





Публичное акционерное общество  
«Российские сети»



***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»

---

# **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

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

Москва  
Издательство МЭИ  
2018

УДК 621.311  
ББК 31.27  
П 272

Рецензенты: канд. техн. наук, начальник отдела внешних сетей и сооружений ОАО «Институт Теплоэлектропроект» Т.А. Стогний;  
канд. техн. наук, доц. НИУ «МЭИ» А.М. Поляков

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

**П 272** Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 396 с.

ISBN 978-5-7046-1948-2

В учебнике рассмотрены электромагнитные переходные процессы при коротких замыканиях и продольных несимметриях разных видов в трехфазных электроустановках, а также при сложных несимметричных повреждениях, форсировке возбуждения и гашении магнитного поля синхронных машин.

Приведены методы и примеры расчета электромагнитных переходных процессов.

Предназначен для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника», а также для аспирантов вузов, научных сотрудников, инженерно-технических работников предприятий электроэнергетики, электротехники и проектных организаций.

**УДК 621.311**  
**ББК 31.27**

ISBN 978-5-7046-1948-2

© И.П. Крючков, В.А. Старшинов,  
Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов, 2018  
© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2018  
© ПАО «Россети», 2018

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	10
<b>Глава первая</b>	
<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ</b> .....	11
1.1. Основные понятия. Причины возникновения электромагнитных переходных процессов.....	11
1.2. Назначение расчетов электромагнитных переходных процессов и предъявляемые к ним требования.....	13
1.3. Основные допущения, принимаемые при исследованиях электромагнитных переходных процессов.....	14
1.4. Параметры элементов расчетных схем, необходимые для расчета электромагнитных переходных процессов.....	15
<b>Глава вторая</b>	
<b>СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ</b> .....	19
2.1. Понятие о расчетной схеме и схеме замещения.....	19
2.2. Системы единиц, используемые при составлении схем замещения.....	20
2.3. Виды схем замещения.....	23
2.4. Составление схем замещения с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов расчетной схемы к одной ступени напряжения..	24
2.5. Составление схем замещения с сохранением трансформаторных связей.....	30
2.6. Схемы замещения прямой (обратной) последовательности трансформаторов (автотрансформаторов).....	31
2.7. Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора.....	36
2.8. Преобразование схем замещения.....	37
2.9. Примеры решения задач.....	39
<b>Глава третья</b>	
<b>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ, ПОДКЛЮЧЕННЫХ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ</b> .....	49
3.1. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в цепи без трансформаторов.....	49
3.2. Особенности переходного процесса при трехфазном коротком замыкании в разветвленной цепи.....	57
3.3. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой.....	60

3.4. Переходный процесс при коротком замыкании за трансформатором.....	64
<b>Глава четвертая</b>	
<b>УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....</b>	<b>67</b>
4.1. Основные допущения.....	67
4.2. Исходные дифференциальные уравнения переходного процесса в синхронной машине.....	68
4.3. Потокосцепления, собственные индуктивности и взаимные индуктивности обмоток синхронных машин.....	70
4.4. Линейные преобразования уравнений трехфазной электрической машины. Понятие об изображающем векторе..	74
4.5. Линейные преобразования исходных дифференциальных уравнений переходного процесса в синхронной машине к осям ротора.....	81
4.6. Уравнения переходного процесса в синхронной машине в операторной форме.....	89
<b>Глава пятая</b>	
<b>РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОБЩЕННЫХ НАГРУЗОК.....</b>	<b>91</b>
5.1. Общие замечания.....	91
5.2. Определение синхронной ЭДС синхронной машины из предшествующего установившегося режима.....	92
5.3. Определение начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного генератора без учета влияния демпферных контуров.....	94
5.4. Определение начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронного генератора с учетом влияния демпферных контуров.....	100
5.5. Влияние электродвигателей и нагрузок в начальный момент короткого замыкания.....	105
<b>Глава шестая</b>	
<b>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДЕМПФЕРНЫХ КОНТУРОВ.....</b>	<b>108</b>
6.1. Уравнения переходного процесса синхронной машины и их корни.....	108
6.2. Изменение во времени тока якоря синхронной машины при трехфазном коротком замыкании.....	112
6.3. Влияние форсировки возбуждения на переходный процесс в синхронной машине при коротком замыкании.....	115
6.4. Переходный процесс в синхронной машине при гашении магнитного поля.....	122

<b>Глава седьмая</b>	
<b>ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФЕРНЫХ КОНТУРОВ.....</b>	<b>128</b>
7.1. Уравнения переходного процесса синхронной машины и их корни.....	128
7.2. Переходный процесс в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров при трехфазном коротком замыкании.....	133

<b>Глава восьмая</b>	
<b>ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....</b>	<b>142</b>
8.1. Общие замечания. Определение удаленности точки короткого замыкания от электрической машины.....	142
8.2. Расчет периодической составляющей тока при удаленных коротких замыканиях.....	144
8.3. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых.....	147
8.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом спрямленных характеристик.....	155
8.5. Примеры решения задач.....	162

<b>Глава девятая</b>	
<b>ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН.....</b>	<b>172</b>
9.1. Методы, используемые при расчетах несимметричных режимов.....	172
9.2. Образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронных машин.....	175

<b>Глава десятая</b>	
<b>ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТОКАМ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ.....</b>	<b>178</b>
10.1. Общие сведения.....	178
10.2. Синхронные машины.....	179
10.3. Асинхронные электродвигатели.....	185
10.4. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы.....	186
10.5. Факторы, определяющие полное сопротивление прямой (обратной) и нулевой последовательностей воздушных линий электропередачи.....	192
10.6. Сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов.....	199
10.7. Сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами.....	201

10.8. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи без заземленных молниезащитных тросов.....	206
10.9. Сопротивление нулевой последовательности двухцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами.....	209
10.10. Сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей.....	211
<b>Глава одиннадцатая</b>	
<b>СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ.....</b>	<b>214</b>
11.1. Общие замечания.....	214
11.2. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей.....	214
11.3. Схемы замещения нулевой последовательности.....	217
11.4. Схемы замещения различных последовательностей при поперечной и продольной несимметрии в одном и том же месте.....	221
<b>Глава двенадцатая</b>	
<b>НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ.....</b>	<b>224</b>
12.1. Исходные положения.....	224
12.2. Двухфазное короткое замыкание.....	226
12.3. Однофазное короткое замыкание.....	229
12.4. Двухфазное короткое замыкание на землю.....	233
12.5. Влияние и учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания.....	237
12.6. Правило эквивалентности тока прямой последовательности.....	242
12.7. Расчет переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях разными методами.....	245
12.8. Расчет тока в произвольной ветви и напряжения в произвольном узле при несимметричных коротких замыканиях.....	253
12.9. Соотношение токов короткого замыкания разных видов при замыканиях в одной и той же точке.....	257
12.10. Примеры решения задач.....	258
<b>Глава тринадцатая</b>	
<b>РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ.....</b>	<b>271</b>
13.1. Общие замечания.....	271
13.2. Обрыв одной фазы.....	273
13.3. Обрыв двух фаз.....	280
13.4. Включение в одну из фаз элемента с сопротивлением....	284

13.5. Включение в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением.....	288
13.6. Особенности расчета токов и напряжений при однократной продольной несимметрии.....	293
<b>Глава четырнадцатая</b>	
<b>РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ.....</b>	<b>297</b>
14.1. Общие замечания.....	297
14.2. Использование комплексных схем замещения при анализе сложных несимметричных повреждений.....	298
14.3. Расчет двойных коротких замыканий на землю.....	304
14.4. Расчет несимметрии при обрыве фазы и однофазном коротком замыкании с использованием производной схемы прямой последовательности.....	313
14.5. Примеры решения задач.....	320
<b>Глава пятнадцатая</b>	
<b>КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В.....</b>	<b>331</b>
15.1. Основные факторы, влияющие на процесс короткого замыкания.....	331
15.2. Параметры элементов электроустановок переменного тока, необходимые для расчета переходных процессов...	335
15.3. Параметры элементов электроустановок постоянного тока, необходимые для расчета переходных процессов...	353
15.4. Электромагнитные переходные процессы в электроустановках с полупроводниковыми преобразователями...	365
15.5. Примеры решения задач.....	371
<b>Список литературы.....</b>	<b>375</b>
<b>Приложение 1</b>	
Определение параметров схемы замещения синхронных машин...	377
<b>Приложение 2</b>	
Определение параметров схемы замещения асинхронных электродвигателей с простой беличьей клеткой.....	386
<b>Приложение 3</b>	
Параметры элементов электроустановок переменного тока напряжением до 1000 В.....	388

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является учебником по первой части курса «Переходные процессы в электроэнергетических системах», в котором рассматриваются теория и методы расчета электромагнитных переходных процессов.

В учебнике рассмотрены электромагнитные переходные процессы при коротких замыканиях и продольных несимметриях разных видов в трехфазных электроустановках, сложных несимметричных повреждениях, при форсировке возбуждения и гашении магнитного поля синхронных машин и др. Чтобы активизировать самостоятельную работу студентов и облегчить усвоение курса, в конце глав, посвященных методам анализа переходных процессов, приведены примеры соответствующих расчетов.

Основу учебника составили конспекты лекций, которые читают авторы в Национальном исследовательском университете (МЭИ) в течение многих лет, результаты научных исследований в области электромагнитных переходных процессов, различные нормативно-технические документы, разработанные авторами учебника.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

---

---

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

---

---

### 1.1. Основные понятия. Причины возникновения электромагнитных переходных процессов

Современная электроэнергетическая система представляет собой сложный комплекс различных взаимосвязанных элементов – генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, электродвигателей и т.д. Ее работа в произвольный момент времени характеризуется определенными значениями мощностей на выводах генераторов и у потребителей, напряжений в различных узловых точках, токов в разных элементах, частоты и других величин. Состояние системы в любой момент времени, определяемое этими величинами, называется ее режимом, а сами величины называются параметрами режима.

Различают несколько видов режимов электроэнергетических систем:

- нормальный установившийся, при котором значения параметров режима остаются неизменными или изменяются медленно и нерегулярно, в пределах, соответствующих нормальной работе элементов системы с оптимальными технико-экономическими характеристиками;
- послеаварийный установившийся, наступающий после аварийного отключения одного или нескольких элементов системы с целью ликвидации аварии, причем параметры режима могут существенно отличаться от параметров нормального режима;
- переходный, который имеет место при переходе от одного установившегося режима к другому и характеризуется относительно быстрым и резким изменением параметров режима.

Поскольку во время переходного режима состояние электроэнергетической системы непрерывно изменяется, обычно рассматри-

вают отдельные переходные процессы, совокупность которых и составляет переходный режим.

Переходные процессы, как и переходные режимы, обычно делят на нормальные и аварийные. Процессы первого типа являются следствием различных операций, обусловленных условиями эксплуатации, таких как включение и отключение отдельных трансформаторов или линий электропередачи, различного рода регулирования, изменение нагрузки и пр. Для них характерны относительно малые и медленные изменения параметров режима. Аварийные переходные процессы возникают в результате аварий в системе, например, отключения работающих нагруженных агрегатов, отключения линий электропередачи, несущих значительные нагрузки, коротких замыканий в различных элементах системы. При аварийном переходном процессе параметры режима изменяются быстро и значительно.

Причины возникновения аварийных переходных процессов весьма разнообразны. Но в большинстве случаев они являются результатом своевременно не обнаруженных и не устраненных дефектов электрооборудования, допущенных ошибок при проектировании, а также неудовлетворительного монтажа или эксплуатации электроустановок.

Продолжительность аварийных переходных процессов часто составляет доли секунды или секунды. Однако их последствия иногда бывают весьма тяжелыми. Так следствием короткого замыкания могут быть понижения напряжения в значительной части электроэнергетической системы, приводящие к нарушению нормальной работы потребителей электроэнергии и браку продукции; разрушение поврежденного оборудования под действием электрической дуги, обычно возникающей в месте нарушения изоляции; разрушение электрооборудования в результате электродинамического и термического действия токов короткого замыкания; нарушение устойчивости электроэнергетической системы. Поэтому во многих случаях именно переходные процессы определяют важные параметры генераторов, электрических аппаратов и других элементов электроустановок, обуславливают жесткие требования к системе возбуждения синхронных машин в отношении их предельных напряжений возбуждения и быстродействия, являются причиной использования различных специальных устройств, предотвращающих развитие аварий.

Обычно переходные процессы делят на три вида: волновые, электромеханические и электромагнитные. Ниже рассматриваются только электромагнитные переходные процессы, т.е. процессы изменения во времени электромагнитных параметров переходного режима без учета влияния на них изменения частоты вращения синхронных генераторов электроэнергетической системы. Основное внимание уделено анализу электромагнитных переходных процессов при коротком замыкании. Кроме того, кратко рассмотрены переходные

процессы при включении в сеть трансформаторов с разомкнутой вторичной обмоткой, а также переходные процессы при форсировке возбуждения и гашении магнитного поля синхронных машин.

