

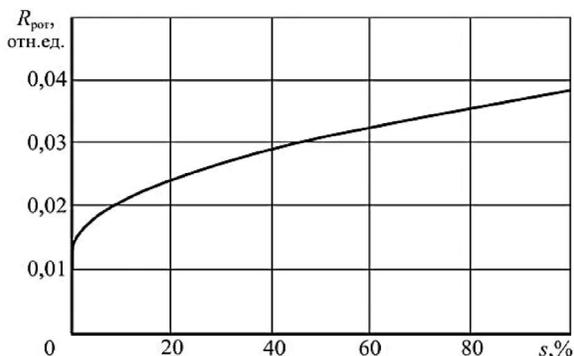


Рис. 17.7. Зависимость активного сопротивления эквивалентной обмотки ротора от скольжения асинхронного двигателя типа А-114-6М от его скольжения

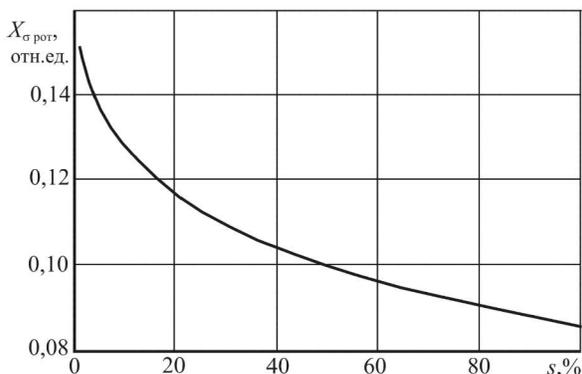


Рис. 17.8. Зависимость сопротивления рассеяния эквивалентной обмотки ротора от скольжения асинхронного двигателя типа А-114-6М от его скольжения

Если ток подпитки от асинхронных двигателей в начальный момент короткого замыкания не превышает 5% от суммарного тока, определенного без учета влияния двигателей, их влиянием можно пренебречь.

Обобщенная нагрузка. Суммарная мощность асинхронных двигателей в низковольтных электрических сетях промышленных предприятий и собственных нужд электростанций и подстанций составляет более 80% мощности всей нагрузки. Для приближенного учета влияния нагрузки на ток короткого замыкания можно заменить реальные нагрузки шинных сборок эквивалентными электродвигателями. Мощность последних принимают равной суммарной мощности включенной нагрузки сборок. Сопротивления прямой и обратной последовательностей эквивалентного двигателя в мегомах определяют по формуле:

$$Z_{CL} = \frac{1}{I_{*П}} \cdot \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{НОМ}} \cdot 10^3 = \frac{1}{I_{*П}} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}, \quad (17.63)$$

где $U_{НОМ}$ – номинальное напряжение двигателей, В;

$I_{*П}$ – кратность пускового тока (допустимо принимать $I_{*П} = 5$);

$I_{НОМ}$ – сумма номинальных токов группы эквивалентизируемых двигателей, А;

$S_{НОМ}$ – сумма номинальных мощностей группы эквивалентизируемых двигателей, кВ·А.

При приближенных расчетах для эквивалентного двигателя принимают

$$\left. \begin{aligned} R / X &= 0,42, \\ X &= 0,922Z. \end{aligned} \right\} \quad (17.64)$$

Сопротивление нулевой последовательности двигателей принимают в соответствии с данными производителя.

ЭДС эквивалентного двигателя определяется по формуле аналогичной (17.62), с учетом тока в предшествующем режиме.

Такой способ позволяет получить оценки максимального и минимального токов короткого замыкания с учетом влияния нагрузки. Также как и в случае учета отдельных двигателей, при расчете максимального тока короткого замыкания с учетом нагрузок следует включать в расчетную схему ЭДС и сопротивления эквивалентных двигателей, соответствующие их скольжению в предшествующем режиме, а при расчете минимального тока короткого замыкания ЭДС эквивалентных двигателей счи-

тать равными нулю и сопротивления равными их значениям при пуске двигателей.

Электрическая дуга. Учет электрической дуги, возникающей в месте короткого замыкания, производится введением в расчетную схему ее активного сопротивления $R_{д}$, значение которого определяется на основе усредненных вольтамперных характеристик устойчиво горящей дуги, полученных экспериментально. Реальная электрическая дуга в процессе короткого замыкания под действием электродинамических сил удлиняется и перемещается, удаляясь от источника энергии. Поэтому сопротивление дуги является случайной величиной, зависящей от большого количества факторов, в частности, от силы тока и длины дугового столба. Имеется несколько методов получения оценки математического ожидания сопротивления дуги. Наиболее приемлемым для практических расчетов является метод, устанавливающий связь между током дугового короткого замыкания и током металлического короткого замыкания посредством коэффициента снижения тока K_c , кривые зависимости которого от полного сопротивления цепи до точки короткого замыкания Z_k приведены на рис. 17.9.

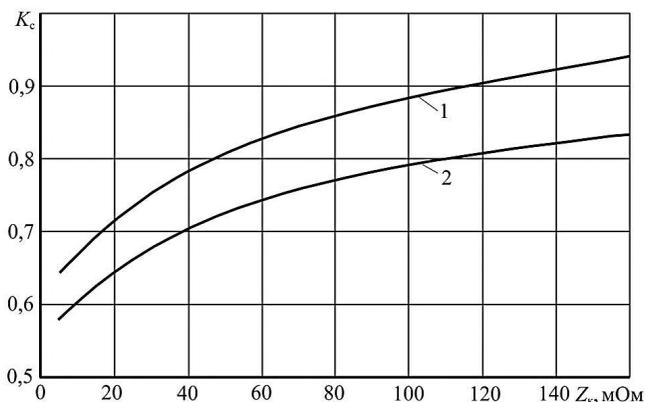


Рис. 17.9. Зависимость коэффициента снижения тока дугового короткого замыкания по отношению к току металлического короткого замыкания от полного сопротивления цепи короткого замыкания:

- 1 – для начального момента короткого замыкания;
- 2 – для момента отключения короткого замыкания

Указанные зависимости $K_c = f(Z_k)$ были получены на основе статистической обработки осциллограмм токов во время опытов короткого замыкания в сетях напряжением 0,4 кВ собственных нужд электростанций.

Активное сопротивление дуги при известном K_c можно определить по формуле

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{срН}}^2}{3I_{\text{п0}}^2 K_c^2} - X_{\text{IЭК}}^2} - R_{\text{IЭК}}, \quad (17.65)$$

где $I_{\text{п0}}$ – начальное значение периодической составляющей тока металлического короткого замыкания;

$R_{\text{IЭК}}$ и $X_{\text{IЭК}}$ – соответственно эквивалентное активное и эквивалентное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи короткого замыкания.

Приведенную на рис. 17.9 зависимость K_c от полного сопротивления цепи короткого замыкания можно аппроксимировать выражениями:

- ▶ для начального момента короткого замыкания

$$K_c = 0,6 - 0,025Z_k + 0,114\sqrt{Z_k} - 0,13\sqrt[3]{Z_k};$$

- ▶ для момента отключения короткого замыкания

$$K_c = 0,55 - 0,002Z_k + 0,1\sqrt{Z_k} - 0,12\sqrt[3]{Z_k}.$$

Для расчета несимметричных дуговых коротких замыканий удобно использовать зависимость сопротивления дуги от тока дуги, представленную на рис. 17.10. Аппроксимирующее выражение такой зависимости получено из зависимости $K_c = f(Z_k)$ в произвольный момент времени:

$$R_d = \frac{47}{I_d^{0,28}} - 15, \quad (17.66)$$

где I_d – ток дуги, кА.

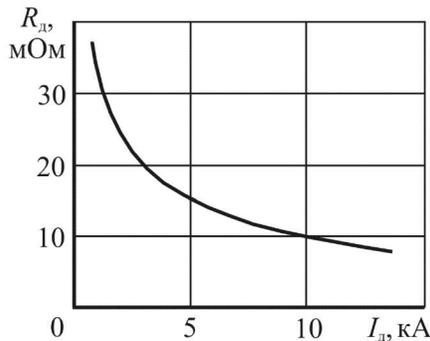


Рис. 17.10. Зависимость сопротивления электрической дуги переменного тока от тока в дуговом столбе

Полученное сопротивление дуги можно вводить в схемы замещения всех последовательностей. Расчет токов короткого замыкания с учетом электрической дуги и теплового спада тока производится методом последовательных приближений. Начальное значение тока дуги рекомендуется принимать равным половине тока металлического короткого замыкания. Для получения результатов расчетов с погрешностью, не превышающей 1%, как правило, достаточно 3 – 5 итераций.

17.3. Расчет трехфазных коротких замыканий

Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания

Методика расчета начального действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в электроустановках до 1 кВ зависит от способа электроснабжения – от сетевого или от автономного источника.

При электроснабжении электроустановки от сетевого источника через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в килоамперах без учета подпитки от двигателей рассчитывают по формуле

$$I_{п0} = \frac{E_{\text{эк}}}{\sqrt{R_{1\text{эк}}^2 + X_{1\text{эк}}^2}}, \quad (17.67)$$

где $E_{\text{эк}}$ – фазная ЭДС сетевого источника, приведенная к ступени низшего напряжения трансформатора, В;

$R_{1\text{эк}}$ и $X_{1\text{эк}}$ – соответственно эквивалентное активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности всех элементов цепи короткого замыкания, мОм, включая эквивалентное сопротивление сетевого источника до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения, мОм.

В тех случаях, когда электроснабжение электроустановки осуществляется от сетевого источника через понижающий трансформатор, но вблизи места короткого замыкания имеются синхронные и асинхронные двигатели, начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания следует определять с учетом подпитки от двигателей как сумму токов от сетевого источника и от двигателей.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного двигателя в килоамперах определяют по формуле

$$I_{\text{посД}} = \frac{E_{\text{сД}}''}{\sqrt{(X_{1\text{сД}} + X_{1\text{эк}})^2 + (R_{1\text{сД}} + R_{1\text{эк}})^2}}, \quad (17.68)$$

где $E_{\text{сД}}''$ – сверхпереходная ЭДС синхронного двигателя (фазное значение), В;

$X_{1\text{сД}}$ и $R_{1\text{сД}}$ – соответственно индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм; значения этих сопротивлений следует определять по формулам (17.58) и (17.57);

$R_{1\text{эк}}$ и $X_{1\text{эк}}$ – эквивалентные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между двигателем и точкой короткого замыкания, мОм.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания от асинхронного двигателя в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{п0АД}} = \frac{E_{\text{АД}}''}{\sqrt{(X_{1\text{АД}} + X_{1\text{эк}})^2 + (R_{1\text{АД}} + R_{1\text{эк}})^2}}, \quad (17.69)$$

где $E_{\text{АД}}''$ – сверхпереходная ЭДС асинхронного двигателя, В;

$X_{1\text{АД}}$ и $R_{1\text{АД}}$ – соответственно индуктивное и активное сопротивления двигателя, мОм; значения этих сопротивлений допускается определять по формулам (17.61) и (17.60).

В случае электроснабжения электроустановки от автономных источников энергии (синхронных генераторов) начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания без учета подпитки от двигателей в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{п0}} = \frac{E''}{\sqrt{X_{1\text{эк}}^2 + R_{1\text{эк}}^2}}, \quad (17.70)$$

где E'' – эквивалентная сверхпереходная ЭДС синхронных генераторов (фазное значение), В;

$X_{1\text{эк}}$ и $R_{1\text{эк}}$ – эквивалентные индуктивное и активное сопротивления цепи короткого замыкания, мОм.

При необходимости учета синхронных и асинхронных двигателей в автономной электрической системе начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания следует определять как сумму токов от синхронных генераторов и всех двигателей.

Расчет аperiodической составляющей и ударного тока короткого замыкания

Наибольшее начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в общем случае следует принимать численно равным амплитуде периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания, т.е.

$$i_{a0} = \sqrt{2}I_{п0}. \quad (17.71)$$

В радиальных сетях аperiodическую составляющую тока короткого замыкания в произвольный момент времени рассчитывают по формуле

$$i_{af} = i_{a0}e^{-t/T_a}, \quad (17.72)$$

где t – время от момента начала короткого замыкания, с;

T_a – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания, с, равная

$$T_a = \frac{X_{эк}}{2\pi f R_{эк}}, \quad (17.73)$$

здесь $X_{эк}$ и $R_{эк}$ – эквивалентные индуктивное и активное сопротивления цепи короткого замыкания, мОм;

f – частота сети, Гц.

При определении $X_{эк}$ синхронные генераторы и синхронные двигатели должны учитываться индуктивными сопротивлениями обратной последовательности.

Если короткое замыкание является трехфазным и в точке короткого замыкания расчетная схема делится на радиальные, независимые друг от друга ветви, то аperiodическую составляющую тока короткого замыкания в произвольный момент времени допустимо определять как сумму аperiodических составляющих токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{af} = \sum_{k=1}^m i_{a0k} e^{-t/T_{ak}}, \quad (17.74)$$

где m – число независимых ветвей схемы;

i_{a0k} – начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания в k -й ветви, кА;

T_{ak} – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания k -й ветви, с.

Ударный ток трехфазного короткого замыкания в электроустановках с одним источником энергии (сетевой источник) следует рассчитывать по формуле

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2}I_{\text{п0}} \left(1 + e^{-\frac{0,01(0,5+\varphi_{\text{к}}/\pi)}{T_{\text{а}}}} \right) = \sqrt{2}I_{\text{п0}} K_{\text{уд}}, \quad (17.75)$$

где $K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5+\varphi_{\text{к}}/\pi)}{T_{\text{а}}}}$ – ударный коэффициент тока короткого замыкания;

$\varphi_{\text{к}} = \arctg X_{1\text{эк}} / R_{1\text{эк}}$. – угол сдвига по фазе между напряжением или ЭДС источника и периодической составляющей тока короткого замыкания.

Ударный коэффициент также может быть определен по формуле

$$K_{\text{уд}} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega T_{\text{а}}}}. \quad (17.76)$$

При расчете ударного тока короткого замыкания на выводах синхронных генераторов, а также синхронных двигателей допускается считать, что ударный ток наступает через 0,01 с после начала короткого замыкания, а амплитуда периодической составляющей тока короткого замыкания в момент времени $t = 0,01$ с равна амплитуде этой составляющей в начальный момент короткого замыкания. При этом формула для определения ударного коэффициента тока короткого замыкания имеет простой вид:

$$K_{\text{уд}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\text{а}}}}. \quad (17.77)$$

Ударный ток от асинхронного двигателя в килоамперах следует определять с учетом затухания амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания, используя формулу

$$i_{\text{удАД}} = \sqrt{2}I_{\text{п0АД}} \left(e^{-\frac{0,01}{T_{\text{расч}}}} + e^{-\frac{0,01(0,5+\varphi_{\text{к}}/\pi)}{T_{\text{а}}}} \right), \quad (17.78)$$

где $T_{\text{расч}}$ – расчетная постоянная времени затухания амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания, с.

При этом $T_{\text{а}}$ и $T_{\text{расч}}$ допускается рассчитывать по формулам:

$$T_{\text{а}} = \frac{X_{2\text{АД}} + X_{\text{вн}}}{\omega(R_1 + R_{\text{вн}})}, \quad (17.79)$$

$$T_{\text{расч}} = \frac{X_{2\text{АД}} + X_{\text{вн}}}{\omega R_2}, \quad (17.80)$$

где $R_{1\text{АД}}$ – активное сопротивление обмотки статора, мОм, определяемое по формуле (17.60);

$X_{\text{вп}}$ и $R_{\text{вп}}$ – индуктивное и активное сопротивления элементов цепи, мОм, включенных между точкой короткого замыкания и асинхронным двигателем;

R_2° – активное сопротивление ротора двигателя, приведенное к статору, мОм; это сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_2^{\circ} = \frac{0,36 M_{\Pi}^* (P_{\text{ном}} + P_{\text{мх}})}{I_{\Pi}^2 I_{\text{ном}}^2 (1 - s_{\text{ном}}/100)} \cdot 10^6, \quad (17.81)$$

где M_{Π}^* – кратность пускового момента электродвигателя по отношению к его номинальному моменту;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

$P_{\text{мх}}$ – механические потери в двигателе (включая добавочные потери), кВт;

I_{Π}^* – кратность пускового тока двигателя по отношению к его номинальному току;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток двигателя, А;

$s_{\text{ном}}$ – номинальное скольжение, %.