## **1.2. Назначение расчетов электромагнитных переходных процессов и предъявляемые к ним требования**

Исследования и расчеты электромагнитных переходных процессов 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. Одной из основных причин таких нарушений являются короткие замыкания, представляющие собой случайные или преднамеренные, не предусмотренные нормальным режимом работы электроустановки электрические соединения различных ее фаз между собой или с землей, при которых токи в ветвях, примыкающих к месту их возникновения, резко возрастают, превышая наибольшие допустимые токи продолжительного режима. Исследования переходных процессов при коротком замыкании 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, настройки и оценки возможного действия средств релейной защиты и автоматики; выбора оптимальных схем электрических соединений электроустановок; определения влияния токов нулевой последовательности линий электропередачи на линии связи; выбора заземляющих устройств; анализа аварий в электроустановках.

Расчеты переходных процессов 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 выбора параметров 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.

### **1.3. Основные допущения, принимаемые при исследованиях электромагнитных переходных процессов**

Исследование электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах с учетом всех влияющих на них факторов и особенностей различных элементов систем практически невозможно. Поэтому для упрощения задачи обычно принимают некоторые допущения, позволяющие получить сравнительно простые математические модели при достаточной точности получаемых результатов.

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 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 апериодическую 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.

#### **1.4. Параметры элементов расчетных схем, необходимые для расчета электромагнитных переходных процессов**

**Исходные параметры синхронных машин.** Для расчета переходных процессов, в том числе при коротких замыканиях необходимы следующие параметры синхронных машин и режимные параметры предшествующего режима:

- номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ ;
- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;
- 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 якоря  $X_{* \sigma(\text{ном})}$ ;
- отношение короткого замыкания  $K_c$ ;
- индуктивное сопротивление обратной последовательности  $X_{* 2(\text{ном})}$ ;
- индуктивное сопротивление обмотки возбуждения  $X_{* f(\text{ном})}$ ;
- активное сопротивление обмотки возбуждения  $R_f$ ;
- 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  $T_{d0}'$ ;
- переходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря  $T_d'$ ;
- сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутой обмотке якоря  $T_{d0}''$ ;
- сверхпереходная постоянная времени по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря  $T_d''$ ;
- сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при разомкнутой обмотке якоря  $T_{q0}''$ ;
- сверхпереходная постоянная времени по поперечной оси при замкнутой накоротко обмотке якоря  $T_q''$ ;
- постоянная времени затухания апериодической составляющей тока якоря при трехфазном коротком замыкании на выводах машины  $T_a^{(3)}$ ;

- ток возбуждения при работе машины в режиме холостого хода с номинальным напряжением  $I_{fX}$ ;

- номинальный ток возбуждения  $I_{f \text{ ном}}$ ;

- предельный ток возбуждения  $I_{f \text{ пр}}$ .

Методика расчета параметров схем замещения синхронных машин изложена в прил. 1.

**Исходные параметры асинхронных электродвигателей.**

Обычно в каталогах и данных заводов-изготовителей указываются:

- номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ ;

- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;

- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ ;

- номинальное скольжение  $s_{\text{ном}}$ ;

- кратность пускового тока по отношению к номинальному

току  $I_{* \text{ п}}$ ;

- кратность максимального момента по отношению к номинальному моменту  $b_{\text{ном}}$ ;

- кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту  $M_{* \text{ п}}$ ;

- активное сопротивление обмотки статора  $R$  при рабочей температуре;

- коэффициент полезного действия  $\eta$ .

Кроме того, для расчета тока короткого замыкания необходимо знать напряжение  $U_{(0)}$ , ток статора  $I_{(0)}$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi_{(0)}$  в момент, предшествующий переходному процессу.

Методика расчета параметров схем замещения асинхронных электродвигателей с фазным ротором и с простой беличьей клеткой на роторе изложена в прил. 2.

**Исходными параметрами силовых трансформаторов и автотрансформаторов являются:**

- номинальная мощность  $S_{\text{ном}}$ ;

- номинальные напряжения обмоток и фактические коэффициенты трансформации;

- напряжения короткого замыкания между обмотками  $u_{к \text{ В-С}}$ ,  $u_{к \text{ В-Н}}$ ,  $u_{к \text{ С-Н}}$  (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  $\Delta P_{к \text{ В-С}}$ ,  $\Delta P_{к \text{ В-Н}}$ ,  $\Delta P_{к \text{ С-Н}}$  (для двухобмоточных трансформаторов  $\Delta P_{к}$ ).

**Исходными параметрами токоограничивающих реакторов являются:**

- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;
- номинальный ток  $I_{\text{ном}}$ ;
- номинальное индуктивное сопротивление  $X_{*LR(\text{ном})}$  или со-

противление в именованных единицах  $X_{LR}$ ;

- номинальный коэффициент связи  $K_{\text{св}}$  (только для двосных реакторов);
- потери мощности (на фазу) при номинальном токе  $\Delta P$ .

**Исходными параметрами воздушных линий электропередачи являются:**

- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;
- длина линии  $l$ ;
- сечение провода  $S$  и количество проводов в фазе;
- погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности  $X_1$ ;
- погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $X_0$ ;
- погонное активное сопротивление (при рабочей температуре)  $R$ ;
- погонные индуктивные сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности от других линий (при наличии нескольких воздушных линий на одной трассе)  $X_{\Delta\lambda}$ ;
- удельная емкостная проводимость  $b$ ;
- тип опоры и расстояния между фазами;
- расстояние между опорами и стрела провеса.

**Исходными параметрами кабельных линий являются:**

- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;
- длина кабельной линии  $l$ ;
- сечение жилы кабеля  $S$ , материал жил и число параллельно включенных кабелей;
- погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности  $X_1$ ;
- погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $X_0$ ;
- погонное активное сопротивление  $R$  при рабочей температуре.

**Исходными параметрами токопроводов и шинпроводов являются:**

- погонное индуктивное сопротивление прямой последовательности  $X_1$ ;
- погонное индуктивное сопротивление нулевой последовательности  $X_0$ ;
- погонное активное сопротивление  $R$  при рабочей температуре;
- длина токопровода или шинпровода  $l$ .

## ГЛАВА ВТОРАЯ

---

---

# СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

---

---

### 2.1. Понятие о расчетной схеме и схеме 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 одной из фаз трехфазной системы 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.

## **2.2. Системы единиц, используемые 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  $U_6$ , 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:

$$E_{*(\phi)} = \frac{E}{U_{\phi}}; \quad (2.1)$$

$$U_{*(\phi)} = \frac{U}{U_{\phi}}; \quad (2.2)$$

$$I_{*(\phi)} = \frac{I}{I_{\phi}}; \quad (2.3)$$

$$S_{*(\phi)} = \frac{S}{S_{\phi}}; \quad (2.4)$$

$$Z_{*(\phi)} = \frac{Z}{Z_{\phi}}, \quad (2.5)$$

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 (2.5) используют другие соотношения:

$$Z_{*(\phi)} = Z \frac{\sqrt{3}I_{\phi}}{U_{\phi}}; \quad (2.6)$$

$$Z_{*(\phi)} = Z \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}^2}. \quad (2.7)$$

Из (2.6) 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 (2.1) и (2.6) или (2.7), если же заданы относительные значения указанных величин при номинальных условиях, то для приведения используют формулы:

$$E_{*(\delta)} = E_{*(\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\delta}}; \quad (2.8)$$

$$Z_{*(\delta)} = Z_{*(\text{ном})} \frac{I_{\delta}}{I_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\delta}}; \quad (2.9)$$

$$Z_{*(\delta)} = Z_{*(\text{ном})} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\delta}^2}, \quad (2.10)$$

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

$$X_{*(\delta)} = \omega_{\text{синх}(\delta)} L_{*(\delta)} = L_{*(\delta)} \quad (2.11)$$

или

$$X_{*}^{(6)} = \omega_{\text{синх}}^{(6)} M_{*}^{(6)} = M_{*}^{(6)}; \quad (2.11a)$$

$$\Psi_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} I_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} X_{*}^{(6)} \quad (2.12)$$

или

$$\Psi_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} M_{*}^{(6)} = I_{*}^{(6)} X_{*}^{(6)}; \quad (2.12a)$$

$$E_{*}^{(6)} = \omega_{\text{синх}}^{(6)} \Psi_{*}^{(6)} = \Psi_{*}^{(6)}, \quad (2.13)$$

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

Таким образом, если  $\omega = \omega_6 = \omega_{\text{синх}}$ , 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  $\omega_6 = \omega_{\text{синх}}$  базисная единица времени  $t_6 = \frac{1}{\omega_6} = \frac{1}{\omega_{\text{синх}}}$ , по-

этому время в относительных единицах при выбранных базисных условиях

$$t_{*}^{(6)} = \frac{t}{t_6} = \omega_{\text{синх}} t. \quad (2.14)$$

### 2.3. 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, пере-

считанными 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 подлечат пересчету только параметры этих трансформаторов и автотрансформаторов, а параметры других элементов схемы замещения останутся неизменными. Однако наличие трансформаторных связей делает такие схемы замещения более сложными. Поэтому они применяются при расчетах с использованием ЭВМ. 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.

## **2.4. 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 трансформато-

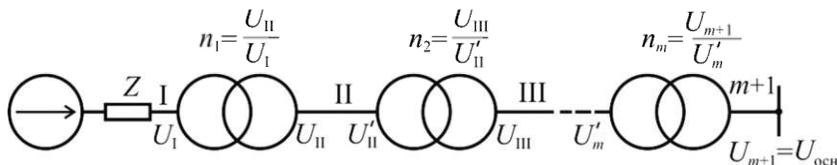
ров и автотрансформаторов называют точным приведением, а приведение по средним коэффициентам трансформации – приближенным. Во всех случаях трансформаторы с соединением обмоток по схеме Y/Δ учитываются по схеме Y/Y.

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. 2.1), определяют по формулам:

$$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m ; \quad (2.15)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 , \quad (2.16)$$

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. 2.1.** Исходная расчетная схема электрической сети

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:

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{НОМ})} U_{\text{НОМ}} n_1 n_2 \dots n_m ; \quad (2.17)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} I_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \quad (2.18)$$

или

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 , \quad (2.19)$$

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 напряжения 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 (2.15), (2.16) и (2.1), (2.6), (2.7) могут быть найдены по формулам:

$$\overset{\circ}{E}_{* (\text{б})} = \frac{E}{U_{\text{б осн}}} n_1 n_2 \dots n_m ; \quad (2.20)$$

$$\overset{\circ}{Z}_{* (\text{б})} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{\sqrt{3} I_{\text{б осн}}}{U_{\text{б осн}}} \quad (2.21)$$

или

$$\overset{\circ}{Z}_{* (\text{б})} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б осн}}^2} . \quad (2.22)$$

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 (2.17) – (2.19) и (2.1), (2.6), (2.7) можно определить по формулам:

$$E_{* (\bar{6})} = E_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\bar{6} \text{ осн}}} n_1 n_2 \dots n_m ; \quad (2.23)$$

$$Z_{* (\bar{6})} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{I_{\bar{6} \text{ осн}}}{U_{\bar{6} \text{ осн}}} \quad (2.24)$$

или

$$Z_{* (\bar{6})} = Z_{* (\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2 \frac{S_{\bar{6} \text{ осн}}}{U_{\bar{6} \text{ осн}}^2} . \quad (2.25)$$

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.

$$U_{\bar{6} I} = \frac{U_{\bar{6} \text{ осн}}}{n_1 n_2 \dots n_m} \quad (2.26)$$

и

$$I_{\bar{6} I} = I_{\bar{6} \text{ осн}} (n_1 n_2 \dots n_m) \quad (2.27)$$

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

$$I_{\bar{6} I} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} U_{\bar{6} I}} . \quad (2.28)$$

На этом учет коэффициентов трансформации трансформаторов заканчивается. Остается подсчитать искомые значения ЭДС и сопротивлений элементов схемы замещения в относительных единицах, используя формулы (2.1), (2.6), (2.7) или (2.8) – (2.10), но подставляя в них  $U_{\bar{6}} = U_{\bar{6} I}$  и  $I_{\bar{6}} = I_{\bar{6} I}$ , 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 (2.20) – (2.25). Например, формулы (2.20) и (2.21) можно представить в виде

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

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

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 выполняется 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 устанавливаются 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.

$$n_{\text{срI}} n_{\text{срII}} \dots n_{\text{срm}} = \frac{U_{\text{срII}}}{U_{\text{срI}}} \cdot \frac{U_{\text{срIII}}}{U_{\text{срII}}} \dots \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{ср m-1}}} = \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{срI}}}, \quad (2.29)$$

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:

$$\overset{\circ}{E} = E \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{ср I}}}; \quad (2.30)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{ср I}}^2}. \quad (2.31)$$

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

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{ном})} U_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ср осн}}}{U_{\text{ср I}}}; \quad (2.32)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{ср I}}^2} \quad (2.33)$$

или

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{ном})} \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{U_{\text{ср I}}^2}. \quad (2.34)$$

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 (2.32) и (2.34) упрощаются:

$$\overset{\circ}{E} = E_{* (\text{ном})} U_{\text{ср осн}}; \quad (2.32a)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z_{* (\text{ном})} \frac{U_{\text{ср осн}}^2}{S_{\text{ном}}}. \quad (2.34a)$$

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.  $U_{б\text{ осн}} = U_{ср\text{ осн}}$ . Тогда в соответствии с (2.26) и (2.29)

$$U_{бI} = \frac{U_{ср\text{ осп}}}{\frac{U_{ср\text{ осн}}}{U_{срI}}}$$

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 (2.8) – (2.10) существенно упрощаются

$$K_{* (б)} = K_{* (ном)} ; \quad (2.35)$$

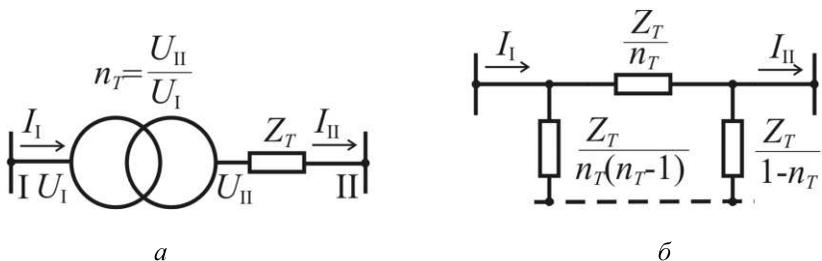
$$Z_{* (б)} = Z_{* (ном)} \frac{I_{б}}{I_{ном}} ; \quad (2.36)$$

$$Z_{* (б)} = Z_{* (ном)} \frac{S_{б}}{S_{ном}} . \quad (2.37)$$

## 2.5. 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. 2.2,а).

Если расчеты выполняются на ЭВМ, то двухобмоточные трансформаторы могут быть представлены II-образной схемой замещения с электрическими связями (рис. 2.2,б), которая, как и схема на рис. 2.2,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.



**Рис. 2.2. Представление двухобмоточного трансформатора в схеме замещения:**  
*a* – последовательная схема; *б* – П-образная схема

## 2.6. Схемы замещения прямой (обратной) последовательности трансформаторов (автотрансформаторов)

Обычно при расчетах токов короткого замыкания и различных режимов в электроэнергетических системах используют схемы замещения трансформаторов (автотрансформаторов), в которых электромагнитная связь между отдельными обмотками заменена электрической. Если при этом не учитывается ток намагничивания, то схема замещения прямой (обратной) последовательности  $p$ -обмоточного трансформатора имеет  $p$  входов, поэтому минимальное число ветвей составляет  $q = p \frac{p-1}{2}$ , что соответствует числу обычно задаваемых сопротивлений отдельных пар обмоток трансформатора.

Для двухобмоточных трансформаторов минимальное число ветвей  $q = 1$ , т.е. схему замещения таких трансформаторов можно представить в виде одной ветви, полное, активное и индуктивное сопротивления которой в относительных единицах при номинальных условиях трансформатора равны соответственно

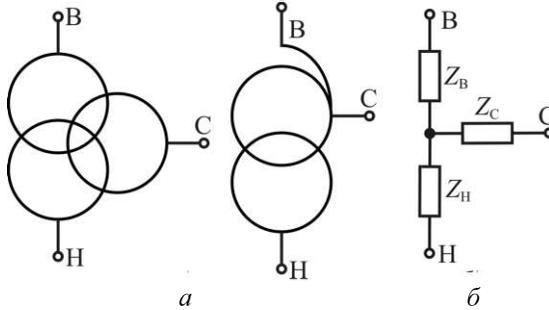
$$\left. \begin{aligned} Z_{*(\text{НОМ})} &= \frac{u_{\text{к}}}{100}; \\ R_{*(\text{НОМ})} &= \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot 10^{-3}}{S_{\text{НОМ}}}; \\ X_{*(\text{НОМ})} &= \sqrt{Z_{*(\text{НОМ})}^2 - R_{*(\text{НОМ})}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

где  $u_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания в процентах от номинального напряжения соответствующей обмотки трансформатора;

$\Delta P_k$  – потери активной мощности в режиме короткого замыкания, кВт;  
 $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

У трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и больше активное сопротивление значительно меньше индуктивного, поэтому часто принимают  $Z \approx X$ .

Для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов задают три напряжения короткого замыкания между попарно взятыми обмотками, т.е.  $u_{к\ В-С}$ ,  $u_{к\ В-Н}$  и  $u_{к\ С-Н}$ . Поэтому минимальное число ветвей схемы  $q = 3$ . При этом схему замещения обычно представляют в виде трехлучевой звезды с сопротивлениями  $Z_B$ ,  $Z_C$ ,  $Z_H$  (рис. 2.3).



**Рис. 2.3. Трехобмоточные трансформатор и автотрансформатор:**  
*а* – исходные схемы; *б* – схема замещения

Эти сопротивления не являются физическими сопротивлениями обмоток высшего, среднего и низшего напряжений, а представляют чисто математические величины, которые удовлетворяют уравнениям:

$$\frac{u_{к\ В-С}}{100} = Z_{* В(ном)} + Z_{* С(ном)};$$

$$\frac{u_{к\ В-Н}}{100} = Z_{* В(ном)} + Z_{* Н(ном)};$$

$$\frac{u_{к\ С-Н}}{100} = Z_{* С(ном)} + Z_{* Н(ном)},$$

из которых следует

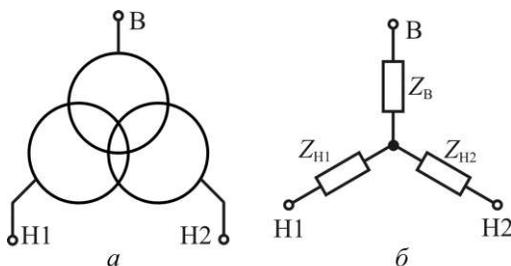
$$\left. \begin{aligned} Z_{* В(ном)} &= \frac{0,5(u_{к\ В-С} + u_{к\ В-Н} - u_{к\ С-Н})}{100}; \\ Z_{* С(ном)} &= \frac{0,5(u_{к\ В-С} + u_{к\ С-Н} - u_{к\ В-Н})}{100}; \\ Z_{* Н(ном)} &= \frac{0,5(u_{к\ В-Н} + u_{к\ С-Н} - u_{к\ В-С})}{100}. \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

При концентрическом расположении на магнитопроводе трех-обмоточного трансформатора (автотрансформатора) обмоток высшего, среднего и низшего напряжений индуктивное сопротивление луча звезды, который соответствует обмотке, расположенной между двумя другими обмотками, обычно оказывается близким к нулю.

Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения (рис. 2.4,а) можно рассматривать как трехобмоточный. Поэтому его схема замещения при приведении всех обмоток к одной ступени напряжения также представляет собой трехлучевую звезду (рис. 2.4,б), причем сопротивления ветвей, соответствующих двум частям обмотки низшего напряжения, и ветви, соответствующей обмотке высшего напряжения, составляют

$$\left. \begin{aligned} Z_{*H1(ном)} = Z_{*H2(ном)} &= \frac{0,5u_{кH1-H2}}{100}; \\ Z_{*B(ном)} &= \frac{u_{кB-H} - 0,25u_{кH1-H2}}{100}, \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

где  $u_{кH1-H2}$  – напряжение короткого замыкания между частями расщепленной обмотки низшего напряжения;  $u_{кB-H}$  – напряжение короткого замыкания между обмоткой высшего напряжения и параллельно соединенными частями обмотки низшего напряжения.



**Рис. 2.4. Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения:**  
а – исходная схема; б – схема замещения

Характерным параметром трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения является коэффициент расщепления  $K_p$ , равный отношению напряжения короткого замыкания между двумя частями расщепленной обмотки к напряжению короткого замыкания между обмоткой высшего напряжения и параллельно соединенными частями расщепленной обмотки, т.е.  $K_p = \frac{u_{кH1-H2}}{u_{кB-H}}$ . По этому выражению, определяющие параметры схемы замещения

трансформаторов с расщепленной обмоткой низшего напряжения, часто представляют в виде

$$\left. \begin{aligned} Z_{* \text{H1(ном)}} = Z_{* \text{H2(ном)}} = 0,5K_p \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}; \\ Z_{* \text{В(ном)}} = \left(1 - 0,25K_p\right) \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}. \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Коэффициент расщепления зависит от конструкции магнитопровода трансформатора и способа размещения на нем отдельных частей расщепленной обмотки.

У однофазного двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения магнитопровод выполнен бронестержневым и каждая часть расщепленной обмотки совместно с соответствующей частью обмотки высшего напряжения расположена на отдельном стержне, поэтому магнитная связь между двумя частями оказывается весьма слабой. При этом передача энергии из одной части в другую посредством магнитного яоля почти полностью исключается и каждую пару обмоток, расположенных на одном стержне, можно рассматривать как отдельный трансформатор. Поэтому  $K_p \approx 4$  и в соответствии с (2.41)  $Z_{\text{В(ном)}} \approx 0$ , а  $Z_{* \text{H1(ном)}} = Z_{* \text{H2(ном)}} \approx 2 \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}$ .

У трехфазных трансформаторов разные части расщепленной обмотки низшего напряжения размещены на одном стержне, поэтому  $K_p < 4$ . При отсутствии данных о значении  $u_{\text{к Н1-Н2}}$  иногда принимают  $K_p = 3,5$ . В этом случае

$$Z_{* \text{В(ном)}} = 0,125 \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}$$

и

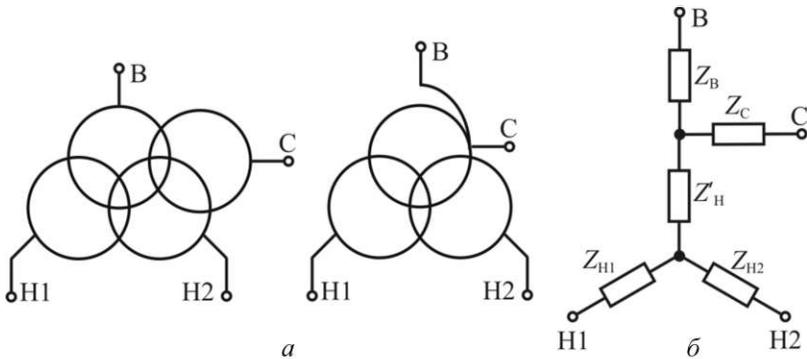
$$Z_{* \text{H1(ном)}} = Z_{* \text{H2(ном)}} = 1,75 \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}.$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на  $m$  частей, представляет собой  $(m+1)$ -лучевую звезду и ее параметры можно определить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} Z_{* \text{В(ном)}} = \frac{u_{\text{к В-Н}} - 0,5 \frac{u_{\text{к Н1-Н2}}}{m}}{100} = \left(1 - \frac{0,5K_p}{m}\right) \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}; \\ Z_{* \text{H1(ном)}} = Z_{* \text{H2(ном)}} = \dots = Z_{* \text{Hm(ном)}} = 0,5 \frac{u_{\text{к Н1-Н2}}}{100} = 0,5K_p \frac{u_{\text{к В-Н}}}{100}. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Схема замещения трехобмоточного трансформатора (автотрансформатора) с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения при приведении параметров всех обмоток к одной ступени напряжения отличается от схемы замещения трехобмоточного трансформатора (автотрансформатора) с нерасщепленной обмоткой низшего напряжения тем, что в ней ветвь, соответствующая обмотке низшего напряжения, заменена трехлучевой звездой, лучи которой имеют сопротивления  $Z'_H$ ,  $Z_{H1}$  и  $Z_{H2}$  (рис. 2.5). Сопротивления  $Z_B$  и  $Z_C$  схемы замещения определяются по формулам (2.39), а  $Z'_H$ ,  $Z_{H1}$  и  $Z_{H2}$  связаны соотношением

$$Z_H = Z'_H + \frac{Z_{H1}Z_{H2}}{Z_{H1} + Z_{H2}}.$$



**Рис. 2.5. Трехобмоточные трансформатор и автотрансформатор с расщепленной на две части обмоткой низшего напряжения:**  
*a* – исходные схемы; *б* – схема замещения

Таким образом, сопротивления ветвей схемы замещения в относительных единицах при номинальных условиях трансформатора (автотрансформатора) составляют

$$\left. \begin{aligned} Z_{*B(\text{ном})} &= 0,5 \frac{(u_{к\text{ B-C}} + u_{к\text{ B-H}} - u_{к\text{ C-H}})}{100}; \\ Z_{*C(\text{ном})} &= 0,5 \frac{(u_{к\text{ B-C}} + u_{к\text{ C-H}} - u_{к\text{ B-H}})}{100}; \\ Z_{*H1(\text{ном})} &= Z_{*H2(\text{ном})} = 0,5 \frac{u_{к\text{ H1-H2}}}{100}; \\ Z'_{*H(\text{ном})} &= Z_{*H(\text{ном})} - 0,25 \frac{u_{к\text{ H1-H2}}}{100}, \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

где  $Z_{*H(\text{ном})} = 0,5 \frac{(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С})}{100}$ .