Если в точке трехфазного короткого замыкания расчетная схема делится на радиальные, не зависящие друг от друга ветви, то ударный ток допускается определять как арифметическую сумму ударных токов отдельных ветвей по формуле

$$i_{\text{уд}} = \sum_{k=1}^m \sqrt{2} I_{\text{п0}k} \left(1 + e^{-\frac{0,01 \left(0,5 + \frac{\varphi_{\text{кк}}}{\pi} \right)}{T_{\text{ак}}}} \right), \quad (17.82)$$

где m – число независимых ветвей схемы;

$I_{\text{п0}k}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в k -й ветви, кА;

$\varphi_{\text{кк}}$ – угол сдвига по фазе между напряжением или ЭДС источника и периодической составляющей тока короткого замыкания k -й ветви;

$T_{\text{ак}}$ – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания в k -й ветви, с.

В тех случаях, когда электроустановка защищена предохранителями или токоограничивающими автоматическими выключателями, то начальное значение тока короткого замыкания следует вычислять без учета этих защитных аппаратов, а затем по токоограничивающим характеристикам защитных аппаратов определять максимальное значение тока короткого замыкания.

17.4. Расчет токов несимметричных коротких замыканий

Составление схем замещения

Расчет токов несимметричных коротких замыканий следует выполнять с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы исходной расчетной схемы соответствующими параметрами. Схема замещения обратной последовательности также должна содержать все элементы исходной расчетной схемы. При этом ЭДС обратной последовательности синхронных и асинхронных машин принимают равными нулю. Сопротивление обратной последовательности синхронных машин следует принимать по паспортным данным, а асинхронных машин допустимо принимать равным сверхпереходному сопротивлению.

Сопротивления обратной последовательности трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий принимают равными соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

Расчет токов однофазного короткого замыкания

Если электроснабжение электроустановки напряжением до 1 кВ осуществляется от сетевого источника через понижающий трансформатор, то начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного короткого замыкания в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{3E_{\text{ЭК}}}{\sqrt{(2R_{1\text{ЭК}} + R_{0\text{ЭК}})^2 + (2X_{1\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}, \quad (17.83)$$

где $E_{\text{ЭК}}$ – фазная ЭДС сетевого источника, приведенная к ступени низшего напряжения трансформатора, В;

$R_{1\text{ЭК}}$ и $X_{1\text{ЭК}}$ – эквивалентные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности расчетной схемы относительно точки короткого замыкания;

$R_{0\text{ЭК}}$ и $X_{0\text{ЭК}}$ – эквивалентные активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки короткого замыкания, МОм.

В случаях электроснабжения электроустановки от автономных источников энергии начальное значение периодической составляющей тока однофазного короткого замыкания в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{\text{п0}}^{(1)} = \frac{3E''}{\sqrt{(2R_{1\text{ЭК}} + R_{0\text{ЭК}})^2 + (2X_{1\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}, \quad (17.84)$$

где E'' – эквивалентная сверхпереходная ЭДС синхронных генераторов (фазное значение).

Начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного короткого замыкания с учетом синхронных и асинхронных двигателей в килоамперах рассчитывают аналогично, причем ЭДС E'' , $R_{1\text{ЭК}}$ и $R_{2\text{ЭК}}$ определяют с учетом сверхпереходных ЭДС и соответствующих параметров двигателей.

Расчет токов двухфазного короткого замыкания

В случаях, когда электроснабжение электроустановок напряжением до 1 кВ производится от сетевого источника через понижающий трансформатор, начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в килоамперах определяют по формуле

$$I_{\text{п0}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_{\text{ЭК}}}{2\sqrt{R_{1\text{ЭК}}^2 + X_{1\text{ЭК}}^2}}. \quad (17.85)$$

При электроснабжении электроустановки от автономных источников энергии начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в килоамперах следует рассчитывать по формуле

$$I_{\text{п0}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E''}{2\sqrt{R_{1\text{ЭК}}^2 + X_{1\text{ЭК}}^2}}. \quad (17.86)$$

Начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания с учетом асинхронных двигателей определяют по той же формуле, причем эквивалентную ЭДС, а также $R_{1\text{ЭК}}$ и $X_{1\text{ЭК}}$ рассчитывают с учетом сверхпереходной ЭДС и параметров асинхронных двигателей. Начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания с учетом синхронных двигателей определяют аналогично.

17.5. Параметры элементов электроустановок постоянного тока

Общие положения. В электроустановках постоянного тока источниками энергии являются аккумуляторные батареи и полупроводниковые преобразователи – зарядно-подзарядные агрегаты и кон-

верторы. На ток короткого замыкания в этих электроустановках существенное влияние оказывают физические явления, изменяющие активную составляющую сопротивления короткозамкнутой электрической цепи: электрическая дуга, нагрев проводников током, окисление контактов, теплообмен между жилами кабелей и изоляцией.

Многие элементы электроустановок постоянного тока имеют нелинейные вольтамперные характеристики. К таким элементам относятся зарядно-подзарядные агрегаты, конверторы, электрическая дуга и аккумуляторные батареи. Кроме того, у ряда элементов существенно проявляется параметрическая зависимость вольтамперных характеристик от температуры окружающей среды, срока службы и технического состояния электротехнического оборудования. Сопротивление кабелей и аккумуляторных батарей зависит от их температуры. Сопротивление аккумуляторных батарей и электрических контактов растет по мере выработки ими ресурса по сроку службы. На характер изменения тока в процессе короткого замыкания оказывают влияние регуляторы полупроводниковых преобразователей и параметры их настройки. Таким образом, расчет коротких замыканий в электроустановках постоянного тока с приемлемой для инженерной практики точностью является трудоемкой задачей. В некоторых случаях для получения удовлетворительных результатов требуется использовать сложные математические модели и специальные компьютерные программы.

При решении задач, связанных с выбором электрооборудования и защитных аппаратов для электроустановок оперативного постоянного тока электростанций и подстанций, обычно ограничиваются получением оценочных значений токов и напряжений при коротком замыкании. Практический интерес представляют оценки максимально возможного и вероятного минимального тока короткого замыкания. Для получения оценок тока «сверху» и «снизу» задаются соответствующие расчетные условия: расчетная схема, расчетная точка короткого замыкания, расчетный вид короткого замыкания, расчетная продолжительность короткого замыкания, предшествующий режим. Заданный набор расчетных условий определяет значения ЭДС и сопротивлений элементов схемы замещения электроустановки и конечный результат расчета.

Методика расчета коротких замыканий в электроустановках постоянного тока подобна методике расчета коротких замыканий в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. Нелинейность вольтамперных характеристик элементов расчетной схемы обуславливает применение итерационных алгоритмов расчета.

При проверке защитных аппаратов на отключающую способность и при расчете коммутационных перенапряжений кроме активных сопротивлений необходимо знать индуктивности и емкости элементов электроустановки.

Аккумуляторные батареи. На электростанциях и подстанциях преимущественно используются стационарные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. В зависимости от характера и удаленности нагрузки батареи содержат от 104 до 130 последовательно соединенных аккумуляторов. Внутреннее сопротивление отдельных аккумуляторов и всей батареи определяется не только активными сопротивлениями, но и электрической емкостью и индуктивностью, как показано на рис. 17.11.

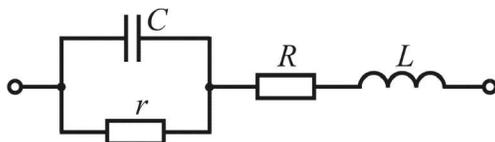


Рис. 17.11. Схема замещения, определяющая эквивалентное внутреннее сопротивление аккумулятора

Емкость C , представленная на рис. 17.11, является электрической (фарадеевской) и ее не следует путать с электрохимической емкостью аккумуляторов. Электрохимическая емкость определяется количеством свинца, участвующего в электрохимических реакциях при заряде и разряде аккумулятора, а электрическая емкость – конструкцией аккумулятора, а именно, площадью пластин и расстоянием между ними. Электрическая емкость аккумулятора не является константой, так как изменяется в зависимости от состояния и степени его заряженности. Она также зависит от тока в цепи с аккумулятором и от проводимости электролита в приэлектродных слоях пластин, изменение которой приводит к изменению эффективного расстояния между пластинами. Определить значение электрической емкости аккумулятора можно экспериментальным путем – снятием и последующей обработкой его частотной характеристики.

Индуктивность аккумуляторной батареи L имеет несколько составляющих: собственную (внутреннюю) индуктивность аккумуляторов, индуктивность межаккумуляторных соединений и индуктивность проводников, соединяющих аккумуляторную батарею с распределительным щитом. Собственная индуктивность аккумуляторов в основном зависит от их номинальной электрохимической емкости (см. рис. 17.12, где в качестве номинальной электрохимической емкости принята емкость десятичасового разряда C_{10}). Индуктивность межаккумуляторных соединений определяется сечением проводников и их взаимным расположением, которое зависит от размещения аккумуляторов на стеллаже. Индуктивность соединительных проводников рассчитывается на основе сведений о размещении шин и аккумуляторов в аккумуляторном помещении и сведений о способе прокладки кабелей к щиту постоянного тока. Чем больше сечение проводников и чем меньше расстояние между проводниками, тем меньше результирующая индуктивность аккумуляторной батареи.

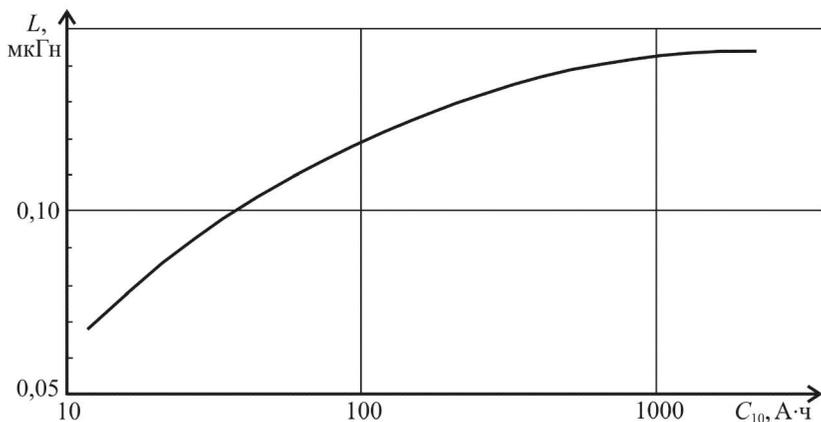


Рис. 17.12. Зависимость собственной индуктивности свинцово-кислотных аккумуляторов от их номинальной электрохимической емкости десятичасового разряда

Активное сопротивление аккумуляторной батареи также имеет несколько составляющих. Первая составляющая – сопротивление металлических частей аккумуляторов: пластин; соединительных перемычек между пластинами, образующих электроды; соединений электродов с токовыводами (борнами) и самих токовыводов. Этой составляющей на рис. 17.11 соответствует элемент R . Вторая, наиболее нелинейная составляющая – сопротивление приэлектродных слоев, образующихся на стыке пластин и электролита. Третья составляющая – сопротивление движению ионов между пластинами через электролит и сепаратор. Элемент r , показанный на схеме рис. 17.11, соответствует сумме второй и третьей составляющих сопротивлений.

Кроме перечисленных внутренних сопротивлений отдельных аккумуляторов, к сопротивлению R батареи добавляются сопротивления межаккумуляторных соединительных проводников и сопротивления проводников, с помощью которых батарея подключается к распределительному щиту. Если межаккумуляторные соединения выполнены не с помощью пайки или сварки, а являются разборными, то заметной составляющей полного сопротивления батареи могут стать переходные сопротивления контактов между борнами и внешними проводниками.

При упрощенных расчетах токов короткого замыкания нелинейную внешнюю вольтамперную характеристику аккумулятора во всем диапазоне возможных значений тока короткого замыкания аппроксимируют двумя или одной линейной зависимостью. Погрешность аппроксимации вольтамперной характеристики на участке с токами более $0,5C_{10}$ не превышает 5 – 10%. Вольтамперные характе-

ристики новых полностью заряженных аккумуляторов серии СК при температуре 25 °С обычно аппроксимируют двумя линейными функциями (см. ломаную линию 1 на рис. 17.13), которым соответствуют следующие значения ЭДС $E_{ак}$ и внутреннего сопротивления $R_{ак}$ одного аккумулятора СК- N :

- для токов от 0 до $150 \cdot N$

$$E_{ак} = 1,93 \text{ В и } R_{ак} = 5,4/N \text{ мОм};$$

- для токов больше $150 \cdot N$

$$E_{ак} = 1,70 \text{ В и } R_{ак} = 4,0/N \text{ мОм},$$

где $N = C_{10}/36$ – номер аккумулятора, соответствующий номинальной электрохимической емкости десятичасового разряда C_{10} .

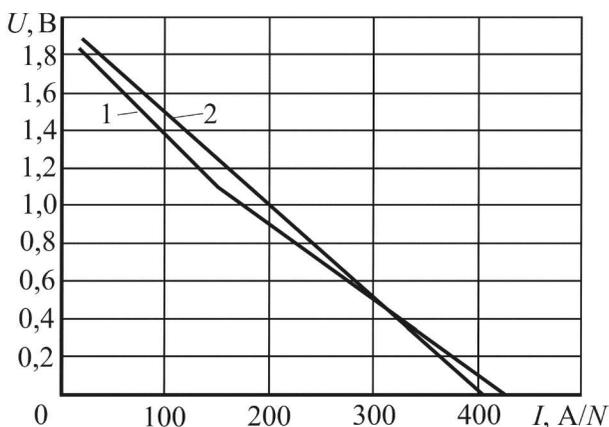


Рис. 17.13. Спряmlенная вольтамперная характеристика аккумуляторов серии СК при температуре 25 °С:

1 – ломаная (двухлинейная); 2 – прямая (однолинейная)

Вольтамперные характеристики современных аккумуляторов с приемлемой для инженерных расчетов точностью можно аппроксимировать одной линейной функцией (см. прямую линию 2 на рис. 17.13), т.е. использовать на всем интервале возможных токов короткого замыкания одинаковые значения внутреннего сопротивления и эквивалентной ЭДС аккумулятора. Напряжение холостого хода и ток короткого замыкания спряmlенной вольтамперной характеристики входят в состав паспортных данных аккумуляторов зарубежного производства.

На электростанциях и подстанциях преимущественно используются аккумуляторы с плоскими металлическими электродами по-

верхностного типа (Планте). Удельное внутреннее сопротивление таких аккумуляторов, соответствующее линеаризованной вольтамперной характеристике, находится в интервале значений от 80 до 180 мОм·А·ч. Верхняя граница интервала представляет собой удельное внутреннее активное сопротивление аккумуляторов серии СК. У более современных аккумуляторов закрытых типов, пластины которых изготовлены из мелких гранул свинца, удельное внутреннее сопротивление может быть меньше, чем у аккумуляторов с пластинами Планте, и примерно равно 60 мОм·А·ч. В табл. 17.3 приведены удельные внутренние сопротивления аккумуляторов, применяющихся в отечественной энергетике. При исследовании коротких замыканий паспортное или каталожное значение внутреннего сопротивления аккумулятора следует скорректировать, исходя из заданных расчетных условий, по температуре аккумулятора, степени его заряженности и срока службы.