Схема замещения трехобмоточного трансформатора (автотрансформатора), у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на три части, отличается от рассмотренной схемы лишь тем, что обмотка низшего напряжения представлена четырёхлучевой звездой с сопротивлениями  $Z'_{Н1}$ ,  $Z_{Н1}$ ,  $Z_{Н2}$  и  $Z_{Н3}$ , причем

$$Z_{*Н3(\text{ном})} = Z_{*Н1(\text{ном})} = Z_{*Н2(\text{ном})} = 0,5 \frac{u_{кН1-Н2}}{100},$$

а

$$Z'_{*Н(\text{ном})} = Z_{*Н(\text{ном})} - 0,167 \frac{u_{кН1-Н2}}{100}.$$

## 2.7. Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора

Схема замещения сдвоенного токоограничивающего реактора представляет собой трехлучевую звезду (рис. 2.6). Индуктивное сопротивление ветви со стороны среднего зажима (т.е. зажима, обращенного в сторону источника энергии)

$$X_C = -K_{св} X_{LR}, \quad (2.44)$$

а индуктивные сопротивления двух других ветвей одинаковы и составляют

$$X_{Н1} = X_{Н2} = (1 + K_{св}) X_{LR}. \quad (2.45)$$

В этих формулах  $K_{св}$  – коэффициент связи между ветвями реактора, а  $X_{LR}$  – номинальное индуктивное сопротивление реактора, т.е. индуктивное сопротивление одной ветви реактора при отсутствии тока в другой ветви.

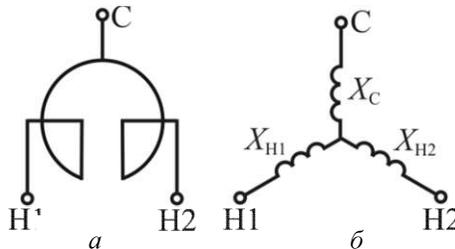


Рис. 2.6. Сдвоенный токоограничивающий реактор:  
а – исходная схема; б – схема замещения

## 2.8. 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:

$$E_{\text{эк}} = \frac{\frac{E_1}{X_1} + \frac{E_2}{X_2} + \dots + \frac{E_n}{X_n}}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}} \quad (2.46)$$

и

$$X_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}}, \quad (2.47)$$

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.

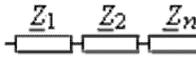
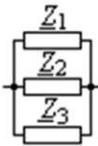
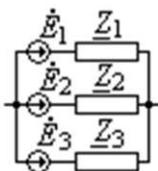
При более сложных исходных схемах замещения для определения эквивалентного сопротивления используют известные способы преобразования, такие как преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений, звезду сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений, многолучевую звезду сопротивлений в полный многоугольник сопротивлений и т.д. (табл. 2.1).

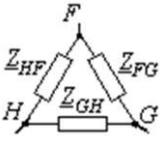
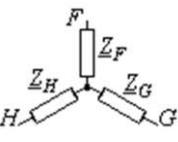
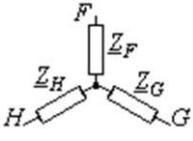
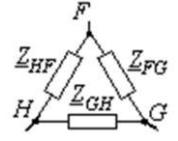
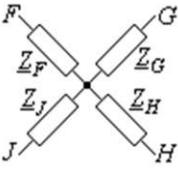
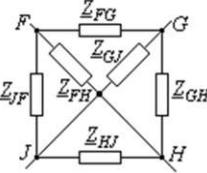
В тех случаях, когда исходная схема замещения симметрична относительно расчетной точки короткого замыкания или какая-либо часть этой схемы симметрична относительно некоторой промежуточной точки, то задачу нахождения эквивалентного сопротивления можно существенно облегчить, соединяя на исходной схеме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

Еще более просто преобразуются схемы замещения обратной и нулевой последовательностей, так как они не содержат ЭДС.

Таблица 2.1

Основные формулы преобразования схем

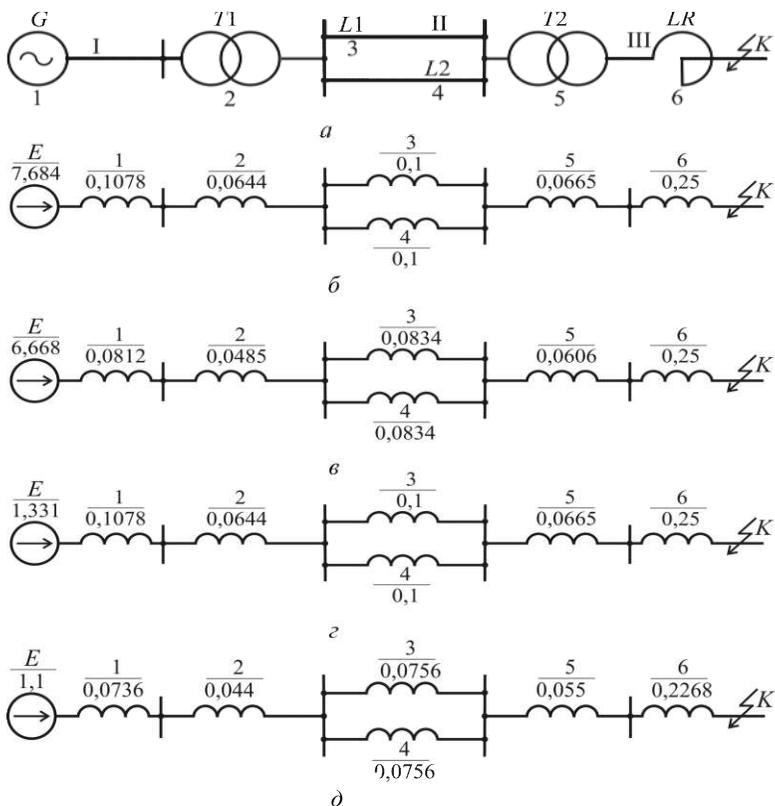
Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Эквивалентный элемент преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}},$ <p>где</p> $\underline{Y}_{эк} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n;$ $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2};$ $\underline{Y}_n = \frac{1}{\underline{Z}_n}$ <p>При двух ветвях</p> $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$\dot{E}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \sum_{k=1}^n \underline{Y}_k \dot{E}_k$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$

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			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y} \text{ и т.д.,}$ <p>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>

### 2.9. Примеры решения задач

*Задача 1.* Определить периодическую составляющую тока в начальный момент трехфазного короткого замыкания в точке *K* расчетной схемы рис. 2.7,а. При этом составить схему замещения с исключением трансформаторных связей путем приведения параметров всех элементов различных ступеней напряжения к одной ступени с

учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов и коэффициентов трансформации, определенных по средним номинальным напряжениям. Расчет произвести в именованных и относительных базисных единицах.



**Рис. 2.7. Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения при решении 1 (б), решении 2 (в), решении 3 (з) и решении 4 (д):**  
 1 – генератор; 2, 5 – трансформаторы; 3, 4 – линии электропередачи;  
 б – токоограничивающий реактор

*Исходные данные:*

- генератор  $G$ :  $P_{\text{ном}} = 220 \text{ МВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 15,75 \text{ кВ}$ ;  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;

$$X_{*d(\text{ном})}'' = 0,1906; \quad E_{*(\text{ном})}'' = 1,1;$$

- трансформатор  $T1$ :  $S_{\text{ном}} = 250 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $U_{\text{Вном}} = 242 \text{ кВ}$ ;  
 $U_{\text{Нном}} = 15,75 \text{ кВ}$ ;  $u_{\text{к}} = 11 \%$ ;

- трансформатор  $T2$ :  $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $U_{\text{Вном}} = 220 \text{ кВ}$ ;  
 $U_{\text{Нном}} = 11 \text{ кВ}$ ;  $u_{\text{к}} = 11\%$ ;

- линии электропередачи L1 и L2:  $l = 100$  км;  $X_{\text{лиог}} = 0,4$  Ом/км;
- токоограничивающий реактор LR:  $X_{LR} = 0,25$  Ом.

Для всех способов расчета, перечисленных в условии задачи, конфигурация схем замещения одинакова (см. рис. 2.7, б – д), а значения параметров ее элементов различны. На рис. 2.7, а римскими цифрами обозначены ступени напряжения, а арабскими – номера элементов исходной расчетной и схем замещения.

За основную ступень напряжения примем ступень III.

Решение 1 проведем в именованных единицах с учетом фактических коэффициентов трансформации.

Значения параметров схемы замещения, приведенной на рис. 2.7,б:

$$\overset{\circ}{E}^n = E_{* (\text{ном})}'' \frac{U_{\text{ном I}}}{\sqrt{3}} n_1 n_2 = 1,1 \cdot \frac{15,75}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{242}{15,75} \right) \cdot \left( \frac{11}{220} \right) = 7,684 \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_1 &= X_{* d(\text{ном})}'' \frac{U_{\text{ном I}}^2}{P_{\text{ном}} / \cos \varphi_{\text{ном}}} n_1^2 n_2^2 = \\ &= 0,1906 \frac{15,75^2}{220/0,85} \cdot \left( \frac{242}{15,75} \right)^2 \cdot \left( \frac{11}{220} \right)^2 = 0,1078 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\overset{\circ}{X}_2 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном II}}^2}{S_{\text{ном}}} n_2^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{242^2}{250} \left( \frac{11}{220} \right)^2 = 0,0644 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_3 = \overset{\circ}{X}_4 = X_{\text{лиог}} l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot \left( \frac{11}{220} \right)^2 = 0,1 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_5 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном III}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{11^2}{200} = 0,0665 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_6 = X_{LR} = 0,25 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_{\text{ЭК}} &= \overset{\circ}{X}_1 + \overset{\circ}{X}_2 + \overset{\circ}{X}_3 // \overset{\circ}{X}_4 + \overset{\circ}{X}_5 + \overset{\circ}{X}_6 = \\ &= 0,1078 + 0,0644 + 0,1 / 2 + 0,0665 + 0,25 = 0,5387 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока в начальный момент короткого замыкания

$$I_{\text{п0}} = \frac{\overset{\circ}{E}^n}{\overset{\circ}{X}_{\text{ЭК}}} = \frac{7,684}{0,5387} = 14,26 \text{ кА}.$$

Решение 2 проведем в именованных единицах с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов, определенных по средним номинальным напряжениям.

Средние номинальные напряжения, соответствующие напряжениям расчетной схемы составляют:  $U_{\text{ср I}} = 15,75$  кВ;  $U_{\text{ср II}} = 230$  кВ;  $U_{\text{ср III}} = 10,5$  кВ.

Значения параметров схемы замещения, приведенной на рис. 2.7,в:

$$\overset{\circ}{E}'' = E_{* (\text{НОМ})}'' \frac{U_{\text{ср I}}}{\sqrt{3}} n_1 n_2 = 1,1 \cdot \frac{15,75}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{230}{15,75} \right) \cdot \left( \frac{10,5}{230} \right) = 6,668 \text{ кВ};$$

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_1 &= X_{* \text{д}(\text{НОМ})}'' \frac{U_{\text{ср I}}^2}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} n_1^2 n_2^2 = \\ &= 0,1906 \frac{15,75^2}{220/0,85} \cdot \left( \frac{230}{15,75} \right)^2 \cdot \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,0812 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\overset{\circ}{X}_2 = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср II}}^2}{S_{\text{НОМ}}} n_2^2 = \frac{11}{100} \cdot \frac{230^2}{250} \cdot \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,0485 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_3 = \overset{\circ}{X}_4 = X_{\text{шот}} l \cdot n_2^2 = 0,4 \cdot 100 \cdot \left( \frac{10,5}{230} \right)^2 = 0,0834 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_5 = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср III}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{10,5^2}{200} = 0,0606 \text{ Ом};$$

$$\overset{\circ}{X}_6 = X_{LR} = 0,25 \text{ Ом}.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{X}_{\text{эк}} &= \overset{\circ}{X}_1 + \overset{\circ}{X}_2 + \overset{\circ}{X}_3 // \overset{\circ}{X}_4 + \overset{\circ}{X}_5 + \overset{\circ}{X}_6 = \\ &= 0,0812 + 0,0485 + 0,0834 / 2 + 0,0606 + 0,25 = 0,482 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока в начальный момент короткого замыкания

$$I_{\text{ш0}} = \frac{\overset{\circ}{E}''}{\overset{\circ}{X}_{\text{эк}}} = \frac{6,668}{0,482} = 13,83 \text{ кА}.$$

Решение 3 проведем в относительных единицах с учетом фактических коэффициентов трансформации трансформаторов при базисных условиях:  $S_{\text{б}} = 100$  МВ·А и  $U_{\text{б III}} = 10$  кВ.

Базисный ток основной ступени напряжения и базисные напряжения остальных ступеней напряжения соответственно равны:

$$I_{6\text{ III}} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{6\text{ III}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} = 5,7735 \text{ кА};$$

$$U_{6\text{ II}} = U_{6\text{ III}} \frac{1}{n_2} = 10 \cdot \frac{220}{11} = 200 \text{ кВ};$$

$$U_{6\text{ I}} = U_{6\text{ III}} \frac{1}{n_1 n_2} = 10 \cdot \frac{220}{11} \cdot \frac{15,75}{242} = 13,016 \text{ кВ}.$$

Значения параметров схемы замещения, приведенной на рис. 2.7,е:

$$E_{* (6)}'' = E_{* (\text{НОМ})}'' \frac{U_{\text{НОМ I}}}{U_{6\text{ I}}} = 1,1 \cdot \frac{15,75}{13,016} = 1,331;$$

$$X_{* 1(6)}'' = X_{* \text{д(НОМ)}}'' \frac{S_{\delta}}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ I}}^2}{U_{6\text{ I}}^2} = 0,1906 \cdot \frac{100}{220/0,85} \cdot \frac{15,75^2}{13,016^2} = 0,1078;$$

$$X_{* 2(6)}'' = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ I}}^2}{U_{6\text{ I}}^2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{250} \cdot \frac{15,75^2}{13,016^2} = 0,0644;$$

$$X_{* 3(6)}'' = X_{* 4(6)}'' = X_{\text{шог}} l \frac{S_{\delta}}{U_{6\text{ II}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{200^2} = 0,1;$$

$$X_{* 5(6)}'' = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ III}}^2}{U_{6\text{ III}}^2} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{200} \cdot \frac{11^2}{10^2} = 0,0665;$$

$$X_{* 6(6)}'' = X_{LR} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{6\text{ III}}^2} = 0,25 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,25.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$\begin{aligned} X_{* \text{эк}(6)}'' &= X_{* 1(6)}'' + X_{* 2(6)}'' + X_{* 3(6)}'' // X_{* 4(6)}'' + X_{* 5(6)}'' + X_{* 6(6)}'' = \\ &= 0,1078 + 0,0644 + 0,1/2 + 0,0665 + 0,25 = 0,5387. \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока в начальный момент короткого замыкания в относительных единицах

$$I_{* \text{п0}(6)}'' = \frac{E_{* (6)}''}{X_{* \text{эк}(6)}''} = \frac{1,331}{0,5387} = 2,471$$

или в именованных единицах

$$I_{\text{п0}} = I_{* \text{п0}(6)}'' I_{6\text{ III}} = 2,471 \cdot 5,7735 = 14,26 \text{ кА}.$$

Решение 4 проведем в относительных единицах с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов, определенных по средним номинальным напряжениям, при базисных условиях:  $S_6 = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  и  $U_{6 \text{ III}} = 10,5 \text{ кВ}$  (за базисное напряжение принято среднее номинальное напряжение).

Базисный ток основной ступени напряжения равен:

$$I_{6 \text{ III}} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6 \text{ III}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА}.$$

Базисные напряжения остальных ступеней принимаем равными средним номинальным напряжениям, т.е.  $U_{6 \text{ II}} = 230 \text{ кВ}$  и  $U_{6 \text{ I}} = 15,75 \text{ кВ}$ . В этом случае отношение  $\frac{U_{\text{ном}}}{U_6}$  для каждой ступени напряжения будет равно единице, что упрощает формулы приведения.

С учетом сказанного значения параметров схемы замещения, приведенной на рис. 2.7, д):

$$E_{* (6)}'' = E_{* (\text{ном})}'' = 1,1;$$

$$X_{* 1(6)}'' = X_{* d(\text{ном})}'' \frac{S_6}{P_{\text{ном}} / \cos \varphi_{\text{ном}}} = 0,1906 \cdot \frac{100}{220/0,85} = 0,0736;$$

$$X_{* 2(6)}'' = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{250} = 0,044;$$

$$X_{* 3(6)}'' = X_{* 4(6)}'' = X_{\text{лпог}} \frac{S_6}{U_{6 \text{ II}}^2} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{100}{230^2} = 0,0756;$$

$$X_{* 5(6)}'' = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{200} = 0,055;$$

$$X_{* 6(6)}'' = X_{LR} \cdot \frac{S_6}{U_{6 \text{ III}}^2} = 0,25 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,2268.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$\begin{aligned} X_{* \text{зк}(6)}'' &= X_{* 1(6)}'' + X_{* 2(6)}'' + X_{* 3(6)}'' // X_{* 4(6)}'' + X_{* 5(6)}'' + X_{* 6(6)}'' = \\ &= 0,0736 + 0,044 + 0,0756 / 2 + 0,055 + 0,2268 = 0,4372. \end{aligned}$$

Периодическая составляющая тока в начальный момент короткого замыкания в относительных единицах

$$I_{* \text{н0}(6)}'' = \frac{E_{* (6)}''}{X_{* \text{зк}(6)}''} = \frac{1,1}{0,4372} = 2,516$$



*Исходные данные:*

- генераторы  $G1$  и  $G2$ :  $P_{\text{ном}} = 63$  МВт;  $U_{\text{ном}} = 10,5$  кВ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ ;  $X_{*d(\text{ном})} = 0,136$ ; до короткого замыкания генераторы работали в режиме холостого хода с номинальным напряжением;
- трансформаторы  $T1$  и  $T2$ :  $S_{\text{ном}} = 40$  МВ·А;  $n_T = 121/10,5$  кВ;  $u_k = 10,5$  %;
- автотрансформатор  $AT$ :  $S_{\text{ном}} = 125$  МВ·А;  $n = 230/121/10,5$  кВ;  $u_{кВ-С} = 11\%$ ;  $u_{кВ-Н} = 32\%$ ;  $u_{кС-Н} = 20\%$ ;
- энергетическая система  $GS$ :  $S_{\text{ном}} = 2000$  МВ·А;  $X_{*(\text{ном})} = 1,0$ ;
- реактор  $IR$ :  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ;  $I_{\text{ном}} = 2500$  А;  $X_{IR} = 0,35$  Ом;
- линии электропередачи  $L1$  и  $L2$ :  $l = 50$  км;  $X_{\text{пор}} = 0,4$  Ом/км.

*Решение.* Исходная схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 2.8,б.

Обмотка низшего напряжения автотрансформатора не нагружена, поэтому в схему замещения прямой последовательности она не вводится.

В качестве базисных единиц выбираем  $S_b = 100$  МВ·А и  $U_{бI} = 121$  кВ. По формуле (2.26) определяем базисные напряжения других ступеней:

$$U_{бII} = \frac{121}{\frac{121}{10,5}} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$U_{бIII} = \frac{121}{\frac{121}{230}} = 230 \text{ кВ}$$

и

$$U_{бIV} = \frac{121}{\frac{121}{10,5}} = 10,5 \text{ кВ};$$

По формуле (2.10) вычисляем

$$X_{*1(б)} = X_{*2(б)} = 0,136 \cdot \frac{100}{63} \cdot \frac{10,5^2}{10,5^2} = 0,173;$$

$$X_{*3(б)} = X_{*4(б)} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} \cdot \frac{10,5^2}{10,5^2} = 0,2625.$$

Для автотрансформатора по формуле (2.39) находим значения:

$$X_{* В(ном)} = 0,005(11 + 32 - 20) = 0,115 ;$$

$$X_{* С(ном)} = 0,005(11 + 20 - 32) = 0 ;$$

$$X_{* Н(ном)} = 0,005(32 + 20 - 11) = 0,205 .$$

И определяем

$$X_{* 5(б)} = 0 \text{ и } X_{* 6(б)} = 0,115 \cdot \frac{100}{125} \cdot \frac{230^2}{230^2} = 0,092 .$$

Для энергетической системы обычно принимают  $E = U_{ном} = U_{ср}$ , поэтому

$$X_{* 8(б)} = 1,1 \cdot \frac{100}{2000} \cdot \frac{230^2}{230^2} = 0,055 .$$

По формуле (2.7) для реактора и линий электропередачи имеем

$$X_{* 9(б)} = 0,35 \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,317 ;$$

$$X_{* 10(б)} = X_{* 11(б)} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{121^2} = 0,1366 .$$

ЭДС генераторов

$$E_{* 1(б)} = E_{* 2(б)} = \frac{E}{U_{бш}} = \frac{10,5}{10,5} = 1,0 .$$

ЭДС энергетической системы

$$E_{* 3(б)} = \frac{U_{ср.ном}}{U_{бш}} = \frac{230}{230} = 1,0 .$$

Поскольку  $E_{* 1(б)} = E_{* 2(б)}$ ,  $X_{* 1(б)} = X_{* 2(б)}$  и  $X_{* 3(б)} = X_{* 4(б)}$ , то при коротком замыкании в точке  $K$  потенциалы с обеих сторон реактора одинаковы, поэтому он может быть закорочен или исключен. Это упрощает задачу преобразования схемы:

$$X_{* 12(б)} = X_{* 1(б)} + X_{* 3(б)} + X_{* 10(б)} = 0,173 + 0,2625 + 0,1366 = 0,5721 ;$$

$$X_{* 13(б)} = X_{* 2(б)} + X_{* 4(б)} + X_{* 11(б)} = 0,173 + 0,2625 + 0,1366 = 0,5721 ;$$

$$E_{*4(6)} = E_{*1(6)} // E_{*2(6)} = \frac{E_{*1(6)} \cdot Y_{*13(6)} + E_{*2(6)} \cdot Y_{*12(6)}}{X_{*13(6)} + X_{*12(6)}} = \frac{1 \cdot 0,5721 + 1 \cdot 0,5721}{0,5721 + 0,5721} = 1,0 ;$$

$$X_{*14(6)} = X_{*12(6)} // X_{*13(6)} = \frac{X_{*12(6)} \cdot X_{*13(6)}}{X_{*12(6)} + X_{*13(6)}} = \frac{0,5721 \cdot 0,5721}{0,5721 + 0,5721} = 0,286 ;$$

$$X_{*15(6)} = X_{*5(6)} + X_{*6(6)} + X_{*8(6)} = 0 + 0,092 + 0,055 = 0,147 ;$$

$$X_{*3K(6)} = X_{*14(6)} // X_{*15(6)} = \frac{X_{*14(6)} \cdot X_{*15(6)}}{X_{*14(6)} + X_{*15(6)}} = \frac{0,286 \cdot 0,147}{0,286 + 0,147} = 0,097 ;$$

$$E_{*3K(6)} = E_{*3(6)} // E_{*4(6)} = \frac{E_{*3(6)} \cdot Y_{*14(6)} + E_{*4(6)} \cdot Y_{*15(6)}}{Y_{*14(6)} + Y_{*15(6)}} = \frac{1 \cdot 0,286 + 1 \cdot 0,147}{0,268 + 0,147} = 1,0 .$$

Эквивалентная схема замещения прямой последовательности, полученная в результате преобразований исходной схемы замещения, представлена на рис. 2.8,в.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ, ПОДКЛЮЧЕННЫХ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 3.1. Переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в цепи без трансформаторов

Рассмотрим переходный процесс при трехфазном коротком замыкании в симметричной трехфазной цепи, содержащей два последовательно соединенных участка с активными сопротивлениями фаз соответственно  $R_K$  и  $R_{CL}$ , индуктивностями  $L_K$  и  $L_{CL}$  и взаимными индуктивностями  $M_K$  и  $M_{CL}$  (рис. 3.1,а).

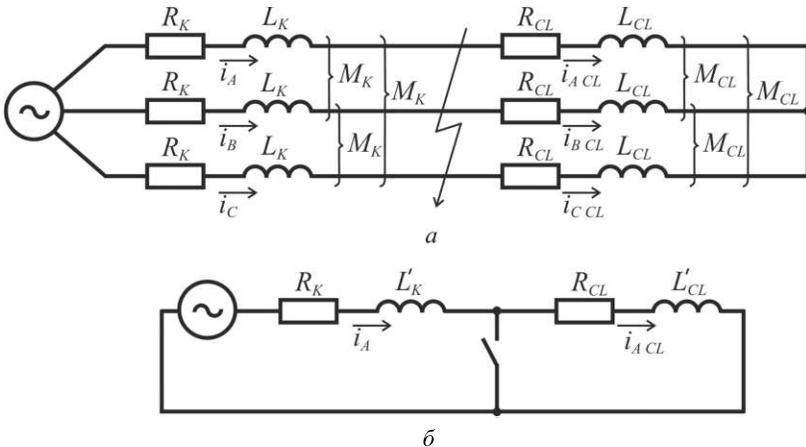


Рис. 3.1. Трехфазная электрическая цепь (а)  
и ее однофазная схема замещения (б)

При трехфазном коротком замыкании в месте соединения этих участков часть цепи с  $R_{CL}$ ,  $L_{CL}$ ,  $M_{CL}$  оказывается замкнутой накоротко, поэтому дифференциальное уравнение, связывающее токи и падения напряжения в фазе  $A$  в переходном процессе, имеет вид

$$0 = R_{CL}i_{ACL} + L_{CL} \frac{di_{ACL}}{dt} + M_{CL} \frac{di_{BCL}}{dt} + M_{CL} \frac{di_{CCL}}{dt}. \quad (3.1)$$

Но  $i_{ACL} + i_{BCL} + i_{CCL} = 0$ , поэтому

$$\frac{di_{BCL}}{dt} + \frac{di_{CCL}}{dt} = -\frac{di_{ACL}}{dt}.$$

Следовательно, уравнение (3.1) можно представить в виде

$$0 = R_{CL}i_{ACL} + L'_{CL} \frac{di_{ACL}}{dt}, \quad (3.1a)$$

где  $L'_{CL} = L_{CL} - M_{CL}$  – результирующая индуктивность одной фазы с учетом влияния двух других фаз.