Таблица 17.3

ЭДС и удельные внутренние сопротивления новых полностью заряженных аккумуляторов, при температуре электролита 25 °С

| Тип аккумулятора | C_{10} , А·ч | $E_{ак}$, В | $R_{уд}$, мОм·А·ч |
|---------------------------------|----------------|--------------|--------------------|
| 3GroE75 – 18GroE450 | 75 – 450 | 2,00 | 93 |
| 5GroE500 – 26GroE2600 | 500 – 2600 | 2,0 | 150 |
| xOpzS300LA – xOpzS420LA | 300 – 420 | 2,05 | 210 |
| xOpzS600LA – xxOpzS1200LA | 600 - 1200 | 2,05 | 257 |
| Vb2305 – Vb2312 | 250 – 600 | 2,00 | 130 |
| Vb2407 – Vb2420 | 700 – 2000 | 2,00 | 172 |
| Vb6114 – Vb6116, Vb4117, Vb4118 | 128 – 224 | 2,00 | 115 |
| СК | 36 – 5328 | 2,00 | 180 |

При изменении полноты заряженности аккумуляторов и температуры окружающей среды параметры аккумуляторов значительно изменяются. В таблице 17.4 показаны характерные изменения параметров аккумуляторов на примере аккумулятора типа СК-1.

При повышении температуры внутреннее сопротивление аккумулятора уменьшается в основном из-за увеличения подвижности ионов в электролите. Значение температурного коэффициента для большинства типов аккумуляторов не превышает 2 %/ °С. При продолжительных коротких замыканиях температура аккумуляторов

возрастает за счет джоулевых потерь энергии и интенсивных электрохимических процессов. Это приводит к уменьшению сопротивления электролита, но сопротивление металлических элементов аккумуляторной батареи при этом несколько возрастает.

Таблица 17.4

Параметры аккумулятора типа СК-1

| Параметр | Значение параметра при степени заряженности аккумулятора и температуре электролита | | | | | |
|----------------|--|-------|------|--------------------|-------|------|
| | полностью заряжен | | | полностью разряжен | | |
| | 25 °С | 10 °С | 0 °С | 25 °С | 10 °С | 0 °С |
| $E_{ак}$, В | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,93 | 1,93 | 1,93 |
| $R_{ак}$, МОм | 5,0 | 6,25 | 7,25 | 7,05 | 8,75 | 10,5 |

Внутреннее сопротивление аккумуляторов увеличивается не только в процессе разряда, но и по мере их старения, поскольку активный металлический свинец преобразуется в плохо растворимый сульфат свинца, имеющий более высокое удельное сопротивление. Срок службы аккумуляторов определяется пороговым значением их электрохимической емкости, соответствующим 80% номинальной емкости. Внутреннее сопротивление аккумуляторов к концу срока службы увеличивается на 25 – 40 % . Этот фактор обуславливает ускоренное снижение напряжения на аккумуляторах в конце их разряда.

Зарядные устройства. На современных электростанциях и подстанциях в качестве зарядных устройств используются полупроводниковые регулируемые выпрямители. Внешняя вольтамперная характеристика большинства таких агрегатов имеет два участка: на первом участке, в диапазоне рабочих токов, регулятор поддерживает напряжение на заданном уровне, а на втором участке осуществляется ограничение тока аварийного режима – при перегрузках или коротком замыкании (см. рис. 17.14). Границей между участками характеристики является точка со значением тока, равным номинальному току выпрямительного агрегата.

Современные регуляторы способны обеспечить такое напряжение на выводах аккумуляторной батареи, при котором его отклонения не превышают $\pm 0,1\%$. При использовании зарядных устройств более старых типов отклонения напряжения заряда достигают двух и более процентов. Стабилизация напряжения возможна лишь при небольших токах, соответствующих нормальному режиму работы электроустановки. При коротком замыкании напряжение на выходе зарядных устройств определяет-

ся падением напряжения на внутреннем сопротивлении аккумуляторной батареи и уже при токах в несколько сотен ампер уменьшается более чем на 2 – 3 В. Из этого следует, что даже при удаленных коротких замыканиях зарядное устройство работает на втором участке вольтамперной характеристики. Таким образом, при расчете коротких замыканий зарядное устройство в схеме замещения можно представлять в виде источника тока, причем значение тока источника принимать равным номинальному току зарядного устройства.

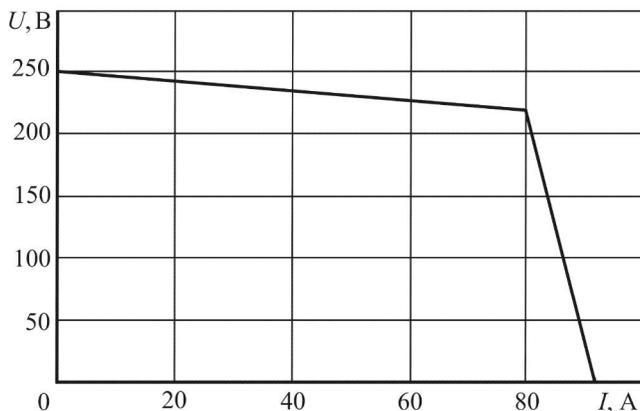


Рис. 17.14. Внешняя вольтамперная характеристика зарядно-подзарядного агрегата серии ВАЗП с номинальным током 80 А

В электроустановках оперативного постоянного тока электростанций и подстанций к аккумуляторной батарее одновременно подключены два выпрямительных агрегата. Настройка регуляторов у агрегатов выполняется так, чтобы один из них в нормальном режиме работал, а другой находился в «горячем» резерве. При коротком замыкании резервный агрегат автоматически вступает в работу и сразу переходит в режим ограничения тока, поэтому в схему замещения должны быть введены два источника тока.

При параллельной работе с аккумуляторной батареей зарядные устройства увеличивают ток короткого замыкания, причем увеличение равно их номинальному току. Таким образом, если суммарный ток короткого замыкания не превышает номинальный ток зарядных устройств, то в нем отсутствует составляющая от аккумуляторной батареи. В ремонтных режимах, когда аккумуляторная батарея отключена, ток короткого замыкания полностью определяется параметрами настройки регуляторов зарядного устройства и не зависит от сопротивления короткозамкнутой цепи.

Проводники. В электроустановках постоянного тока используются шинные конструкции проводников, а также одножильные, двухжильные и многожильные кабели. В аккумуляторных помещениях для соединения групп аккумуляторов друг с другом и с проходной доской применяются проводники из неизолированных шин, как правило, в виде медных прутков круглого сечения. За проходной доской, между аккумуляторным помещением и щитом постоянного тока, прокладываются одножильные кабели. От щита постоянного тока отходят кабели, жилы которых разной полярности объединяются в общей оболочке.

Использование одножильных кабелей, прокладываемых с про светом, препятствует возникновению короткого замыкания в цепи аккумуляторной батареи, но увеличивает индуктивность последней и соответственно увеличивает постоянную времени затухания свободной переходной составляющей тока короткого замыкания. Неблагоприятно влияет на постоянную времени свободной переходной составляющей также использование шинных проводников. В современных аккумуляторных помещениях преимущественно используются одножильные кабели, прокладываемые так, чтобы индуктивность линий была минимальной.

Активное сопротивление шин в миллиомах вычисляют исходя из удельного сопротивления материала шин, их сечения и длины по общеизвестной формуле:

$$R_{\text{ш}} = \rho \frac{l}{S} \cdot 10^3,$$

где ρ – удельное сопротивление материала шины, Ом·мм²/м, при температуре 20 °С для меди $\rho = 0,0178$ Ом·мм²/м, для алюминия $\rho = 0,03$ Ом·мм²/м;

l – полная длина шин положительной и отрицательной полярности в короткозамкнутой цепи, м;

S – сечение шины, мм².

Шины, используемые внутри шкафов щитов постоянного тока, распределительных и релейных щитов, имеют относительно большое сечение и небольшую длину, что обеспечивает им малое активное сопротивление и позволяет пренебрегать ими при расчете коротких замыканий.

Сопротивление кабельных линий постоянному току можно вычислять аналогично сопротивлению шин или на основе погонных сопротивлений. В отличие от шин, которые используются в помещениях с контролируемой температурой и благодаря большому сечению сравнительно мало нагреваются токами короткого замыкания, расчет сопротивления кабельных линий должен обязательно осуществляться с учетом температурного фактора.

В случае использования данных о погонном сопротивлении кабелей при переменном токе, приводимых в справочниках, необходимо предварительно привести их к температуре, соответствующей расчетным условиям момента, предшествующего короткому замыканию, учесть суммарную длину положительной и отрицательной жил кабельной линии и сделать поправку на отсутствие при постоянном токе поверхностного эффекта и эффекта близости. С этой целью для определения сопротивления кабелей используют формулу

$$R_{\text{кб}} = K_{\text{э}} \frac{R_{\text{пог}} l / K_{\text{эф}} + k_{\text{к.с}} R_{\text{к.с}}}{n_{\text{ц}}}, \quad (17.87)$$

где l – длина кабельной линии, м;

$K_{\text{эф}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления проводников при переменном токе, обусловленное поверхностным эффектом и эффектом близости;

$k_{\text{к.с}}$ – количество разборных контактных соединений по длине одной жилы;

$R_{\text{к.с}}$ – сопротивление одного разборного контактного соединения, мОм;

$n_{\text{ц}}$ – количество параллельных жил в линии.

В отличие от электроустановок переменного тока кабели в электроустановках постоянного тока большую часть времени не нагружены, поэтому температуру их жил до короткого замыкания можно считать равной температуре окружающей среды.

В электроустановках постоянного тока иногда используют трехжильные кабели, при этом в одном из полюсов цепи две жилы соединяют параллельно. В этом случае сопротивления разноименных полюсов цепи вычисляют отдельно и затем складывают.

Учет изменения сопротивления кабелей из-за нагрева их жил током короткого замыкания производится также как и в электроустановках переменного тока.

Устройства стабилизации напряжения. В электроустановках оперативного постоянного тока электростанций и подстанций для стабилизации напряжения в сети при зарядах и разрядах аккумуляторной батареи используются или ручные, или автоматические элементные коммутаторы и вольтодобавочные полупроводниковые конвертеры. Элементные коммутаторы обеспечивают изменение количества аккумуляторов (элементов) батареи, подключаемых к нагрузке. Учет наличия элементного коммутатора в цепи батареи обычно сводится к введению в схему замещения дополнительного сопротивления, равного 5 мОм.

Вольтодобавочные конвертеры со стороны входа подключаются параллельно батарее, а со стороны выхода включаются последовательно с ней, как показано на рис. 17.15. В нормальном режиме конвертер добавляет к напряжению батареи от 2 до 60 В, обеспечивая

стабилизацию результирующего напряжения при изменении напряжения на выводах батарей.

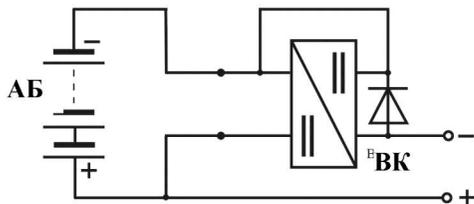


Рис. 17.15. Схема включения вольтодобавочного конвертора:

АБ – аккумуляторная батарея;
ВК – вольтодобавочный конвертор

Аналогично другим полупроводниковым преобразователям конверторы имеют быстродействующую систему ограничения выходного тока. При коротком замыкании конвертор переходит в режим ограничения тока: полярность напряжения на его выходе изменяется на противоположную, т.е. он прекращает работать в режиме вольтодобавки. Выходные зажимы конвертора зашунтированы диодом, который в нормальном режиме закрыт, а при коротком замыкании открывается и ток от батареи, минуя конвертор, напрямую попадает в короткозамкнутую цепь. Таким образом, для учета влияния конвертора на ток короткого замыкания в схему замещения включают источник ЭДС 1 В и активное сопротивление, параметры которого в омах соответствуют вольтамперной характеристике открытого полупроводникового диода (см. рис. 17.16):

$$R_{\text{конв}} = \frac{4,8}{I_{\text{ном}}}, \quad (17.88)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток конвертора, А.

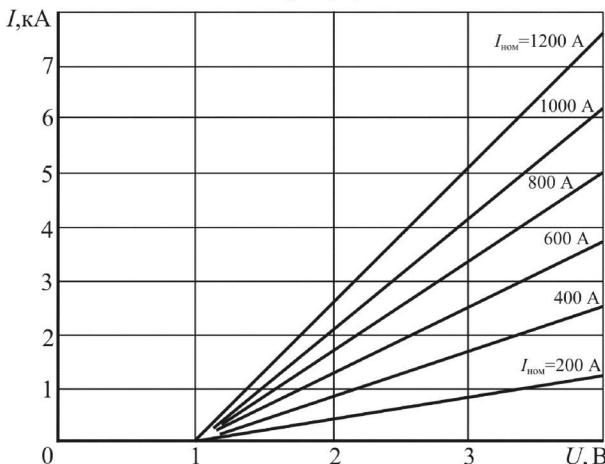


Рис. 17.16. Спрямленные вольтамперные характеристики вольтодобавочных конверторов с номинальным током от 200 до 1200 А

Коммутационные и отключающие защитные аппараты.

Внутренние сопротивления полюсов коммутационных и защитных аппаратов на постоянном токе принимаются равными активным составляющим сопротивлений аппаратов переменному току. Обычно в цепи короткого замыкания каждый аппарат представлен двумя полюсами, поэтому в однолинейных схемах замещения эквивалентное сопротивление автоматического выключателя равно $2(R_{\text{расц}} + R_{\text{к.с}})$, сопротивление рубильника – $2R_1$, сопротивление плавкого предохранителя – $2(R_{\text{вст}} + R_{\text{к.с}})$. В электроустановках с относительно большими значениями постоянной времени затухания свободной составляющей тока короткого замыкания используются четырехполюсные автоматические выключатели, у которых полюсы попарно соединяются последовательно. В этом случае сопротивление такого аппарата на схеме замещения удваивается.

Электрическая дуга. Электрическая дуга, неизбежно возникающая в месте короткого замыкания, учитывается введением в расчетную схему нелинейного активного сопротивления R_d , значение которого задается на основе усредненных экспериментальных вольт-амперных характеристик устойчиво горящей открытой дуги постоянного тока. Электрическая дуга постоянного тока, аналогично дуге переменного тока, в процессе короткого замыкания под действием электродинамических сил удлиняется и перемещается вдоль проводников короткозамкнутой цепи в направлении от аккумуляторной батареи. За счет удлинения дугового столба сопротивление электрической дуги в процессе короткого замыкания возрастает. При токе в дуге менее 350 А возможно ее самопогасание с последующим повторным загоранием или без него. В электроустановках напряжением 60 В и ниже, при постоянных времени короткозамкнутой цепи менее 100 мс, электрическая дуга обычно самоликвидируется.

Значение сопротивления R_d определяется разными способами. При расчете начальной стадии дугового короткого замыкания удобно воспользоваться эмпирической зависимостью отношения токов дугового и металлического коротких замыканий от параметров короткозамкнутой цепи. На рисунке 17.17 приведены результаты статистической обработки опытов короткого замыкания, проведенных в электроустановках оперативного постоянного тока электростанций и подстанций. Связь между током металлического короткого замыкания и током устойчивого дугового короткого замыкания отражает статистическая оценка математического ожидания отношения тока дугового короткого замыкания к току металлического короткого замыкания – коэффициент снижения тока K_c . Оценка получена для среднеквадратичных значений тока за время короткого замыкания. В качестве аргумента использовано расчетное значение сопротивления ко-

роткозамкнутой цепи R_k , выраженное в миллиомах. При численных расчетах удобно использовать аналитическую форму зависимости коэффициента снижения тока от сопротивления:

$$K_c = 0,029 \ln R_k + 0,375.$$

Эмпирическая характеристика, приведенная на рис. 17.17, получена для электроустановок оперативного постоянного тока напряжением 220 В. Пользоваться этой характеристикой для расчета коротких замыканий в электроустановках с напряжением, отличающимся от 220 В, нельзя.