Уравнению (3.1a) соответствует характеристическое уравнение

$$pI'_{CL} + R_{CL} = 0,$$

корень которого  $p = -\frac{R_{CL}}{L'_{CL}}$ , поэтому

$$i_{ACL} = i_{a0CL} e^{-\frac{t}{T_{aCL}}}, \quad (3.2)$$

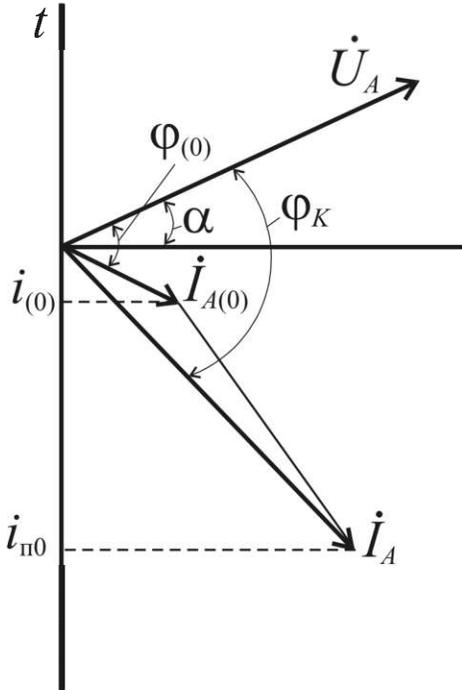
где  $i_{a0CL}$  – начальное значение аperiodической составляющей тока в правом участке цепи;  $T_{aCL} = \frac{L'_{CL}}{R_{CL}}$  – постоянная времени этого участка цепи.

Очевидно, токи других фаз также являются свободными и затухают по экспоненциальному закону с той же постоянной времени  $T_{aCL}$ . А начальные значения токов отдельных фаз равны мгновенным значениям токов соответствующих фаз к моменту короткого замыкания, так как в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью ток в момент коммутации не может измениться скачком.

В отличие от уравнения (3.1) дифференциальное уравнение, связывающее токи и падения напряжения в фазе  $A$  участка цепи, который при коротком замыкании остался присоединенным к источнику напряжения, является неоднородным

$$u_A = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R_K i_A + L_K \frac{di_A}{dt} + M_K \frac{di_B}{dt} + M_K \frac{di_C}{dt}, \quad (3.3)$$

где  $\alpha$  – фаза возникновения короткого замыкания, т.е. фаза напряжения источника к моменту замыкания (на векторной диаграмме для фазы  $A$ , показанной на рис. 3.2, это угол между вектором напряжения этой фазы к моменту короткого замыкания и перпендикуляром к оси времени, проведенным через начало вектора напряжения).



**Рис. 3.2. Векторная диаграмма напряжения и тока фазы  $A$  к моменту короткого замыкания и периодической составляющей тока этой фазы в начальный момент короткого замыкания**

Поскольку  $i_A + i_B + i_C = 0$ , то (3.3) можно представить в виде

$$u_A = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R_K i_A + L'_K \frac{di_A}{dt}, \quad (3.3a)$$

где  $L'_K = L_K - M_K$ .

Уравнениям (3.1а) и (3.3а) соответствует однофазная схема замещения, показанная на рис. 3.1,б. Таким образом, анализ переходного процесса в трехфазной цепи можно свести к анализу этого процесса в однофазной цепи, если предварительно учесть влияние на рассматриваемую фазу токов двух других фаз.

Поскольку уравнение (3.3а) является неоднородным, то ток в переходном процессе содержит принужденную и свободную составляющие, причем первая представляет собой синусоидальную функцию, а вторая затухает по экспоненциальному закону, т.е.

$$i_A = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (3.4)$$

где  $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_K^2 + (\omega L'_K)^2}}$  – максимальное значение (амплитуда) периодической составляющей тока короткого замыкания на участке цепи, который при коротком замыкании остался присоединенным к источнику напряжения;

$\varphi_K = \arctg \frac{\omega L'_K}{R_K}$  – угол сдвига по фазе периодической составляющей тока короткого замыкания по отношению к напряжению;

$T_a = \frac{L'_K}{R_K}$  – постоянная времени рассматриваемого участка цепи.

Начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания  $i_{a0}$  определяется из условия, что ток в цепи с индуктивностью к моменту короткого замыкания, т.е.  $i_{(0)}$  равен току в начальный момент короткого замыкания, представляющему собой сумму начальных значений периодической и аperiodической составляющих, т.е.

$$i_{(0)} = i_{п0} + i_{a0}$$

или

$$I_{m0} \sin(\alpha - \varphi) = I_m \sin(\alpha - \varphi_K) + i_{a0},$$

где  $I_{m0} = \frac{U_m}{\sqrt{(R_K + R_{CL})^2 + (\omega L'_K + \omega L'_{CL})^2}}$  – амплитуда синусоидального тока в цепи к моменту короткого замыкания;  $\varphi_K$  – угол сдвига по фазе этого тока по отношению к напряжению.

Таким образом,  $i_{a0} = i_{(0)} - i_{п0} = I_{m0} \sin(\alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi_K)$ .

На векторной диаграмме рис. 3.2 показаны вектор тока фазы  $A$  до короткого замыкания  $\dot{I}_A$  и вектор периодической составляющей тока этой же фазы  $\dot{I}'_A$  в начальный момент короткого замыкания и их проекции на ось времени соответственно  $i_{(0)}$  и  $i_{п0}$ . Очевидно, модуль начального значения аperiodической составляющей тока короткого замыкания равен проекции на ось времени отрезка прямой,

соединяющей концы векторов  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_A$ . При этом легко увидеть, что начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания зависит от параметров участка цепи, который при коротком замыкании остался присоединенным к источнику напряжения, фазы возникновения короткого замыкания, а также от тока в цепи до короткого замыкания и сдвига по фазе этого тока по отношению к напряжению. При некотором значении фазы возникновения короткого

замыкания, когда прямая, соединяющая концы векторов  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_A$ , оказывается параллельной оси времени, начальное значение аperiodической составляющей максимально. Если же в момент короткого замыкания эта прямая перпендикулярна оси времени, то  $i_{a0} = 0$ , т.е. при этом условии сразу наступает установившийся режим. Что касается влияния тока в цепи до короткого замыкания и его фазы на начальное значение аperiodической составляющей, то его наибольшее значение возможно в том случае, если до короткого замыкания нагрузка имела активно-емкостной характер, т.е. ток по фазе опережал напряжение. При этом начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания может превысить амплитуду периодической составляющей тока короткого замыкания. Однако случай, когда нагрузка имеет активно-емкостной характер, в электроэнергетических системах маловероятен и в качестве расчетного обычно принимают условие, что до короткого замыкания ток в цепи отсутствовал. При этом начальные значения аperiodической и периодической составляющих тока короткого замыкания по модулю равны, но противоположны по знаку, т.е.

$$i_{a0} = -i_{п0} = -I_m \sin(\alpha - \varphi_K).$$

В этом случае полный ток короткого замыкания

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_m \sin(\alpha - \varphi_K) e^{-\frac{t}{T_d}}. \quad (3.5)$$

Наличие в токе короткого замыкания аperiodической составляющей приводит к смещению кривой полного тока относительно оси времени (рис. 3.3) и к тому, что мгновенное значение полного тока короткого замыкания, особенно при первом совпадении по знаку периодической и аperiodической составляющих, может существенно превышать амплитуду периодической составляющей тока короткого замыкания.

Начальные значения аperiodической составляющей тока короткого замыкания в разных фазах в общем случае неодинаковы. Однако не они определяют, в какой из фаз и при каких условиях значение суммарного тока короткого замыкания может оказаться макси-

мально возможным (при принятом условии, что до короткого замыкания ток в цепи отсутствовал). На рис. 3.4 представлены векторные диаграммы напряжения и периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания для двух крайних случаев: первый – короткое замыкание происходит в момент, когда в расчетной фазе (обычно в качестве расчетной принимают фазу  $A$ ) периодическая и апериодическая составляющие тока короткого замыкания максимальны (рис. 3.4, $a$ ); второй – короткое замыкание происходит в такой момент, когда напряжение расчетной фазы проходит через нулевое значение, т.е. фаза возникновения короткого замыкания  $\alpha = 0$  (рис. 3.4, $b$ ). Чтобы убедиться, какой из них является расчетным, т.е. в каком случае суммарный ток короткого замыкания оказывается максимально возможным, следует выражения для мгновенного значения тока короткого замыкания (3.5), в котором независимыми переменными являются время  $t$  и фаза включения короткого замыкания  $\alpha$ , взять частные производные  $\partial i / \partial t$  и  $\partial i / \partial \alpha$ , приравнять полученные выражения нулю и совместно решить полученные уравнения. При этом оказывается, что максимально возможный ток короткого замыкания, который называется ударным током, наступает в том случае, если в момент короткого замыкания напряжение расчетной фазы проходит через нулевое значение, т.е. во втором случае.

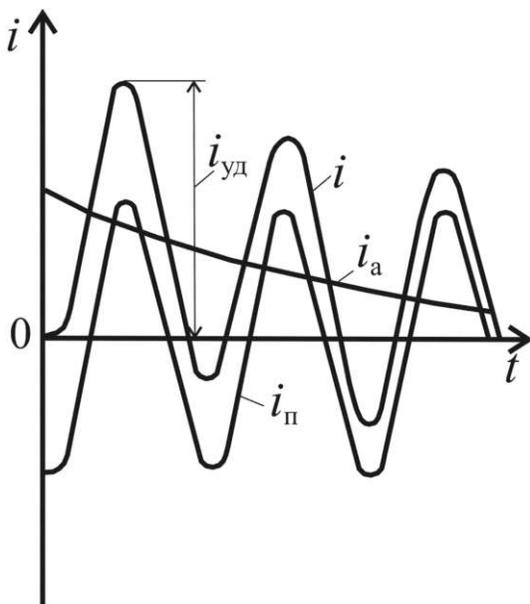


Рис. 3.3. Изменение во времени тока короткого замыкания и его составляющих

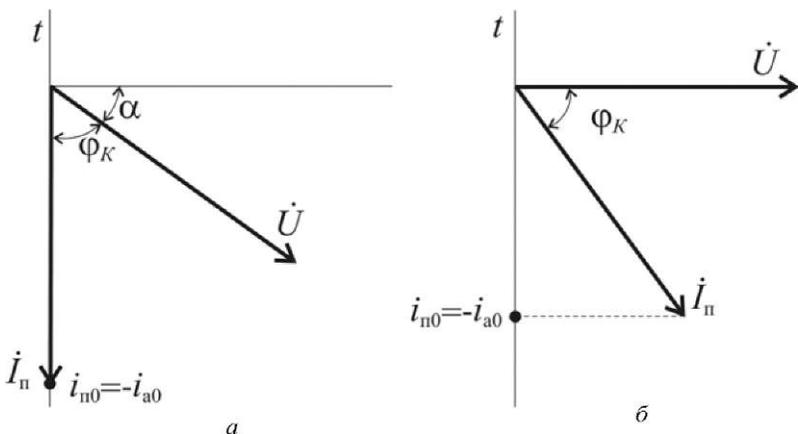


Рис. 3.4. Векторные диаграммы тока и напряжения при коротком замыкании:

$a - \alpha \neq 0$ ;  $b - \alpha = 0$

Таким образом ударный ток короткого замыкания – это 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 отсутствовал.

В частном случае, когда в цепи преобладает индуктивность, т.е.  $\varphi_K \approx \pi/2$ , при коротком замыкании в момент перехода напряжения через нуль начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания оказывается близким к амплитуде периодической составляющей тока короткого замыкания. При этом ударный ток наступает практически через полпериода, т.е. при частоте 50 Гц примерно через 0,01с с момента возникновения короткого замыкания. Поэтому для определения ударного тока короткого замыкания обычно используют выражение

$$i_{уд} = I_m + I_m e^{-\frac{0,01}{T_a}} = I_m K_{уд}, \quad (3.6)$$

где  $K_{уд}$  – так называемый ударный коэффициент, который показывает, во сколько раз ударный ток больше амплитуды периодической составляющей тока короткого замыкания.

Значение ударного коэффициента вычисляется по формуле

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}. \quad (3.7)$$

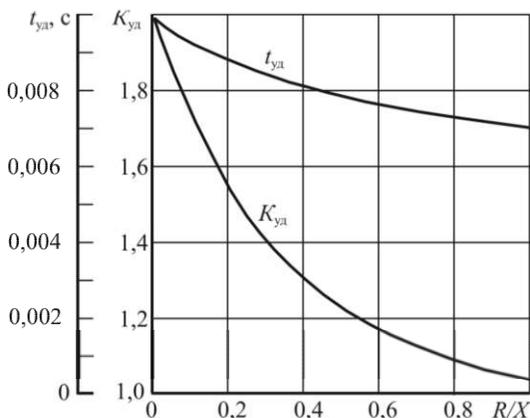
При увеличении в цепи доли активного сопротивления уменьшается время  $t_{уд}$  от момента возникновения короткого замыкания (совпадающего с моментом перехода напряжения фазы через нуль) до момента, когда полный ток короткого замыкания становится ударным (кривая  $t_{уд} = f(R/X)$  на рис. 3.5). Поэтому при небольших отношениях индуктивного и активного сопротивлений в цепи, в частности, при  $X/R < 5$  использование формулы (3.7) для ударного коэффициента приводит к существенной погрешности. Точные значения ударного коэффициента и времени появления ударного тока при любых отношениях  $X/R$  можно определить, используя выражение

$$\frac{i}{I_m} = \sin(\omega t - \varphi_K) + \sin \varphi_K e^{-\frac{t}{T_a}},$$

которое следует из (3.5) при  $\alpha = 0$ . С этой целью необходимо последнее выражение продифференцировать по времени и найти максимум отношения  $\frac{i}{I_m}$  и  $t_{уд}$ . Однако такой способ связан с большой вычислительной работой. Поэтому при  $X/R < 5$  ( т.е. при  $R/X > 0,2$ ) для определения ударного коэффициента целесообразно использовать кривую  $K_{уд} = f(R/X)$ , представленную на рис. 3.5, или формулу

$$K_{уд} = 1 + e^{-\frac{0,01(0,5 + \varphi_K/\pi)}{T_a}}, \quad (3.8)$$

обеспечивающую достаточную точность вычислений при любых отношениях  $X/R$ , встречающихся в реальных условиях.



**Рис. 3.5. Зависимость ударного коэффициента и времени появления ударного тока короткого замыкания от отношения активного и индуктивного сопротивлений цепи**

В зарубежной практике широко используется формула

$$K_{\text{ул}} = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{\omega T_a}}, \quad (3.9)$$

которая при изменении  $X/R$  от 0,8 до бесконечности даст погрешность, не превышающую 0,6%.

### 3.2. Особенности переходного процесса при трехфазном коротком замыкании в разветвленной цепи

При коротком замыкании в разветвленной цепи, ветви которой имеют только индуктивное и активное сопротивление, свободная составляющая тока короткого замыкания (и тока любой ветви) представляет собой сумму показательных (экспоненциальных) функций времени, затухающих с различными постоянными времени, т.е.

$$i_{af} = i_{a01}e^{-\frac{t}{T_{a1}}} + i_{a02}e^{-\frac{t}{T_{a2}}} + \dots + i_{a0n}e^{-\frac{t}{T_{an}}}, \quad (3.10)$$

где  $i_{a01}, i_{a02}, \dots, i_{a0n}$  – начальные значения отдельных слагающих апериодической составляющей тока короткого замыкания;  $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}$  – постоянные времени затухания соответствующих экспоненциальных слагающих апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Число экспоненциальных слагающих  $n$  определяется степенью характеристического уравнения, которая в цепи с активно-индуктивными ветвями равна числу независимых контуров электрической цепи. При этом как начальные значения отдельных экспоненциальных слагающих  $i_{a01}, i_{a02}, \dots, i_{a0n}$ , так и значения соответствующих постоянных времени  $T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}$  зависят от параметров всей схемы (значения  $i_{a01}, i_{a02}, \dots, i_{a0n}$  зависят также от начальных условий). Поэтому их определение связано с чрезвычайно большой вычислительной работой. Чтобы ее уменьшить и упростить, часто выполняют приближенные расчеты апериодической составляющей тока короткого замыкания. Они основаны на допущении, что в разветвленной цепи при любом числе независимых контуров апериодическая составляющая тока короткого замыкания изменяется во времени по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени  $T_{\text{эк}}$ , т.е.

$$i_{af} = i_{a0}e^{-\frac{t}{T_{\text{эк}}}}, \quad (3.11)$$

где  $i_{a0}$  – начальное значение аperiodической составляющей тока короткого замыкания, определяемое как и в неразветвленной цепи начальным значением периодической составляющей тока короткого замыкания и током к моменту короткого замыкания.

Существует несколько способов определения эквивалентной постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания, которые отличаются друг от друга методикой получения необходимых для расчета этой постоянной времени значений эквивалентного индуктивного и эквивалентного активного сопротивлений расчетной схемы. Наибольшее применение нашли следующие способы:

- с использованием составляющих комплексного эквивалентного (входного) сопротивления расчетной схемы, найденного при промышленной частоте;
- с использованием индуктивного и активного сопротивлений, найденных при поочередном исключении из расчетной схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений;
- с использованием составляющих комплексного результирующего (входного) сопротивления расчетной схемы, найденного при некоторой оптимальной частоте.

При первом способе эквивалентная постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания находится как

$$T_{a_{эк}} = \frac{\text{Im } Z_{эк}}{\omega \text{ Re } Z_{эк}}, \quad (3.12)$$

где  $\underline{Z}_{эк}$  – комплексное эквивалентное (входное) сопротивление схемы замещения относительно точки короткого замыкания, найденное при промышленной частоте;  $\text{Im } Z_{эк} = X_{эк}$  – мнимая (индуктивная) составляющая комплексного эквивалентного сопротивления;  $\text{Re } \underline{Z}_{эк} = R_{эк}$  – действительная (активная) составляющая этого сопротивления.

Такой способ удобен при расчетах на ЭВМ и может быть использован при ручных расчетах, если исходная схема имеет простую конфигурацию. Значение ударного коэффициента, получаемое с использованием найденной таким способом эквивалентной постоянной времени  $T_{a_{эк}}$ , обычно оказывается заниженным по сравнению с действительным значением, причем погрешность может достигать 10–15 %.

Для определения эквивалентной постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока короткого замыкания вторым способом используют формулу

$$T_{а\text{ эк}} = \frac{X_{\text{эк}}(R=0)}{\omega R_{\text{эк}}(X=0)}, \quad (3.13)$$

где  $X_{\text{эк}}(R=0)$  – эквивалентное сопротивление схемы замещения, в которой все элементы расчетной схемы (генераторы, трансформаторы, линии электропередачи и т.д.) учтены только их индуктивными сопротивлениями, т.е. полагая, что активные сопротивления различных элементов равны нулю;  $R_{\text{эк}}(X=0)$  – эквивалентное сопротивление схемы замещения, в которой все элементы расчетной схемы учтены только их активными сопротивлениями, т.е. полагая, что индуктивные сопротивления различных элементов равны нулю.

Хотя рассматриваемый способ определения эквивалентной постоянной времени существенно упростит задачу нахождения апериодической составляющей тока короткого замыкания и ударного тока, однако значение ударного коэффициента при этом способе может оказаться завышенным на 20–30 % по сравнению с действительным. Очевидно,  $R_{\text{эк}}(X=0)$  можно рассматривать как эквивалентное сопротивление активно-индуктивной схемы замещения, измеренное при частоте  $f = 0$ . Поэтому второй способ определения эквивалентной постоянной времени часто называют способом предельных частот.

Поскольку при определении эквивалентной постоянной времени первым способом, с использованием эквивалентного сопротивления схемы замещения, измеренного при частоте  $f = 50$  Гц, значение ударного коэффициента обычно оказывается заниженным, а при ее определении вторым способом, с использованием эквивалентного сопротивления схемы замещения, измеренного при частоте  $f = 0$ , значение ударного коэффициента, наоборот, оказывается завышенным, то было предложено определять эквивалентную постоянную времени по эквивалентному сопротивлению схемы при так называемой оптимальной частоте. В качестве последней выбрана частота  $f = 20$  Гц. В этом случае эквивалентная постоянная времени определяется по формуле

$$T_{а\text{ эк}} = 2,5 \frac{\text{Im } Z_{\text{эк}}(20)}{\omega \text{Re } Z_{\text{эк}}(20)}, \quad (3.14)$$

где  $Z_{\text{эк}}(20)$  – комплексное эквивалентное сопротивление схемы замещения относительно точки короткого замыкания, измеренное при частоте  $f = 20$  Гц;  $\text{Im } Z_{\text{эк}}(20)$  и  $\text{Re } Z_{\text{эк}}(20)$  – соответственно мнимая и действительная составляющие этого сопротивления.

Описанный способ обычно называют способом оптимальной или эквивалентной частоты. Погрешность, связанная с применением этого способа, по абсолютной величине обычно меньше, чем при использовании первого и второго способов. Однако он может быть использован лишь при расчетах с применением ЭВМ.

### 3.3. Переходный процесс при включении в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой

Изменение нагрузки трансформатора или подводимого к нему напряжения, включение трансформатора в сеть или короткое замыкание на стороне его вторичной обмотки сопровождается переходным процессом. Токи в обмотках трансформатора во время некоторых переходных процессов могут во много раз превышать его номинальный ток.

Рассмотрим сначала переходный процесс, возникающий при включении в сеть однофазного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. При синусоидальном законе изменения подводимого напряжения процесс в первичной обмотке описывается следующим дифференциальным уравнением

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_\mu R_1, \quad (3.15)$$

где  $\alpha$  – угол, определяющий фазу напряжения в момент включения трансформатора (его обычно называют фазой включения);  $w_1$  – число витков первичной обмотки трансформатора;  $i_\mu$  – мгновенное значение тока холостого хода (тока намагничивания);  $\Phi$  – магнитный поток, сцепленный с первичной обмоткой трансформатора;  $R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки.

Уравнение (3.15) нелинейно, так как магнитная характеристика трансформатора  $\Phi = f(i_\mu)$  нелинейна. Но поскольку второе слагаемое правой части (3.15) значительно меньше первого, можно, не делая существенной ошибки, выразить ток  $i_\mu$  через магнитный поток  $\Phi$  с помощью приближенной линейной зависимости

$$i_\mu = w_1 \Phi / L_1,$$

где  $L_1$  – среднее значение индуктивности первичной обмотки трансформатора.

При этом уравнение (3.15) становится линейным и имеет вид:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \Phi \frac{R_1}{L_1} = \frac{U_m}{w_1} \sin(\omega t + \alpha). \quad (3.16)$$

Решение уравнения (3.16) представляет собой сумму принужденной периодической и свободной аperiodической составляющих магнитного потока

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{а}} = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha - \pi/2) + \Phi_{\text{а0}} e^{-\frac{t}{T_{\text{а}}}} = \\ &= -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_{\text{а0}} e^{-\frac{t}{T_{\text{а}}}}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

где  $\Phi_m = U_m / (\omega w_1)$ ;  $\Phi_{\text{а0}}$  – начальное значение свободной аperiodической составляющей магнитного потока;  $T_{\text{а}}$  – постоянная времени затухания этой составляющей потока.

Начальное значение свободной составляющей потока  $\Phi_{\text{а0}}$  определяется из граничных условий, имея в виду, что в момент включения трансформатора магнитный поток не претерпевает изменения. Если к моменту включения в магнитопроводе трансформатора был остаточный магнитный поток  $\pm \Phi_{\text{ост}}$ , то при  $t = 0$  справедливо соотношение

$$\pm \Phi_{\text{ост}} = -\Phi_m \cos \alpha + \Phi_{\text{а0}},$$

откуда

$$\Phi_{\text{а0}} = \Phi_m \cos \alpha \pm \Phi_{\text{ост}}.$$

Таким образом,

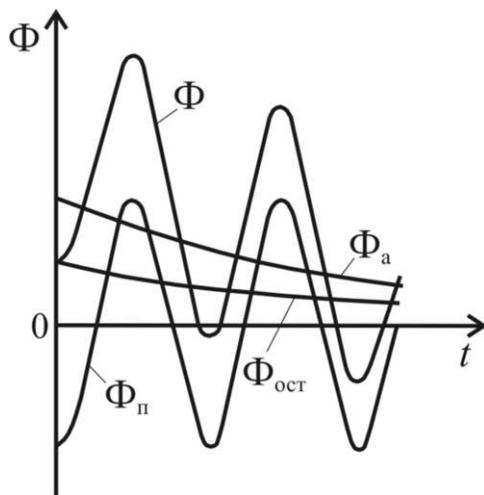
$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Phi_m \cos \alpha \pm \Phi_{\text{ост}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{а}}}}. \quad (3.18)$$

Из (3.18) следует, что магнитный поток трансформатора в произвольный момент времени в значительной мере зависит от остаточного магнитного потока и момента включения трансформатора, т.е. угла  $\alpha$ . Наиболее благоприятными для трансформатора оказываются условия, когда перед его включением в магнитопроводе отсутствует магнитный поток, а включение в сеть происходит при  $\alpha = \pm \pi/2$ , т.е. в момент, когда подводимое напряжение проходит через максимальное значение. В этом случае  $\Phi = \pm \Phi_m \sin \omega t$ , т.е. сразу наступает установившийся режим – магнитный поток и соответственно ток намагничивания не содержат свободной составляющей.