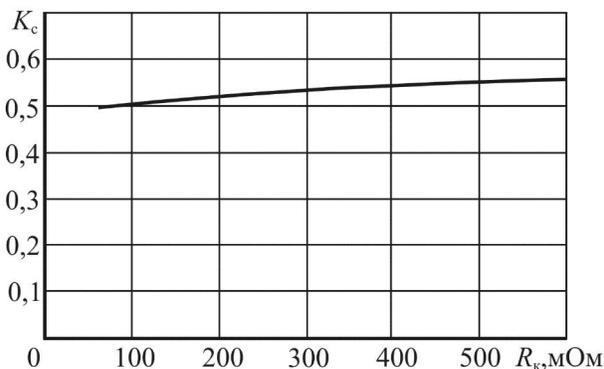


Рис. 17.17. Отношение токов дугового и металлического короткого замыкания в зависимости от сопротивления короткозамкнутой цепи

В итерационных алгоритмах расчета коротких замыканий, учитывающих одновременно нелинейность вольтамперных характеристик нескольких элементов короткозамкнутой цепи, более удобным является использование зависимости эквивалентного сопротивления дуги R_d от тока дуги I_d . На рисунке 17.18 приведена зависимость $R_d = f(I_d)$ в графической форме. Эта зависимость получена из функции $K_c = f(R_k)$ и имеет аппроксимирующую формулу:

$$R_d = 106 I_d^{-0,93}, \quad (17.89)$$

где R_d – эквивалентное сопротивление дуги, мОм;

I_d – ток дуги, кА.

С точки зрения физики процессов, происходящих в электрической дуге, выражение зависимости эквивалентного сопротивления дуги R_d от тока дуги I_d является более естественным.

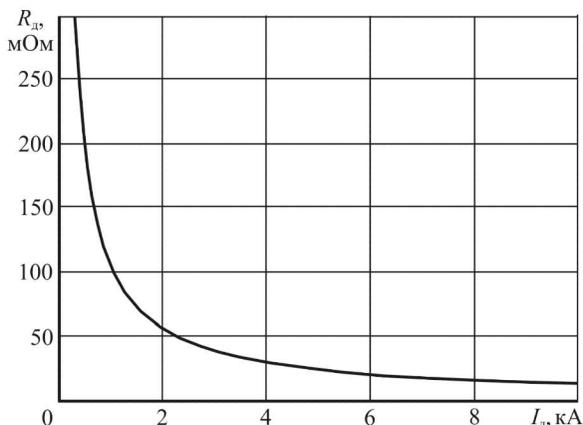


Рис. 17.18. Зависимость сопротивления электрической дуги постоянного тока от тока в дуговом столбе

17.6. Короткие замыкания в электроустановках с полупроводниковыми преобразователями

В электроустановках собственных нужд современных электростанций и подстанций широко используются различные полупроводниковые преобразователи – выпрямители, инверторы и конверторы. Наряду с традиционными тиристорными преобразователями все шире применяются преобразователи с мощными IGBT-модулями (Insulated Gate Bipolar Transistor – полевой биполярный транзистор с изолированным затвором) в качестве электронных силовых ключей. Время открытия и закрытия таких транзисторов в IGBT-модулях в десятки и сотни раз меньше, чем у тиристоров. Это позволяет эффективно использовать принципы широтно-импульсной модуляции для получения синусоидальных напряжений на выходе инверторов. Базовая частота генератора прямоугольных импульсов у современных преобразователей может быть более 100 кГц, в то время как преобразователи более старого исполнения работали с частотой в сотни герц.

В качестве примера на рис. 17.19 приведен фрагмент схемы электроустановки собственных нужд электростанции, содержащей два полупроводниковых преобразователя. Структурная схема преобразователя, питающего распределительную сеть, показана на рис. 17.20. Каждый из двух преобразователей электроустановки имеет в своем составе: конвертор постоянного напряжения, повышающий напряжение аккумуляторной батареи с 220 до 700 В; трехфазный инвертор,

выполненный на основе IGBT-модулей по шестивентильной мостовой схеме; LC-фильтр; пропорционально-интегральный регулятор (ПИР), стабилизирующий напряжение на выходе инвертора; электронное переключающее устройство (ЭПУ), подключающее нагрузку напрямую к первичной сети переменного тока при неисправности преобразователя или при его перегрузке.

При коротком замыкании в распределительной сети в начальный момент короткого замыкания происходит разряд высокочастотных конденсаторов выходного LC-фильтра преобразователя через короткозамкнутую цепь. Процесс разряда длится всего около 1 мкс, но сопровождается броском тока, превышающим амплитуду периодической составляющей тока короткого замыкания. Значение периодической составляющей тока короткого замыкания определяется не сопротивлением цепи короткого замыкания, а настройкой регулятора преобразователя. Как правило, выходной ток преобразователя ограничен значением трехкратного номинального тока. Из-за одновременности работы полюсов коммутационного аппарата, отключающего короткое замыкание, могут возникать перенапряжения. В этом случае после отключения одной фазы поврежденной цепи трехфазное короткое замыкание сначала переходит в двухфазное, а затем отключаются остальные фазы. Перенапряжение и его продолжительность зависят от степени совершенства системы регулирования преобразователя. С точки зрения переходных процессов предпочтительны преобразователи с высокой базовой частотой и быстродействующими цифровыми регуляторами.

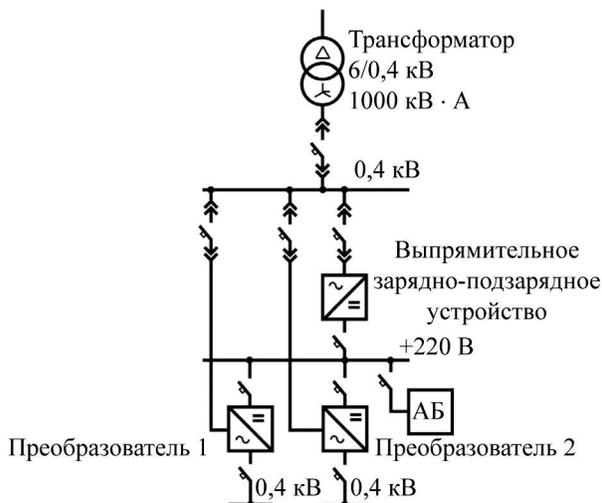


Рис. 17.19. Фрагмент принципиальной схемы электроустановки собственных нужд электростанции

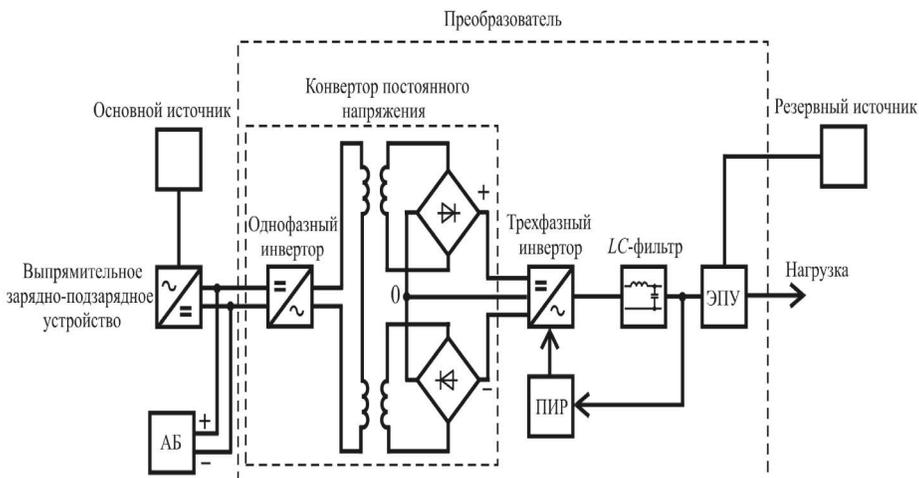


Рис. 17.20. Структурная схема преобразователя

Полупроводниковые преобразователи очень чувствительны к перегрузкам по току, так как их полупроводниковые элементы быстро перегреваются и выходят из строя. Из-за этого уставку ограничения выходного тока принимают такой, чтобы кратность выходного тока по отношению к номинальному току преобразователя была небольшой (обычно от 2,5 до 4). Практически у всех полупроводниковых преобразователей дополнительно имеется и ограничение продолжительности перегрузки: при перегрузках продолжительностью более 100 – 300 мс срабатывает система внутренней защиты преобразователя и он отключается.

Для повышения надежности электроснабжения нагрузок одновременно с отключением преобразователя может быть обеспечено электронное подключение выходных цепей преобразователя к первичному рабочему или резервному источнику переменного тока.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

РАСЧЕТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА КОМПЬЮТЕРЕ

18.1. Общие положения

Расчеты коротких замыканий сложны, их ручной расчет требует больших затрат времени и сопряжен с большой вероятностью совершения ошибок. Расчет коротких замыканий в схемах, содержащих несколько десятков элементов, раньше приходилось выполнять на специальных расчетных столах постоянного тока, а в схемах с числом элементов, исчисляемых сотнями и тысячами, стал возможным лишь после появления цифровых вычислительных машин.

Первоначально расчеты коротких замыканий в высоковольтных сетях в большинстве случаев выполнялись по упрощенной методике, в частности, без учета активных сопротивлений элементов. Даже после разработки нового поколения программ, позволяющих учитывать при расчетах активные сопротивления и другие факторы, оказывающие влияние на ток короткого замыкания, их возможности первоначально в полной мере фактически не использовались из-за резкого возрастания затрат времени на параметризацию расчетных схем. Из опыта известно, что параметризация схемы сетей крупной энергосистемы может занять несколько лет.

Сложность расчета коротких замыканий в высоковольтных сетях обусловлена в первую очередь большим количеством элементов, что приводит к необходимости формировать и решать системы линейных алгебраических уравнений большого порядка. Но и расчет коротких замыканий в электроустановках до 1 кВ, где число элементов, включаемых в расчетную схему, редко превышает сто единиц, сопряжен со сложностями, что обусловлено нелинейным характером сопротивлений элементов схемы, а также необходимостью формировать и решать систему нелинейных алгебраических уравнений. Нелинейный характер проявляют в основном активные составляющие сопротивлений. В высоковольт-

ных электроустановках активные сопротивления также нелинейные, но благодаря тому, что значения индуктивных составляющих сопротивлений превышают значения их активных составляющих этот фактор не оказывает существенного влияния на результаты расчетов. Иногда возникает необходимость учета нелинейного характера и индуктивных сопротивлений, например, при расчете сопротивлений нулевой последовательности трехжильных кабелей, проложенных вблизи магнитнонасыщающихся металлоконструкций.

При расчете коротких замыканий в электроустановках до 1 кВ приходится учитывать зависимость активных сопротивлений от внешних факторов, таких как температура окружающей среды, степень окисления разборных контактов. Индуктивная составляющая сопротивлений как в высоковольтных, так и в низковольтных электроустановках, в отличие от активной, более консервативна, она меньше зависит от внешних факторов. Особенностью расчетов токов короткого замыкания в электроустановках до 1 кВ является также необходимость учета не только электромагнитных, но и электромеханических, электродинамических и термодинамических процессов.

В настоящее время для расчета коротких замыканий широко используются компьютерные программы, разработанные на кафедре «Электрические станции» Московского энергетического института: *GuFaults*, *GuExpert*, *GuDCSets* и *GuTestAC*. Эти программы используют методики расчета, рекомендованные действующими отечественными и международными стандартами. Программы применяются в большинстве отечественных проектных институтов и во многих организациях, занимающихся наладкой и эксплуатацией действующих электроустановок. Более чем десятилетний опыт сопровождения вышеупомянутых программ позволил добиться их высокой надежности и создать удобный пользователям интерфейс.

18.2. Комплексный учет различных факторов, влияющих на ток короткого замыкания

Расчет коротких замыканий в электроустановках переменного тока на компьютере выполняется, как правило, в именованных единицах с использованием комплексных значений электрических величин: сопротивлений, напряжений и токов.

Математическая модель электроустановки формируется на основе системы уравнений узловых потенциалов. При формировании

матрицы узловых проводимостей учитываются и задаваемые при вводе исходных данных коэффициенты трансформации трансформаторов. Последние для трехфазных трансформаторов внутри программ представляются в виде комплексных чисел. Модуль коэффициента трансформации определяется по заданным напряжениям обмоток, а аргумент комплексного коэффициента трансформации определяется схемой соединения обмоток и позволяет учесть сдвиг фазы между первичным и вторичным напряжениями. ЭДС генераторов, синхронных компенсаторов и двигателей также имеют комплексный характер, что позволяет учесть их несинфазность.

Учет большого числа факторов, влияющих на параметры процесса короткого замыкания, осуществляется путем итерационного приближения решения системы узловых уравнений к решению, учитывающему влияние температуры проводников на их активное сопротивление, зависимость сопротивления электрической дуги от тока короткого замыкания, зависимость тока асинхронных двигателей и синхронных машин от продолжительности короткого замыкания (рис. 18.1).

Ниже приведены основные математические выражения, используемые при расчете ЭДС и сопротивлений элементов электрических схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Размерность величин, используемых в расчете, соответствует принятой в программе *GuTestAC*: ом, килоампер, киловольт, мегавольтампер (мегаватт). Справочные данные по сопротивлениям элементов электроустановок до 1 кВ задаются в миллиомах.

Исходные данные для расчета параметров двухобмоточных трехфазных трансформаторов:

$S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, МВ·А;

$U_{\text{В}}$ – напряжение обмотки высшего напряжения, кВ;

$U_{\text{Н}}$ – напряжение обмотки низшего напряжения, кВ;

$u_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$\Delta P_{\text{к}}$ – мощность потерь короткого замыкания, кВт;

X_0 – индуктивное сопротивление нулевой последовательности,

мОм;

R_0 – активное сопротивление нулевой последовательности, мОм;

схема соединения обмоток (например, Y_0/Δ).

Сопротивления трансформатора, приведенные к напряжению обмотки высшего напряжения, определяются по формуле:

$$R_1 = R_2 = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{В}}^2}{1000 S_{\text{ном}}^2}; \quad (18.1)$$

$$X_1 = X_2 = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{к}}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{\text{к}}}{1000 \cdot S_{\text{ном}}}\right)^2} \frac{U_{\text{В}}^2}{S_{\text{ном}}}. \quad (18.2)$$

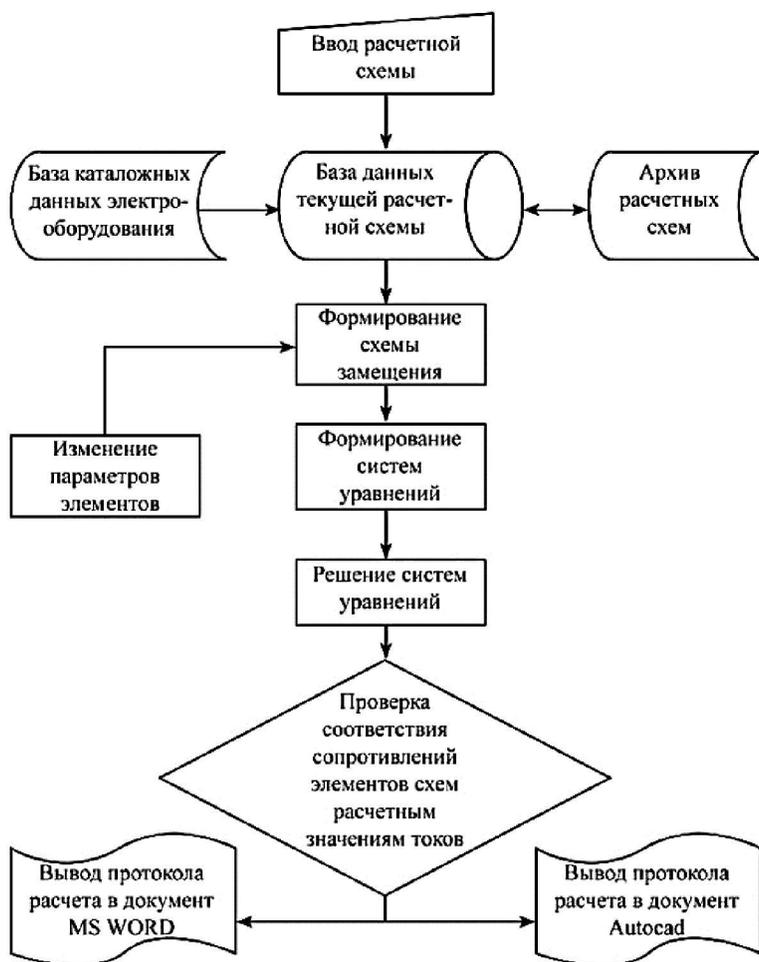


Рис. 18.1. Блок-схема алгоритма работы программ расчета токов короткого замыкания

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с обмоткой, соединенной в треугольник, и трансформаторов с броневой конструкцией магнитопроводов считаются равными таким же сопротивлениям прямой последовательности. Если магнитопровод трехфазного трансформатора имеет трехстержневую конструкцию и его обмотки соединены по схеме «звезда – звезда с нулем», то параметры нулевой последовательности должны быть заданы отдельно. Обычно необходимость отдельно задавать параметры нулевой последовательности возникает при использова-

нии трансформаторов, питающих низковольтные электроустановки. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с обмотками «звезда - звезда с нулем» рекомендуется определять опытным путем. Значения сопротивлений таких трансформаторов, приводимые в справочниках, могут значительно отличаться от параметров конкретного трансформатора.

Комплексный коэффициент трансформации напряжений прямой последовательности для трансформаторов с обмотками «звезда-треугольник» рассчитывается в предположении 11-ой группы соединения:

$$\underline{K}_{1B-H} = \frac{U_B}{U_H} \left[\cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot 11\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{6} \cdot 11\right) \right]. \quad (18.3)$$

Коэффициент трансформации напряжений обратной последовательности равен сопряженному значению \underline{K}_{1B-H} . При соединении обмоток по схемам «звезда-звезда» или «треугольник-треугольник» группа соединения принимается нулевой, поэтому коэффициент трансформации имеет нулевое значение мнимой части.

Исходные данные для расчета параметров трехфазных автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов таковы:

$S_{ном}$ – номинальная мощность, МВ·А;

U_B – напряжение обмотки высшего напряжения, кВ;

U_C – напряжение обмотки среднего напряжения, кВ;

U_H – напряжение обмотки низшего напряжения, кВ;

$u_{кВ-С}$ – напряжение короткого замыкания обмоток высшего-среднего напряжения, %;

$u_{кВ-Н}$ – напряжение короткого замыкания обмоток высшего-низшего напряжения, %;

$u_{кС-Н}$ – напряжение короткого замыкания обмоток среднего-низшего напряжения, %;

$\Delta P_{кВ-С}$ – мощность потерь короткого замыкания в обмотках высшего-среднего напряжения, кВт;

схема соединения обмоток (например, $Y_0/Y_0/\Delta$).

Расчет параметров автотрансформаторов и трехобмоточных трансформаторов производится для схемы замещения в виде звезды. Отношения активных составляющих сопротивлений к полным сопротивлениям для всех ветвей схемы замещения трехобмоточного трансформатора предполагаются одинаковыми:

$$\frac{R}{Z} = \frac{0,1 \Delta P_{кВ-С}}{u_{кВ-С} S_{ном}}. \quad (18.4)$$

Исходя из этого сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей ветвей схемы замещения, приведенные к стороне высшего напряжения, составляют:

$$X_{B1} = X_{B2} = X_{B0} = \frac{u_{кВ-Н} + u_{кВ-С} - u_{кС-Н}}{200} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{Z}\right)^2} \frac{U_B^2}{S_{НОМ}}; \quad (18.5)$$

$$X_{C1} = X_{C2} = X_{C0} = \frac{u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н}}{200} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{Z}\right)^2} \frac{U_B^2}{S_{НОМ}}; \quad (18.6)$$

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{H0} = \frac{u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С}}{200} \sqrt{1 - \left(\frac{R}{Z}\right)^2} \frac{U_B^2}{S_{НОМ}}; \quad (18.7)$$

$$R_{B1} = R_{B2} = R_{B0} = \frac{X_{B1}}{\sqrt{\left(\frac{Z}{R}\right)^2 - 1}}; \quad (18.8)$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_{C0} = \frac{X_{C1}}{\sqrt{\left(\frac{Z}{R}\right)^2 - 1}}; \quad (18.9)$$

$$R_{H1} = R_{H2} = R_{H0} = \frac{X_{H1}}{\sqrt{\left(\frac{Z}{R}\right)^2 - 1}}. \quad (18.10)$$

В некоторых случаях индуктивное и активное сопротивления ветви, соответствующей обмотке среднего напряжения, могут быть отрицательными. Учет схем соединения обмоток трансформатора, с точки зрения токораспределения токов нулевой последовательности, обеспечивается путем изменения топологии схемы нулевой последовательности: со стороны обмоток, соединенных по схеме звезды без вывода нейтрали, создается разрыв, а выводы обмоток, соединенных в треугольник, «заземляются».

В схеме замещения трехобмоточных трансформаторов имеются два идеальных трансформатора. Комплексные коэффициенты трансформации идеальных трансформаторов определяются так же, как и обычных двухобмоточных трехфазных трансформаторов.

Исходные данные для расчета параметров системы относительно соответствующего узла:

$U_{ср.ном}$ – среднее номинальное напряжение узла системы, кВ;

$U_{* (0)}$ – напряжение узла системы в предшествующем режиме, отн.ед.;

$I_k^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания от системы, кА;
 $K_{уд}$ – ударный коэффициент тока короткого замыкания от системы;
 $I_k^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания от системы, кА;
 $I_k^{(1)}$ – ток однофазного короткого замыкания от системы, кА.

При этом расчетные ЭДС и сопротивления определяются по формулам:

$$E_\Phi = \frac{U_{* (0)} U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}}; \quad (18.11)$$

$$X_1 = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_k^{(3)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln(K_{уд} - 1)}{\pi}\right)^2}}; \quad (18.12)$$

$$R_1 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_k^{(3)}}\right)^2 - X_1^2}; \quad (18.13)$$

$$X_2 = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{I_k^{(2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln(K_{уд} - 1)}{\pi}\right)^2}} - X_1; \quad (18.14)$$

$$R_2 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ср.ном}}}{I_k^{(2)}}\right)^2 - (X_1 + X_2)^2 - R_1}; \quad (18.15)$$

$$X_0 = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}{I_k^{(1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln(K_{уд} - 1)}{\pi}\right)^2}} - X_1 - X_2; \quad (18.16)$$

$$R_0 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}{I_k^{(1)}}\right)^2 - (X_1 + X_2 + X_0)^2 - R_1 - R_2}. \quad (18.17)$$

При расчете сопротивлений обратной и нулевой последовательности системы по значениям токов короткого замыкания считается, что отношения индуктивных и активных сопротивлений всех последовательностей одинаковые. В противном случае используется альтернативный набор исходных данных с непосредственным вводом внутренних сопротивлений элементов системы.

Исходные данные для расчета параметров синхронного генератора:

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность, МВт;
 $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ;
 $\cos\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности;
 $X_{*d(\text{ном})}''$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление по

продольной оси, отн.ед.;

$X_{*2(\text{ном})}$ – сопротивление обратной последовательности, отн.ед.;

$T_a^{(3)}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей при трехфазном коротком замыкании на выводах, с;

$P_{*(0)}$ – мощность в предшествующем режиме, отн.ед.;

$\cos\varphi_{(0)}$ – коэффициент мощности в предшествующем режиме;

X_0 – индуктивное сопротивление нулевой последовательности, мОм;

R_0 – активное сопротивление нулевой последовательности, мОм.

Индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей вычисляются по формулам (17.14) и (17.15), активные сопротивления прямой и обратной последовательностей по формуле (17.16).

Для генераторов напряжением до 1 кВ, работающих в сетях с заземленной нейтралью, в исходных данных должны быть указаны сопротивления нулевой последовательности.

Модуль фазной ЭДС генератора вычисляется с учетом параметров предшествующего режима по формуле (17.17).

Начальная фаза ЭДС определяется по результатам расчета предшествующего режима. Угол между векторами ЭДС генератора и напряжения системы зависит от группы соединения обмоток трансформаторов, включенных между ними, и мощности, выдаваемой генератором в систему. По результатам расчета предшествующего режима уточняется модуль ЭДС генератора. Такой подход к расчету коротких замыканий позволяет учесть несинфазность активных элементов расчетной схемы.

Исходные данные для расчета параметров асинхронного двигателя:

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность (механическая на валу), кВт;

$U_{\text{ном}}$ – напряжение номинальное, кВ;

$\cos\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности;

$s_{\text{ном}}$ – скольжение номинальное, %;

$I_{*\text{п}}$ – кратность пускового тока, отн.ед.;

$b_{\text{ном}}$ – кратность максимального момента, отн.ед.;

$M_{*\text{п}}$ – кратность пускового момента, отн.ед.;

$\eta_{\text{ном}}$ – коэффициент полезного действия, %;

$P_{* (0)}$ – мощность механическая в предшествующем режиме, отн.ед.;

$\cos\varphi_{(0)}$ – коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Сопротивления прямой последовательности двигателей с номинальным напряжением свыше 1 кВ определяют по формулам:

$$R_1 = \left[\frac{s_{\text{НОМ}}}{100} + \frac{s_{\text{НОМ}} \left(b_{\text{НОМ}} + \sqrt{b_{\text{НОМ}}^2 - 1} \right)}{100 I_{* \text{ П}}} \right] \times \quad (18.18)$$

$$\times \frac{10U_{\text{НОМ}}^2 \eta_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}};$$

$$X_1 = \left[\frac{1}{I_{* \text{ П}}} + \frac{\left(\frac{2b_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{(1 - 0,01s_{\text{НОМ}}) I_{* \text{ П}}} - 1 \right)^2}{\sin\varphi_{\text{НОМ}} - \frac{\cos\varphi_{\text{НОМ}}}{b_{\text{НОМ}} + \sqrt{b_{\text{НОМ}}^2 - 1}}} \right] \times \quad (18.19)$$

$$\times \frac{10U_{\text{НОМ}}^2 \eta_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}};$$

Активное сопротивление прямой последовательности двигателей с номинальным напряжением до 1 кВ определяют по формуле (17.60), а индуктивное сопротивление прямой последовательности – по формуле (17.61).

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС двигателя определяется из расчета предшествующего режима по формуле (17.62).

Исходные данные для расчета параметров синхронного двигателя:

$P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность (механическая на валу), кВт;

$U_{\text{НОМ}}$ – напряжение номинальное, кВ;

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, электрическая полная, кВ·А;

$\eta_{\text{НОМ}}$ – коэффициент полезного действия, %;

$I_{* \text{ П}}$ – кратность пускового тока, отн.ед.;

$M_{* 0,05}$ – кратность момента при скольжении 5%, отн.ед.;

$P_{* (0)}$ – мощность механическая в предшествующем режиме, отн.ед.;

$\cos\varphi_{(0)}$ – коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности синхронного электродвигателя определяют по формулам (17.57) и (17.58).

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС двигателя определяется по формуле (17.59).

Если известны сверхпереходные сопротивления, используется альтернативный метод расчета параметров синхронного двигателя, аналогичный методу расчета параметров синхронного генератора.

Исходные данные для расчета параметров синхронного компенсатора:

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, полная, МВ·А;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ;

$X_{*d(\text{НОМ})}''$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, отн.ед.;

$X_{*q(\text{НОМ})}''$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси, отн.ед.;

$T_a^{(3)}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах, с;

$Q_{*}^{(0)}$ – мощность в предшествующем режиме, отн.ед.

При этом X_1 , X_2 и R_1 определяют по формулам:

$$X_1 = X_{*d(\text{НОМ})}'' \frac{1000U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}; \quad (18.20)$$

$$X_2 = \sqrt{X_{*d(\text{НОМ})}'' + X_{*q(\text{НОМ})}''} \frac{1000U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}; \quad (18.21)$$

$$R_1 = \frac{X_2}{100\pi T_a^{(3)}}. \quad (18.22)$$

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС компенсатора определяется из расчета предшествующего режима. Расчет выполняется методом последовательных приближений. Значение ЭДС для первой итерации вычисляется по следующей формуле

$$\dot{E}_\phi = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} - (R_1 + jX_1) \frac{j100 \cdot S_{\text{НОМ}} Q_{*}^{(0)}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}}. \quad (18.23)$$

Исходные данные для расчета параметров комплексной нагрузки:

$S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность, полная, МВ·А;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение, кВ;

$I_{*п}$ – кратность пускового тока эквивалентного двигателя,
отн.ед.;

η – коэффициент полезного действия эквивалентного двигателя, %;

$T_a^{(3)}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах, с;

$T_{п}$ – постоянная времени затухания периодической составляющей тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах, с.

Входное сопротивление эквивалентного двигателя при номинальной нагрузке $Z_{ном}$ определяется по формуле

$$Z_{ном} = 1000 \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}, \quad (18.24)$$

а активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности по формулам:

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{(100\pi T_{п})^2 + \left(0,96 + \frac{T_{п}}{T_a^{(3)}}\right)^2}} \left(0,96 + \frac{T_{п}}{T_a^{(3)}}\right) Z_{ном}; \quad (18.25)$$

$$X_1 = 100\pi T_{п} \cdot \frac{1}{\sqrt{(100\pi T_{п})^2 + \left(0,96 + \frac{T_{п}}{T_a^{(3)}}\right)^2}} Z_{ном}. \quad (18.26)$$

Начальное значение ЭДС комплексной нагрузки можно определить по формуле

$$E = \left(1 - \frac{1}{I_{*п}}\right) \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}}. \quad (18.27)$$

Исходные данные для расчета параметров воздушной линии электропередачи:

$R_{пог1}$ – погонное активное сопротивление прямой последовательности, Ом/км;

$X_{пог1}$ – погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км;

$R_{пог0}$ – погонное активное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км;

$X_{пог0}$ – погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км;

l – длина линии, км;

$n_{ц}$ – количество параллельных цепей в линии.

При этом индуктивные и активные сопротивления разных последовательностей определяются по формулам:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{\text{пог1}}L}{n_{\text{ц}}}; \quad (18.28)$$

$$X_0 = \frac{X_{\text{пог0}}L}{n_{\text{ц}}}; \quad (18.29)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{\text{пог1}}L}{n_{\text{ц}}}; \quad (18.30)$$

$$R_0 = \frac{R_{\text{пог0}}L}{n_{\text{ц}}}. \quad (18.31)$$

Исходные данные для расчета параметров кабельной линии электропередачи:

$R_{\text{пог1}}$ – погонное активное сопротивление прямой последовательности при 20 °С, Ом/км;

$X_{\text{пог1}}$ – погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км;

$R_{\text{пог0}}$ – погонное активное сопротивление нулевой последовательности при 20 °С, Ом/км;

$X_{\text{пог0}}$ – погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км;

L – длина линии, км;

$n_{\text{ц}}$ – количество параллельных кабелей в линии;

$\vartheta_{\text{доп.прод}}$ – допустимая температура продолжительного режима, °С;

$\vartheta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$\vartheta_{\text{окр.норм}}$ – температура окружающей среды, нормированная, °С;

$\vartheta_{\text{ус}}$ – условная температура, равная 234 °С для меди и 236 °С для алюминия;

K_3 – коэффициент загрузки кабеля, равный отношению тока в предшествующем режиме к допустимому току продолжительного режима, отн.ед.;

$k_{\text{кс}}$ – количество разборных контактных соединений по длине одной жилы;

$R_{\text{кс}}$ – сопротивление одного разборного контактного соединения, мОм.

При этом X_1 и X_2 определяются по формуле (17.27), X_0 – по формуле (17.28), а активные сопротивления по формулам:

$$R_1 = R_2 = \left(\frac{R_{\text{пог1}}L}{n_{\text{ц}}} + \frac{k_{\text{кс}}R_{\text{кс}}}{n_{\text{ц}}} \right) \frac{\vartheta_{\text{ус}} + K_3^2 (\vartheta_{\text{доп.прод}} - \vartheta_{\text{окр.норм}}) + \vartheta_{\text{окр}}}{\vartheta_{\text{ус}} + 20}; \quad (18.32)$$

$$R_0 = \left(\frac{R_{\text{пор}0} L}{n_{\text{ц}}} + \frac{k_{\text{кв}} R_{\text{кв}}}{n_{\text{ц}}} \right) \frac{\mathfrak{S}_{\text{ус}} + K^2 (\mathfrak{S}_{\text{доп.прод}} - \mathfrak{S}_{\text{окр.норм}}) + \mathfrak{S}_{\text{окр.}}}{\mathfrak{S}_{\text{ус}} + 20}. \quad (18.33)$$

Исходные данные для расчета параметров одиночных токоограничивающих реакторов:

$I_{\text{ном}}$ – ток номинальный, А;

X_{RL} – сопротивление индуктивное номинальное, Ом;

ΔP – потери мощности на фазу при номинальном токе, кВт.

При этом

$$X_1 = X_2 = X_0 = X_{RL}; \quad (18.34)$$

$$R_1 = R_2 = R_0 = \frac{1000 \Delta P}{I_{\text{ном}}^2}. \quad (18.35)$$

Исходные данные для расчета параметров двоянных токоограничивающих реакторов:

$I_{\text{ном}}$ – ток номинальный, А;

X_{RL} – сопротивление индуктивное номинальное, Ом;

ΔP – потери мощности на фазу при номинальном токе, кВт;

$K_{\text{св}}$ – коэффициент связи номинальный.

Сопротивления общей входной ветви определяются по формулам:

$$X_1 = X_2 = X_0 = -K_{\text{св}} X_{RL}; \quad (18.36)$$

$$R_1 = \frac{500 \Delta P}{I_{\text{ном}}^2} \left(\frac{-K_{\text{св}}}{1 - K_{\text{св}}} \right), \quad (18.37)$$

а сопротивления выходных ветвей:

$$X_1 = X_2 = X_0 = (1 + K_{\text{св}}) X_{RL}; \quad (18.38)$$

$$R_1 = \frac{500 \Delta P}{I_{\text{ном}}^2} \left(\frac{1 + K_{\text{св}}}{1 - K_{\text{св}}} \right). \quad (18.39)$$

18.3. Программы *GuFaults*, *GuExpert*, *GuDCSets* и *GuTestAC*

Программа *GuFaults*, фрагмент интерфейса которой представлен на рис. 18.2, предназначена для расчета коротких замыканий в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Используемая программой методика расчетов соответствует рекомендациям национального стандарта РФ ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ». Программа рассчи-

тывает периодическую и аperiodическую составляющие токов, напряжения, температуру кабелей при симметричных и несимметричных коротких замыканиях. Она имеет графический интерфейс для ввода расчетных схем. Схема замещения, соответствующая исходной расчетной схеме формируется автоматически.

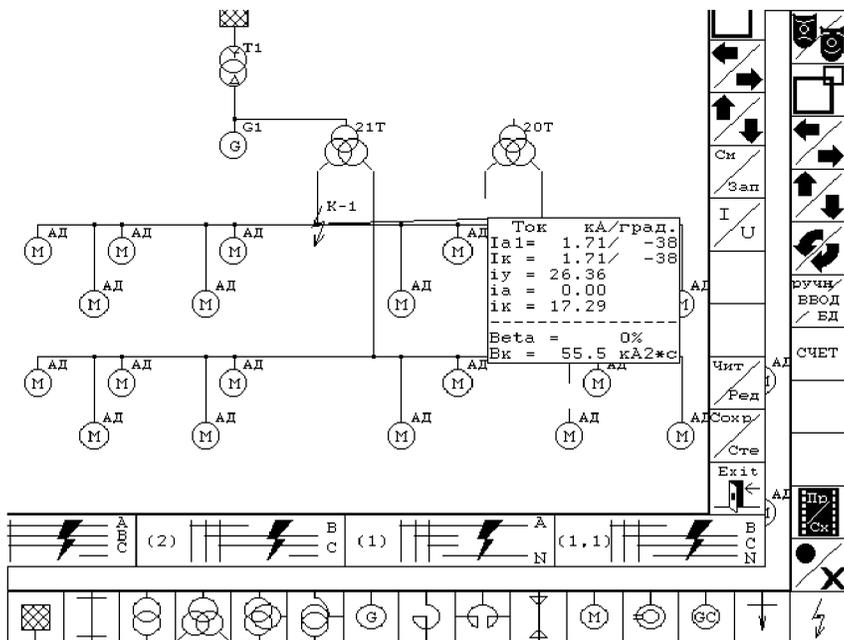


Рис. 18.2. Фрагмент интерфейса программы *GuFaults*

Графический интерфейс имеет окно ввода расчетной схемы (справа и внизу) и окно вывода результатов расчета (слева иверху). В пиктографическом меню программы имеются следующие элементы: примыкающая энергосистема, воздушная линия электропередачи, двухобмоточный трехфазный трансформатор, трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения, трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор, генератор, одинарный и двоянный токоограничивающие реакторы, кабельная линия, асинхронный и синхронный двигатели, синхронный компенсатор, комплексная нагрузка, символ короткого замыкания.

Программа *GuExpert*, фрагмент интерфейса которой представлен на рис. 18.3, предназначена для расчета коротких замыканий в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. Используемая программой методика расчетов соответствует рекомендациям ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы

расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ». Дополнительно в программе учтены рекомендации ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88) «Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева». Программа рассчитывает токи, напряжения, температуру кабелей при симметричных и несимметричных металлических и дуговых коротких замыканиях с учетом затухающей подпитки от асинхронных двигателей, имеет графический интерфейс для ввода расчетных схем и открытую базу каталожных данных. Схема замещения исходной расчетной схемы формируется автоматически.

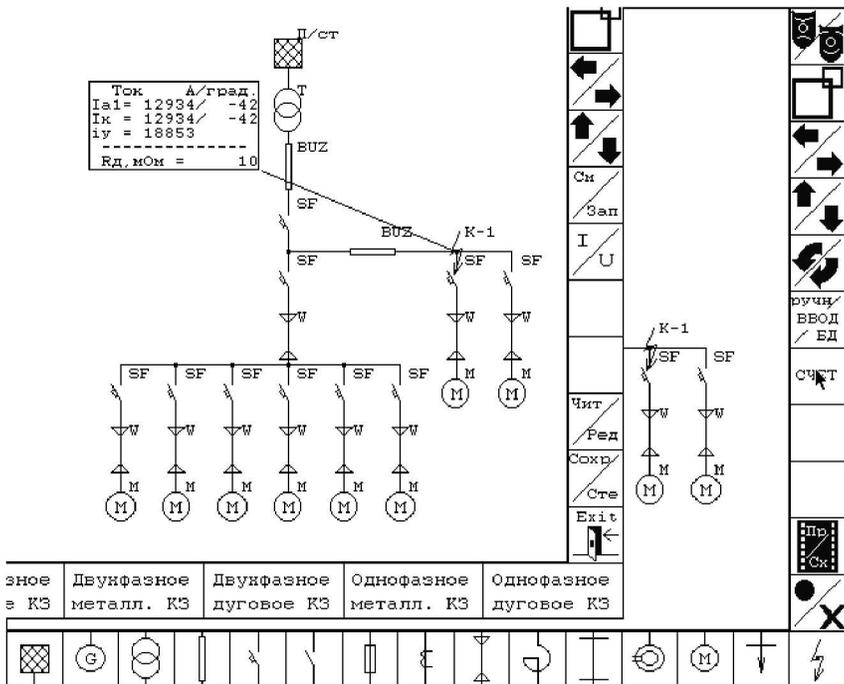


Рис. 18.3. Фрагмент интерфейса программы *GuExpert*

Графический интерфейс имеет окно ввода расчетной схемы (справа и внизу) и окно вывода результатов расчета (слева и вверху). В пиктографическом меню программы имеются следующие элементы: внешний источник питания, трехфазный генератор, двухобмоточный трехфазный трансформатор, шинная конструкция, автоматический выключатель, рубильник, плавкий предохранитель, трансформатор тока, кабельная линия, токоограничивающий реактор, воздушная линия электропередачи, синхронный и асинхронный двигатели, комплексная нагрузка, символ короткого замыкания.

Программа *GuDCSets*, фрагмент интерфейса которой представлен на рис. 18.4, предназначена для расчета коротких замыканий в электроустановках постоянного тока с аккумуляторными батареями напряжением 24 – 220 В. Используемая программой методика расчетов соответствует рекомендациям ГОСТ 29176-91 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках постоянного тока». Программа рассчитывает токи, напряжения, температуру кабелей при металлических и дуговых коротких замыканиях, имеет графический интерфейс для ввода расчетных схем и открытую базу каталожных данных. Схема замещения по исходной расчетной схеме формируется автоматически.

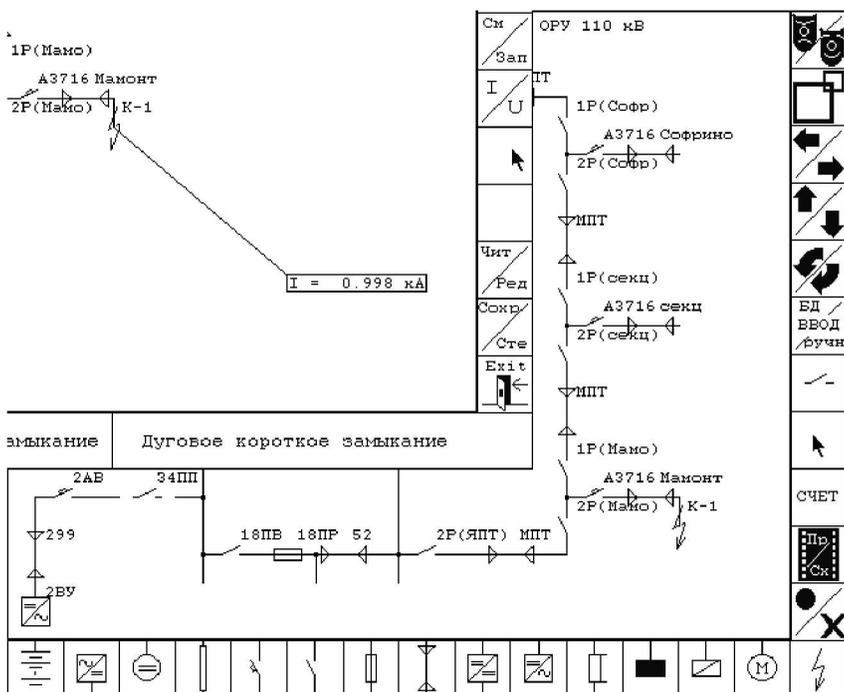


Рис. 18.4. Фрагмент интерфейса программы *GuDCSets*

Графический интерфейс имеет окно ввода расчетной схемы (справа и внизу) и окно вывода результатов расчета (слева и вверху). В пиктографическом меню программы имеются следующие элементы: аккумуляторная батарея, прямо-подзарядный агрегат, генератор постоянного тока, шинная конструкция, автоматический выключатель, рубильник, плавкий предохранитель, кабельная линия, вольтдобавочное устройство стабилизации напряжения постоянного тока, инвертор, токоизмерительный шунт, щитки аварийного и рабочего

освещения, двигатель постоянного тока, символ короткого замыкания.

Программа *GuTestAC* объединяет функциональные возможности программ *GuFaults* и *GuExpert*. В отличие от последних она может использоваться на компьютерах не только с операционными системами MS Windows 95/98/Me, но и на компьютерах с операционными системами MS Windows 2000/XP и более поздних выпусков.

Все вышеуказанные программы дают возможность автоматизировать решение задач, связанных с выбором и проверкой проводников, коммутационных аппаратов и другого электрооборудования по условиям короткого замыкания. Они позволяют в широких пределах варьировать расчетные условия, чем обеспечивается возможность получения как максимально возможных значений токов короткого замыкания, так и расчетных значений токов для выбора уставок релейной защиты и защитных аппаратов.

Математическая модель электроустановок, используемая в программах, разработана на основе системы узловых уравнений, что позволяет выполнять расчеты для схем любой конфигурации – радиальных и сложнзамкнутых.

В качестве результатов расчета короткого замыкания в электроустановках переменного тока программы позволяют получить для начального момента короткого замыкания и к моменту его отключения:

- ▶ действующее значение и начальную фазу периодической составляющей тока симметричного и несимметричных коротких замыканиях в точке короткого замыкания и в любом элементе расчетной схемы;
- ▶ значение аperiodической составляющей и ударного тока в точке короткого замыкания и в любом элементе расчетной схемы;
- ▶ действующее значение и начальную фазу симметричных составляющих напряжения во всех узлах расчетной схемы;
- ▶ начальную и конечную температуру нагрева кабелей.

Программа *GuDCSets* рассчитывает аналогичные параметры для начального и конечного моментов короткого замыкания в электроустановках постоянного тока.

Все рассматриваемые программы имеют похожие друг на друга интерфейсы пользователя, что снижает затраты времени на освоение программ и восстановление навыков работы с ними после длительных перерывов. Интерфейс программы *GuTestAC* максимально приближен к нормам взаимодействия пользователя с программами пакета MS Office фирмы Microsoft.

Для формирования расчетной схемы используется набор графических символов, соответствующих общепринятым условным графическим обозначениям элементов однолинейных электрических

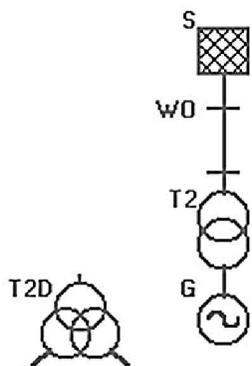
схем трехфазных цепей (рис. 18.5, слева направо): энергосистема, воздушная линия электропередачи, двухобмоточный трансформатор, трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения, трехобмоточный трансформатор, автотрансформатор, генератор, асинхронный двигатель, синхронный двигатель, синхронный компенсатор, одинарный реактор, сдвоенный реактор, кабельная линия, комплексная нагрузка, высоковольтный выключатель, рубильник, шинопровод, автоматический выключатель, плавкий предохранитель, трансформатор тока, узел короткого замыкания, линия эквипотенциального электрического соединения, узел пересекающихся эквипотенциальных соединений.



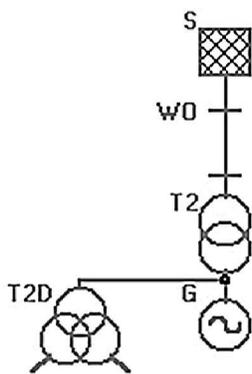
Рис. 18.5. Фрагмент интерфейса программы *GuTestAC* – графическое меню, предназначенное для формирования расчетной схемы

Окно программы, отображаемое на дисплее компьютера, является виртуальным наборным полем, предназначенным для размещения элементов исходной расчетной электрической схемы. Наборное поле поделено на клетки с шагом, равным половине габарита одного графического элемента. Границы клеток могут по желанию пользователя отображаться на наборном поле в виде точек или линий. Для вставки элемента в расчетную схему пользователь выделяет нужный элемент в графическом меню и щелчком мыши указывает одну или несколько клеток на наборном поле. В ответ на каждый щелчок мыши на схеме появляется новый элемент (рис. 18.6). Вставляемые элементы идентифицируются надписями, предусмотренными по умолчанию каждому типу элемента. Графический символ первоначально отображается серыми линиями, после параметризации линии становятся черными.

Элементы схемы, выводы которых соприкасаются, программа считает электрически соединенными. Для соединения не соприкасающихся выводов элементов должны использоваться идеальные проводники – эквипотенциальные соединительные линии. После выделения в графическом меню кнопки с обозначением эквипотенциальной линии на расчетной схеме создается соединение между двумя узлами расчетной схемы. Оно создается при удерживании в нажатом состоянии левой клавиши мыши и перемещении графического курсора от одного узла к другому (рис. 18.7). Одна эквипотенциальная линия может соединить только одну пару узлов. Для соединения выводов нескольких элементов в один узел следует использовать несколько эквипотенциальных соединительных линий.



**Рис. 18.6. Начальный этап формирования расчетной схемы.
Вставка графических элементов**



**Рис. 18.7. Формирование расчетной схемы.
Вставка эквипотенциальных соединительных линий**

Символы электрического соединения трех и более ветвей схемы в одной точке программа создает автоматически. После удаления ветвей символы соединения автоматически удаляются.

Параметризовать элементы расчетной схемы можно сразу после вставки соответствующего графического символа или после завершения формирования топологии всей схемы. Учитывая, что обычно на расчетной схеме имеется несколько элементов с полностью или частично совпадающими параметрами, для снижения затрат времени на подготовку расчетной схемы имеет смысл задать параметры одной группе элементов и затем вставлять в расчетную схему их уже параметризованные копии.

Для параметризации элементов в графическом меню программы активизируется кнопка



Выбор параметризуемого элемента производится щелчком по его изображению. Появляется окно с перечнем параметров и их значениями, заданными по умолчанию (рис. 18.8). Элемент расчетной схемы может получить параметры, предлагаемые в окне. Для этого достаточно щелкнуть мышью по кнопке «Да». Значение любого параметра можно изменить с помощью клавиатуры компьютера, можно послать запрос на поиск информации в базе данных. Поиск в базе данных будет осуществляться в соответствии с параметрами запроса, заданными в выделенных утолщенным шрифтом полях окна. Применительно к трансформаторам параметром запроса является номинальное напряжение трансформатора.

| Трансформатор | |
|--|------|
| Имя | T2 |
| Тип | ТДЦ |
| Сном,МВА | 125 |
| Uв,кВ | 242 |
| Un,кВ | 13.8 |
| Uквн,% | 11 |
| Uквн0,% | 11 |
| Rквн,кВт | 380 |
| Rквн0,кВт | 380 |
| Обмотки | Y0/D |
| <input type="button" value="Да"/> <input type="button" value="Нет"/> | |
| <input type="button" value="Поиск в базе данных"/> | |

Рис. 18.8. Фрагмент интерфейса программы *GuTestAC* – окно, предназначенное для ввода параметров двухобмоточного трансформатора. Параметры, выводимые в окне, соответствуют текущим значениям параметризуемого элемента

После щелчка по кнопке «Поиск в базе данных» на экране появляется окно с таблицей параметров (рис. 18.9). Строка с параметрами выбранного трансформатора выделяется и после щелчка по кнопке «Копировать» параметры трансформатора из базы каталожных данных записываются в окно ввода. При наличии у пользователя паспортных данных оборудования или данных, полученных опытным путем, отображаемые в окне ввода параметры могут быть скорректированы. Убедившись в правильности отображаемых в окне параметров, пользователь щелкает по кнопке «Да».

В программе *GuTestAC* предусмотрены возможности выполнения различных манипуляций с элементами расчетной схемы: вырезания, копирования, вставки, изменения масштаба отображения, вращения, выделения и удаления (рис. 18.10). При наличии в расчетной схеме нескольких групп элементов с повторяющимися параметрами

после параметризации первой группы ее элементы можно выделить (рис. 18.11), скопировать в буфер, вставить содержимое буфера на схему и затем, удерживая левую клавишу мыши, перетащить вновь вставленные элементы в нужное место на схеме. Выделять элементы схемы можно не только с помощью рамки, но и с помощью щелчка мышью по символам выделяемых элементов.

База данных электрооборудования

| Type | Snom | U_high | U_low | Ukhl |
|-------------------|--------|--------|-------|------|
| ТД-80000/220-У1 | 80000 | 242 | 6.3 | 11 |
| ТД-80000/220-У1 | 80000 | 242 | 13.8 | 11 |
| ТД-80000/220-У1 | 80000 | 242 | 10.5 | 11 |
| ТДЦ-125000/220-У | 125000 | 242 | 10.5 | 11 |
| ТДЦ-125000/220-У | 125000 | 242 | 13.8 | 11 |
| ТДЦ-200000/220-У | 200000 | 242 | 15.75 | 11 |
| ТДЦ-200000/220-У | 200000 | 242 | 13.8 | 11 |
| ТДЦ-200000/220-У | 200000 | 242 | 18 | 11 |
| ТДЦ-250000/220-У | 250000 | 242 | 15.75 | 11 |
| ТДЦ-250000/220-У | 250000 | 242 | 13.8 | 11 |
| ТДЦ-400000/220-7: | 400000 | 242 | 13.8 | 11 |
| ТДЦ-400000/220-7: | 400000 | 242 | 20 | 11 |

Копировать Отмена Отображать: - все строки - все столбцы

Рис. 18.9. Фрагмент интерфейса программы *GuTestAC* – выбор параметров трансформатора из базы каталожных данных



Рис. 18.10. Фрагмент графического меню программы *GuTestAC* – выбор масштаба отображения расчетной схемы, поворот элементов схемы, выделение и удаление элементов схемы

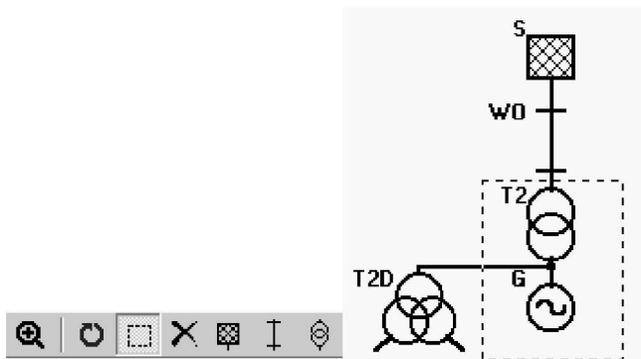


Рис. 18.11. Выделение группы элементов расчетной схемы для копирования и последующей многократной вставки

Вставка на схему элементов, однажды сохраненных в буфере, может быть сделана неоднократно (рис. 18.12). Вставленные из буфера элементы сохраняют обозначение и параметры исходных элементов. Для изменения наименований элементов следует использовать окно ввода параметров.

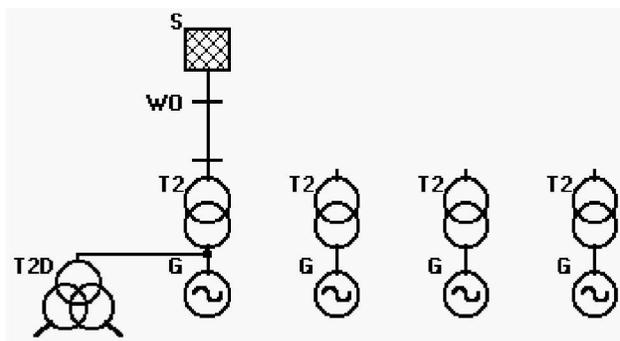


Рис. 18.12. Результат трехкратной вставки группы элементов из буфера на расчетную схему

После добавления на схему трех соединительных линий подготовку расчетной схемы можно считать завершенной. Далее, в соответствии с расчетными условиями, на схему добавляется символ короткого замыкания и производится его параметризация (рис. 18.13). На расчетной схеме может быть задано сразу до десяти точек короткого замыкания.

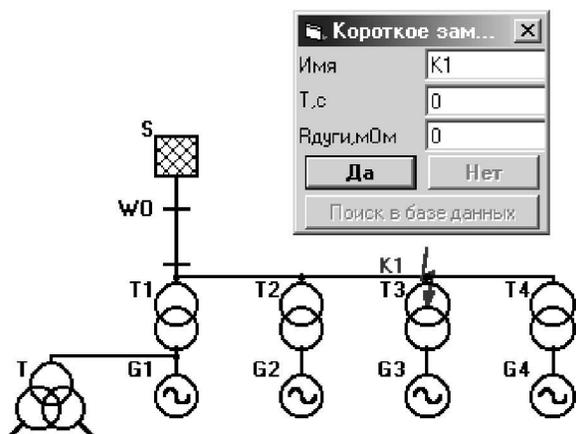


Рис. 18.13. Ввод идентификатора точки короткого замыкания, продолжительности короткого замыкания и сопротивления электрической дуги

В программе предусмотрено использование разных моделей электрической дуги, предусмотренных действующими стандартами. Выбор модели дуги делается в настройках программы.

После запуска расчета на экране дисплея появляется окно с результатами расчета трехфазного короткого замыкания (рис. 18.14). Комплексные значения токов и напряжений отображаются в полярных координатах – модуль и аргумент комплексного значения параметра. Начало отсчета угловых значений аргументов производится от вектора ЭДС узла системы. Расчетные значения аргументов токов и напряжений зависят и от ориентации графического символа элемента при его вставке в расчетную схему. Аргумент комплексных чисел с нулевым модулем может не соответствовать расчетному режиму.

Для просмотра результатов расчета других видов короткого замыкания необходимо воспользоваться раскрывающимся списком расчетных режимов (рис. 18.15). Результаты расчета для выбранного режима будут отображены в том же окне (рис. 18.16).

Отображаемые в окне результатов расчетные данные автоматически записываются в протокол расчета. Если пользователь пожелает посмотреть результаты расчета без записи их в протокол, то для этого ему достаточно снять отметку в поле «Сохранить».

Состав параметров, выводимых программой в окно результатов расчета и записываемых в протокол расчета, зависит от типа элемента расчетной схемы. Для точки короткого замыкания выводятся фазные величины и значения симметричных составляющих фазы *A*. Для кабелей дополнительно выводится температура жил для момента, соответствующего заданной продолжительности короткого замыкания.

Для документирования результатов расчета короткого замыкания в программе предусмотрена генерация отчета в виде документов MS Word и Autocad. В документ MS Word вставляется растровое изображение расчетной схемы, таблица с исходными данными элементов расчетной схемы и таблица результатов расчета. В документе Autocad автоматически представляются расчетная схема, схемы замещения разных последовательностей (рис. 18.17), а в виде спецификации формируется таблица с исходными параметрами элементов расчетной схемы и таблица с результатами расчетов.

Топология расчетной схемы и параметры ее элементов сохраняются в специально предназначенных для этого базах данных. Программы *GuFaults*, *GuExpert* и *GuDCSets* используют dbf-файлы формата dBase-III plus, а программа *GuTestAC* работает с mdb-файлами формата MS Access 2000. Для длительного хранения расчетных схем по умолчанию используется папка с именем TASKS. Операции по сохранению исходных данных, по открытию файлов с ранее сохраненными исходными данными, по созданию файлов для новых исходных данных в программе *GuTestAC* ничем не отличаются от соответствующих операций при работе с программами MS Office.

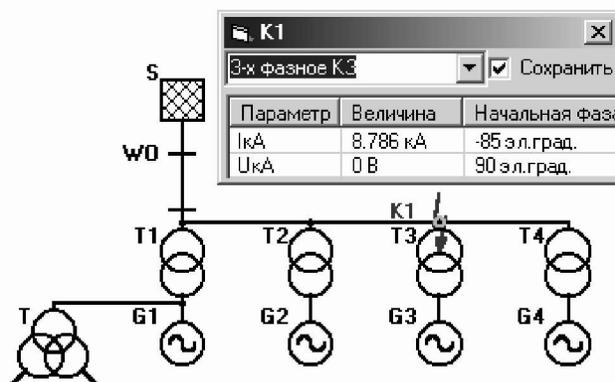


Рис. 18.14. Вывод результатов расчета трехфазного короткого замыкания

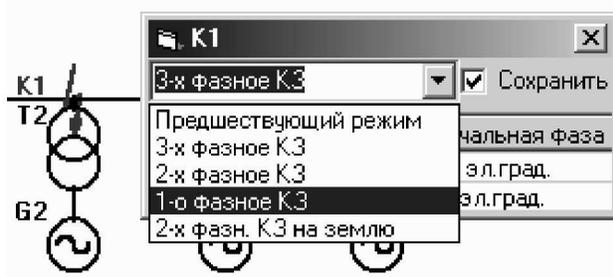


Рис. 18.15. Выбор из списка расчетных режимов набора параметров, запрашиваемых в качестве результатов расчета

| Параметр | Величина | Начальная фаза: |
|-----------|-----------|-----------------|
| $I_{кА}$ | 10.384 кА | -85 эл.град. |
| $I_{кА1}$ | 3.461 кА | -85 эл.град. |
| $I_{кА2}$ | 3.461 кА | -85 эл.град. |
| $I_{кА0}$ | 3.461 кА | -85 эл.град. |
| $U_{кА}$ | 6190 В | 176 эл.град. |
| $U_{кА1}$ | 89340 В | 0 эл.град. |
| $U_{кА2}$ | 56468 В | 179 эл.град. |
| $U_{кА0}$ | 39052 В | 180 эл.град. |

Рис. 18.16. Вывод результатов расчета однофазного короткого замыкания

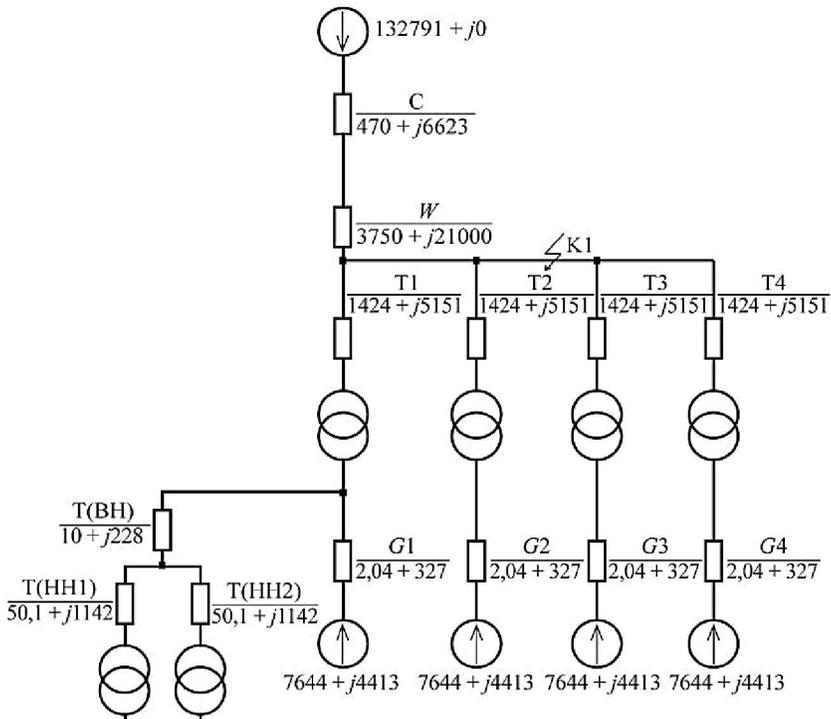


Рис. 18.17. Фрагмент отчета, сгенерированного программой в виде документа Autocad, со схемой замещения прямой последовательности

В базе данных с исходными данными одной расчетной задачи, созданной программами *GuFaults*, *GuExpert* и *GuDCSets*, формируются два dbf-файлы с расширениями «db0» и «db1» и один текстовый файл с расширением «tsk». Имена файлов, относящихся к одной задаче, совпадают с ее наименованием, присвоенным пользователем. Для переноса исходных данных с одного компьютера на другой необходимо скопировать из папки TASKS одного компьютера в папку TASKS другого компьютера один mdb-файл с расширением «AC», созданный программой *GuTestAC* или три файла с расширениями «db0», «db1» и «tsk», созданные программами *GuFaults*, *GuExpert* или *GuDCSets*.

18.4. База справочных данных

Каждая из представленных выше компьютерных программ имеет свою базу справочных данных с параметрами элементов, используемых в расчетных схемах. Программа *GuExpert* имеет базу

данных с параметрами низковольтного электрооборудования переменного тока, программа *GuDCSets* – базу данных с параметрами низковольтного электрооборудования постоянного тока, программа *GuTestAC* – базу данных с параметрами электрооборудования переменного тока напряжением до 1кВ и свыше 1 кВ.

Для просмотра и редактирования содержащейся в dbf-файлах информации можно воспользоваться программой MS Excel. База справочных данных программы *GuTestAC* доступна для просмотра только из самой программы, а обновление данных доступно лишь специально уполномоченному пользователю, что повышает надежность расчетов. В базе справочных данных программы *GuExpert* восемь таблиц. Их структура представлена в табл. 18.1 – 18.3.

Среди данных по кабелям отсутствует явное указание марки кабеля. Все кабели классифицируются по материалу жилы и материалу оболочки. Первая буква значения поля «TYPE» определяет материал жилы: А – алюминиевые жилы, М – медные; второй символ определяет материал оболочки: «_» – непроводящая оболочка, «А» – алюминиевая оболочка, «С» – свинцовая оболочка.

Таблица 18.1

Структура таблицы WC04.DBF со справочными данными низковольтных кабелей

| Имя поля | Параметр поля |
|-------------|--|
| TYPE | Код материала жил и материала оболочки кабеля |
| SF | Сечение фазных жил, мм ² |
| S0 | Сечение нулевой жилы, мм ² |
| R1 | Активная составляющая погонного сопротивления прямой последовательности, МОм/м |
| X1 | Индуктивная составляющая погонного сопротивления прямой последовательности, МОм/м |
| R0 | Активная составляющая погонного сопротивления нулевой последовательности, МОм/м |
| X0 | Индуктивная составляющая погонного сопротивления нулевой последовательности, МОм/м |
| RC | Переходное сопротивление контакта жилы с зажимом клеммника или аппарата, МОм |

В справочниках активные сопротивления кабелей обычно приводят для продолжительно допустимой температуры, определяемой типом их изоляции. Поэтому, например, активные сопротивления кабелей с бумажной изоляцией в справочниках оказываются больше сопротивлений кабелей с поливинилхлоридной изоляцией. Чтобы избежать необходимости перечислять в базе данных программы все марки кабелей, сопротивления кабелей были приведены к температуре 20 °С. При параметризации кабельных линий пользователь в соответствии с видом изоляции указывает

продолжительно допустимую температуру кабелей, а программа, с учетом температуры окружающей среды и значения тока, протекавшего по кабелю в режиме, предшествующем короткому замыканию, вычисляет начальную температуру жил и корректирует сопротивление кабеля.

Таблица 18.2

Структура таблицы T04.DBF со справочными данными силовых трансформаторов

| Имя поля | Параметр поля |
|---------------|---|
| TYPE | Тип трансформатора |
| SNOM | Номинальная мощность, кВ·А |
| U_HIGH | Номинальное напряжение обмотки высшего напряжения, кВ |
| U_MID | Номинальное напряжение обмотки среднего напряжения, кВ |
| U_LOW | Номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, кВ |
| PXX | Потери холостого хода, кВт |
| PKHM | Потери короткого замыкания обмоток высшего – среднего напряжения, кВт |
| PKHL | Потери короткого замыкания обмоток высшего – низшего напряжения, кВт |
| UKHL | Напряжение короткого замыкания обмоток высшего – низшего напряжения, % |
| UKHM | Напряжение короткого замыкания обмоток высшего – среднего напряжения, % |
| UKML | Напряжение короткого замыкания обмоток среднего – низшего напряжения, % |
| IXX | Ток холостого хода, % |
| SCHEME | Схема соединения обмоток (YN/D, YN/Y/D и т.п.) |
| R0 | Активная составляющая сопротивления нулевой последовательности, МОм |
| X0 | Индуктивная составляющая сопротивления нулевой последовательности, МОм |

Таблица 18.3

Структура таблицы SF04.DBF со справочными данными автоматических выключателей

| Имя поля | Параметр поля |
|-------------|---|
| TYPE | Тип автоматического выключателя |
| INOM | Номинальный ток, А |
| R1 | Активная составляющая внутреннего сопротивления прямой последовательности одного полюса выключателя, МОм |
| X1 | Индуктивная составляющая внутреннего сопротивления прямой последовательности одного полюса выключателя, МОм |
| RC | Переходное сопротивление контактов одного полюса, МОм |

При анализе результатов расчета следует иметь в виду, что активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности кабельных линий реальных электроустановок могут отличаться от справочных данных вследствие образования дополнительных путей растекания токов нулевой последовательности по металлоконструкциям зданий и системе заземления. Можно ожидать, что активное сопротивление нулевой последовательности окажется меньше указанного в справочнике, а индуктивное – больше.

Значения переходных сопротивлений кабелей отражают состояние нового, нормально протянутого разборного соединения оконцованных жил со штатными зажимами. Предполагается, что оконцеватели кабелей с медными и алюминиевыми жилами имеют одинаковую конструкцию и их переходное сопротивление зависит только от сечения жил. К сожалению, в настоящее время нет методики учета влияния процессов деградации контактов на их переходное сопротивление. Опытным путем установлено, что переходное сопротивление контактов в реальных электроустановках, эксплуатируемых более 8 – 10 лет, может отличаться от справочных данных в десятки и даже сотни раз. Кроме того, установлено, что переходное сопротивление существенно зависит от силы тока, поэтому сведения о переходных сопротивлениях следует рассматривать как весьма условные.

Собранные в табл. SF04.DBF справочные данные автоматических выключателей не имеют привязки к конкретным типам выключателей. Сопротивления полюсов выключателей в основном зависят от их номинального тока. На основе имеющихся статистических оценок не представляется возможным определить сопротивления отдельно для каждого типа выключателей. В поле «TYPE» указывается символьный код производителя аппаратов.

При параметризации расчетной схемы следует учитывать количество расцепителей, имеющих у автоматических выключателей. Справочные данные по сопротивлениям автоматических выключателей даны для полюсов с двумя расцепителями, как правило – электромагнитным и тепловым.

При отсутствии у автоматического выключателя одного из двух расцепителей пользователь должен уменьшить значение внутреннего сопротивления полюса, полученное из базы данных, в два раза. Если у автоматического выключателя нет ни одного расцепителя, то его при вводе данных в компьютер можно представлять графическим символом рубильника. В этом случае его внутреннее сопротивление будет определяться сопротивлением главных контактов аппарата.

18.5. Защита от ошибок при вводе исходных данных

Даже небольшая ошибка, допущенная при выполнении расчета короткого замыкания, может стать причиной серьезной аварии, повлекшей значительные материальные потери. Поэтому при выполнении расчетов ручным способом приходится тщательно все проверять, затрачивая на проверку время, соизмеримое с самим расчетом. При расчете коротких замыканий на компьютере риск ошибок, связанных с выполнением эквивалентных преобразований схемы замещения и арифметическими операциями, практически отсутствует. Однако остаются риски ошибок при выборе расчетных условий и при параметризации элементов расчетной схемы. Риски ошибок при параметризации даже возрастают, так как при ручном расчете такие ошибки опытный расчетчик увидит в процессе расчета, особенно при использовании системы относительных единиц. Для снижения риска ошибок при параметризации элементов расчетной схемы в программах предусмотрен ряд специальных мер.

Во-первых, большая часть параметров элементов схемы берется из электронной базы каталожных данных электрооборудования. Размерность параметров в базе данных соответствует размерности параметров, используемых программами. Информация, содержащаяся в базе каталожных данных, многократно проверяется и разработчиками, и всеми пользователями программ, что способствует повышению ее достоверности. Однако пользователи программ могут захотеть пополнить или отредактировать свой экземпляр базы каталожных данных и внести в него ошибочные данные. Например, пользователь программы может пополнить базу данных параметрами отсутствующих в ней кабелей и при этом не учесть, что активные сопротивления кабелей должны соответствовать температуре 20 °С, а ввести данные из справочника, в котором сопротивления приведены для 80 °С. Ошибки такого рода программы могут выявлять, анализируя соотношение всех данных, введенных для параметризации конкретного элемента расчетной схемы. Программа *GuTestAC*, например, сопоставляет введенное сечение жил кабеля и погонное сопротивление материала жил. Если последнее будет существенно отличаться от сопротивлений и меди, и алюминия, то возникает достаточно оснований обратить внимание пользователя на это обстоятельство.

Во-вторых, программы используют настраиваемые диапазоны допустимых значений для всех запрашиваемых ими данных. Это позволяет предотвратить ошибки, возникающие из-за путаницы в размерностях величин: относительные и именованные системы единиц, километры и метры, киловатты и мегаватты и т.п.

Например, для параметра «температура окружающей среды» можно разрешить ввод значений от -40 до $+40$ °С, что предотвратит ввод случайных значений с «лишним» нулем. Пользователь программы имеет возможность сузить диапазон допустимых значений, ориентируясь на круг решаемых им задач, что будет способствовать снижению риска случайных ошибок.

В-третьих, программы имеют возможность выявлять и неявные ошибки, обусловленные несоответствием параметров электрооборудования, включенного в расчетную схему. Ошибки этого рода выявляются путем анализа параметров режима, предшествующего короткому замыканию. Так, например, программа *GuTestAC* перед расчетом короткого замыкания рассчитывает предшествующий нагрузочный режим и оценивает напряжения на выводах вращающихся электрических машин. Если рассчитанные напряжения чрезмерно отличаются от номинальных значений, то выдается соответствующее предупреждение. Такое предупреждение может появиться и в случае слишком длинной линии, соединяющей электростанцию с системой, и в случае несоответствия мощности системы совокупной мощности генераторов электростанции, и в случае ошибки в выборе номинальных напряжений трансформаторов, и т.п.

18.6. Типовые задачи расчета коротких замыканий

Перед выполнением расчета короткого замыкания необходимо определить цель расчета и при подготовке исходных данных обеспечить соответствие расчетных условий цели расчета. Следует определить расчетную схему, место, вид, продолжительность короткого замыкания и предшествующий режим.

Выбор расчетной схемы производится на основе анализа коммутационных состояний электроустановки. Для расчетов, нацеленных на получение максимальных значений тока короткого замыкания, в расчетную схему следует включить максимальное количество источников наибольшей мощности с наименьшей электрической удаленностью от места короткого замыкания. Рассматриваются лишь продолжительные коммутационные состояния: нормальное рабочее, работа от резервного источника, ремонтное. Не рассматриваются кратковременные коммутационные состояния, возникающие в процессе выполнения оперативных переключений.

Выбор расчетной точки короткого замыкания обычно диктуется действующими нормами. Для проверки на термическую стойкость и невозгораемость кабелей государственный стандарт рекомендует рассматривать короткое замыкание в начале кабельной линии, в от-

раслевых нормах может быть предусмотрено удаление точки короткого замыкания от начала линии. При проверке низковольтных автоматических выключателей и плавких предохранителей на отключающую способность ток короткого замыкания рассчитывается при коротком замыкании на зажимах аппарата со стороны наиболее мощного источника. Если генерирующие элементы схемы имеются с обеих сторон проверяемого защитного аппарата, то составляющая тока короткого замыкания от элементов со стороны менее мощных источников не учитывается.

При проверке чувствительности защитных аппаратов точка короткого замыкания выбирается за наиболее электрически удаленным защитным аппаратом следующего уровня защиты или на зажимах конечного электроприемника. Одна и та же точка короткого замыкания может быть расчетной при проверке чувствительности основного и резервного защитных аппаратов, как в случае ближнего, так и в случае дальнего резервирования.

В электроустановках напряжением до 1 кВ металлические трехфазные короткие замыкания обычно являются расчетным видом короткого замыкания при проверке на отключающую способность защитных аппаратов, термическую стойкость и невозгораемость кабелей, дуговые однофазные короткие замыкания – расчетным видом короткого замыкания при проверке на чувствительность защитных аппаратов. Однако иногда ток однофазного короткого замыкания может оказаться больше тока трехфазного короткого замыкания, тогда чувствительность защитных аппаратов следует проверять по трехфазному короткому замыканию.

При проверке коммутационных аппаратов и проводников на термическую стойкость следует учитывать зависимость времени отключения короткого замыкания от силы тока, вследствие чего значение интеграла Джоуля при затяжном дуговом трехфазном коротком замыкании может оказаться больше, чем при металлическом коротком замыкании.

Короткие замыкания обычно отключаются быстродействующими защитами, а при их неисправности – резервными защитами, с выдержкой времени. При проверке автоматических выключателей по содержанию апериодической составляющей в отключаемом токе рассматривается наиболее быстродействующая защита, но при проверке проводников и коммутационных аппаратов на термическую стойкость продолжительность короткого замыкания определяется временем срабатывания самой медленной защиты и полным временем отключения выключателя. В низковольтных электроустановках в качестве резервной защиты иногда используются обратнозависимые (тепловые) токовые расцепители. Это может существенно увеличить продолжительность коротких замыканий и должно учитываться при проверке кабелей на невозгораемость.

При проверке чувствительности быстродействующих автоматических выключателей продолжительность короткого замыкания следует задавать по времени отключения выключателя, указанному в его паспорте или каталоге. Большинство обычных, не токоограничивающих выключателей имеют номинальное время отключения 40 мс, однако в эксплуатации находится еще много выключателей с временем отключения 100 мс. Актуальность учета времени отключения автоматических выключателей обусловлена явлением теплового спада тока короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. При небольших сечениях жил кабеля даже через 40 мс ток короткого замыкания может уменьшиться на 10% и более.

При отключении коротких замыканий плавкими предохранителями или автоматическими выключателями, имеющими ступенчатую защитную характеристику, т.е. когда время отключения зависит от значения тока короткого замыкания, следует сначала рассчитать ток в начальный момент короткого замыкания, определить по нему ориентировочное время срабатывания защитного аппарата, а затем, задав новое значение продолжительности короткого замыкания, получить уточненное значение тока короткого замыкания. Если защитный аппарат срабатывает на участке защитной характеристики, относящейся к зоне перегрузок, то время срабатывания надо пересчитать через рассчитанный программой интеграл Джоуля. Для этого по значению интеграла Джоуля и продолжительности короткого замыкания, для которой он был рассчитан, определяется среднеквадратичное значение тока короткого замыкания. Затем по защитной характеристике уточняется продолжительность короткого замыкания и для нее повторно выполняется расчет.

Активная составляющая сопротивления кабелей зависит от температуры жил. Последняя, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды и от силы тока в режиме, предшествовавшем короткому замыканию. В справочниках сопротивление кабелей указывается либо при температуре 20 °С, либо при температуре изоляции, соответствующей продолжительно допустимым токам. Если кабель имеет поливинилхлоридную изоляцию с продолжительно допустимой температурой 65 или 70 °С, то значения активных сопротивлений кабеля в разных справочниках могут отличаться на 18 – 20%. При прокладке кабелей в кабельных каналах и галереях температура жил кабелей зимой может понижаться до –30 – –40 °С, что приводит к уменьшению сопротивления более чем на 20%. Выполняя расчет токов короткого замыкания, следует, в соответствии с целью расчета, корректно выбрать предшествующий режим – для расчета

минимальных токов следует ориентироваться на максимальные начальные температуры жил, а при расчете максимальных токов – на минимальные температуры жил.

На результат расчета коротких замыканий оказывает влияние и режим вращающихся машин в момент, предшествующий короткому замыканию. Для получения верхней оценки тока короткого замыкания следует ориентироваться на холостой ход асинхронных двигателей и на работу с номинальной мощностью синхронных машин. Наоборот, для получения нижней оценки тока короткого замыкания следует исходить из того, что в режиме, предшествовавшем короткому замыканию, синхронные машины работают на холостом ходу, а асинхронные двигатели с номинальной мощностью.

При ручных расчетах коротких замыканий детальный учет расчетных условий затруднен, так как требуется многократно пересчитывать параметры элементов схемы замещения, выполнять эквивалентные преобразования схемы. Часто ограничиваются расчетом явно завышенных значений тока, и по ним выбирается или проверяется электротехническое оборудование. В конечном итоге это приводит к завышению стоимости электроустановки. При компьютерном расчете коротких замыканий затраты времени невелики и варьирование расчетных условий оказывается оправданным, так как позволяет избавиться от неоправданно завышенных расчетных токов.

Список литературы

1. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
2. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
3. ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88). Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
4. ГОСТ Р 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
5. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
6. Долин, А.П. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой / А.П. Долин, Г.Ф. Шонгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Крючков, И.П. Короткие замыкания и несимметричные режимы электроустановок: учеб. пособие для студентов вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
8. Кудрявцев, Е.П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств / Е.П. Кудрявцев, А.П. Долин. – М.: Энергия, 1981.
9. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
10. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 552735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007.
11. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 552736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – М.: Стандартинформ, 2007.
12. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
13. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: НЦ ЭНАС, 2009.
14. Стандарт организации СТО 56947007-29.060.10.005-2008. Руководящий документ по проектированию жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110 – 500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.
15. Стандарт организации СТО 56947007-29.060.10.006-2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110 –500 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2008.

Учебное издание

Крючков Иван Петрович
Старшинов Владимир Алексеевич
Гусев Юрий Павлович
Долин Анисим Петрович
Пираторов Михаил Васильевич

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ И ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор О.А. Панова
Компьютерная верстка Л.В. Харченко
Дизайн обложки Д.А. Николаевой

| | | |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| Подписано в печать 15.05.2018 | Формат 60×90/16 | |
| Бумага мелованная | Печать офсетная | Гарнитура Таймс |
| Усл.печ. л. 27,5 | Тираж 350 экз. | Заказ № |

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии Издательства МАИ (МАИ).
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.