Наихудшие условия возникают в том случае, когда включение трансформатора происходит в момент перехода напряжения сети через нулевое значение, т.е.  $\alpha = 0$ , а в магнитопроводе имеется такой остаточный магнитный поток, который в момент включения оказывается направленным навстречу принужденной периодической составляющей магнитного потока. При этом

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_{\text{ост}}) e^{-\frac{t}{T_{\text{а}}}},$$

т.е. начальное значение свободного магнитного потока в магнитопроводе превышает амплитуду установившегося потока. Своего максимального значения, которое может более чем в два раза превышать его значение в установившемся режиме, магнитный поток достигнет приблизительно через полпериода после включения трансформатора в сеть (рис. 3.6).



**Рис. 3.6. Изменение магнитного потока во времени при наихудших условиях включения трансформатора в сеть**

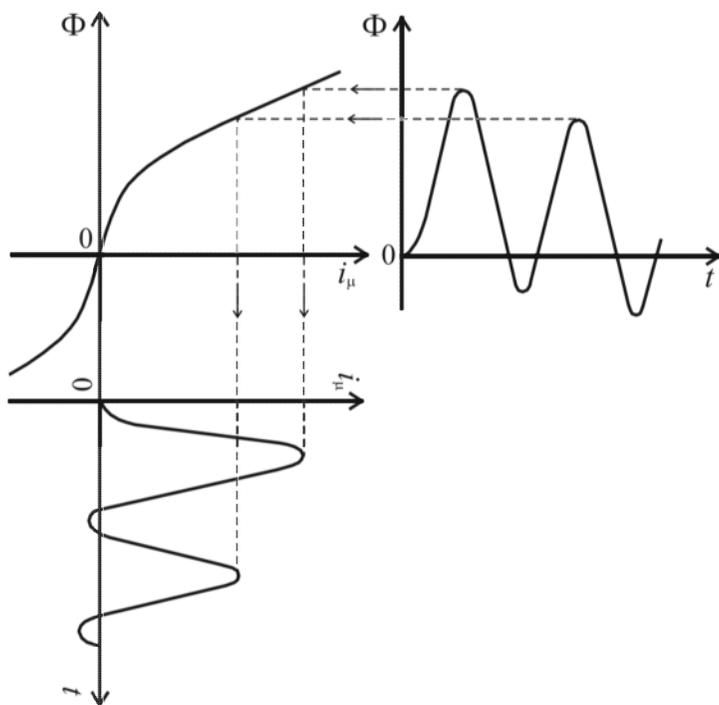
Кривая изменения во времени тока намагничивания трансформатора после его включения в сеть может быть получена графически (рис. 3.7) с использованием кривой  $\Phi = f(t)$  и характеристики намагничивания трансформатора  $\Phi = \varphi(i_{\mu})$ . При построении кривых  $\Phi = f(t)$  и  $i_{\mu} = f(t)$  предполагалось, что остаточный магнитный поток в магнитопроводе отсутствует, а фаза включения  $\alpha = 0$ .

Вследствие нелинейности характеристики намагничивания трансформатора максимальное значение тока намагничивания («бросок» тока), соответствующее максимуму магнитного потока, может значительно превышать амплитуду номинального нагрузочного тока трансформатора, приближаясь к ударному току короткого замыкания. Это явление учитывают при настройке релейной защиты трансформаторов, добиваясь того, чтобы защита срабатывала только при коротком замыкании.

Если трансформатор включается в сеть со стороны обмотки высшего напряжения, то относительное значение максимального тока намагничивания оказывается несколько меньшим, чем при вклю-

чении со стороны обмотки низшего напряжения. Это объясняется тем, что обмотка высшего напряжения находится на некотором расстоянии от стержня магнитопровода и возникновение в нем значительной магнитной индукции сопровождается увеличением магнитного потока в воздушной среде между обмоткой и стержнем.

При включении в сеть трехфазного трансформатора процесс изменения во времени магнитных потоков отдельных фаз протекает примерно также, как в однофазном трансформаторе, только углы включения  $\alpha$  разных фаз неодинаковы, а в фазном напряжении появляется третья гармоническая составляющая, уменьшающая максимальное значение магнитного потока. По этой причине, а также из-за неодинакового насыщения разных стержней магнитопровода максимальное значение тока намагничивания при включении трехфазного трансформатора оказывается меньше, чем однофазного.



**Рис. 3.7. Изменение во времени магнитного потока и тока намагничивания трансформатора при его включении в сеть в момент перехода напряжения через нуль и отсутствии остаточного магнитного потока**

### 3.4. Переходный процесс при коротком замыкании за трансформатором

Рассмотрим переходный процесс в трансформаторе, первичная обмотка которого подключена к источнику синусоидального напряжения, а короткое замыкание происходит на выводах вторичной обмотки, которая до короткого замыкания была разомкнута.

Решение соответствующих дифференциальных уравнений напряжений первичной и вторичной обмоток и выражения для токов этих обмоток в общем виде оказываются весьма громоздкими. Поэтому ограничимся анализом свободных токов, возникающих в обмотках при коротком замыкании, причем для упрощения задачи будем считать, что насыщение магнитопровода отсутствует, т.е. токи и напряжения обмоток связаны линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, а также что как собственные индуктивности, так и активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора, приведенные к одному числу витков, соответственно равны друг другу (такое допущение для силовых трансформаторов вполне уместно). При этом условии дифференциальные уравнения напряжений обмоток трансформатора (рис. 3.8) имеют вид:

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + M \frac{di_2}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha); \quad (3.19)$$

$$L \frac{di_2}{dt} + Ri_2 + M \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (3.20)$$

где  $i_1$  и  $i_2$  – токи первичной и вторичной обмоток.

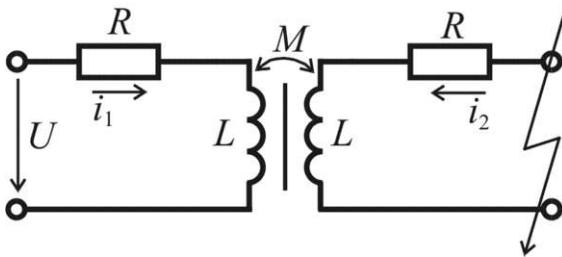


Рис.3.8. Исходная схема трансформатора

Для решения этих уравнений следует все члены первого из них умножить на  $L$ , а второго на  $M$  и затем вычесть второе уравнение из первого. В результате получим

$$(L^2 - M^2) \frac{di_1}{dt} + LRi_1 - MRi_2 = LU_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (3.21)$$

Если это уравнение продифференцировать по времени, а затем с помощью полученного выражения исключить из (3.19) производную тока  $i_2$ , то будем иметь линейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{L^2 - M^2}{R} \frac{d^2 i_1}{dt^2} + 2L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = U_m \left[ \sin(\omega t + \alpha) + \frac{\omega L}{R} \cos(\omega t + \alpha) \right]. \quad (3.22)$$

Так как левые части (3.19) и (3.20) построены симметрично относительно токов  $i_1$  и  $i_2$ , то левая часть уравнения, содержащего только ток  $i_2$ , очевидно, может быть получена заменой в (3.22) тока  $i_1$  на ток  $i_2$ .

Уравнению (3.22) соответствует следующее характеристическое уравнение:

$$(L^2 - M^2)p^2 + 2LRp + R^2 = 0, \quad (3.23)$$

которое можно представить в виде

$$[(L + M)p + R][(L - M)p + R] = 0. \quad (3.23a)$$

Отсюда

$$p_1 = -\frac{R}{L + M} = -\frac{1}{T'} \quad (3.24)$$

и

$$p_2 = -\frac{R}{L - M} = -\frac{R}{L_\sigma} = -\frac{1}{T''}, \quad (3.25)$$

где  $L_\sigma$  — индуктивность рассеяния каждой обмотки.

Так как корни  $p_1$  и  $p_2$  отрицательны, то свободные составляющие токов  $i_1$  и  $i_2$  убывают по экспоненциальному закону, но с разными постоянными времени, которые, как видно из (3.24) и (3.25), соответственно равны  $T'$  и  $T''$ . Большая постоянная времени  $T' = \frac{L + M}{R}$

при сильной магнитной связи между обмотками трансформатора близка к удвоенной постоянной времени первичной или вторичной обмотки и представляет собой постоянную времени затухания главного магнитного потока трансформатора (обычно ее называют переходной постоянной времени), сцепленного с обеими обмотками. Меньшая постоянная времени  $T''$  зависит от разности собственной и взаимной индуктивностей и определяется, следовательно, отношением индуктивности рассеяния обмотки  $L_\sigma$  к ее активному сопротивлению. Она представляет собой постоянную времени затухания маг-

нитного потока рассеяния (обычно ее называют сверхпереходной постоянной времени) и значительно меньше постоянной времени  $T'$ .

Составляющие свободных токов первичной и вторичной обмоток, затухающие с постоянной времени  $T'$ , имеют одинаковое направление (т.е. созданные ими магнитные потоки направлены согласно, образуя общий или главный магнитный поток) и являются токами намагничивания, а составляющие свободных токов, затухающие с постоянной времени  $T''$ , направлены противоположно. Они не участвуют в создании главного магнитного потока и образуют свободные составляющие нагрузочных токов.

Начальные значения свободных составляющих токов намагничивания и нагрузочных токов обеих обмоток трансформатора практически обратно пропорциональны постоянной времени их затухания, поэтому ток намагничивания короткозамкнутого трансформатора, имеющего сильную магнитную связь между обмотками, можно не учитывать и для расчета тока короткого замыкания использовать простую схему замещения, показанную на рис. 3.9. Таким образом, в этом случае исследование переходного процесса при коротком замыкании на выводах его вторичной обмотки сводится к расчету тока короткого замыкания в простейшей цепи, содержащей последовательно соединенные активные и индуктивные сопротивления, что было рассмотрено в п. 3.1.

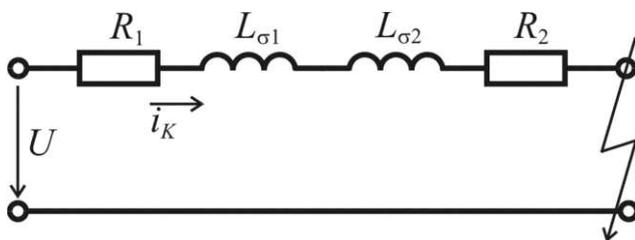


Рис.3.9. Упрощенная схема замещения трансформатора

Сделанный вывод существенно упрощает анализ переходных процессов при сложных исходных расчетных схемах, содержащих несколько трансформаторов и других элементов.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

---

---

# УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

---

---

### 4.1. Основные допущения

Для исследования электромагнитных переходных процессов в машине переменного тока необходимо иметь ее математическую модель, которая отвечала бы основным закономерностям, определяющим эти процессы. Очевидно, точный учет в такой модели свойств магнитного поля машины практически невозможен из-за сложной конфигурации отдельных частей магнитной системы, свособразия размещения проводников с токами и нелинейности характеристики намагничивания магнитопровода. Поэтому при составлении математической модели обычно производят некоторую идеализацию магнитных и электрических свойств машины переменного тока, которая сводится к следующему:

- магнитная проницаемость всех элементов магнитной системы машины принимается постоянной, независящей от токов разных обмоток машины;
- распределение индукции магнитных полей самоиндукции трехфазных обмоток и полей взаимной индукции обмоток статора и ротора вдоль окружности зазора машины считается синусоидальным, т.е. при исследовании переходных процессов учитывается лишь первая гармоника индукции указанных магнитных полей;
- магнитопровод и обмотки машины принимаются симметричными. Это означает, что магнитопровод на всех полюсных делениях имеет одинаковые очертания, а в пределах полюсного деления симметричен относительно продольной и поперечной осей; обмотки фаз имеют одинаковое число витков, одинаковое активное сопротивление, а магнитные оси разных фаз сдвинуты относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ ; у синхронных машин демпферная система симметрична относительно продольной и поперечной осей, а обмотка возбуждения всех полюсов ротора одинакова;

- все дополнительные по отношению к обмотке возбуждения контуры ротора синхронной машины замещаются двумя эквивалентными демпферными контурами – продольным и поперечным, магнитные оси которых совпадают соответственно с продольной и поперечной осями ротора.

## **4.2. Исходные дифференциальные уравнения переходного процесса в синхронной машине**

Любой переходный процесс в электрической машине сопровождается не только изменением электрических величин, но и тем или иным изменением частоты вращения машины. Последнее может существенно влиять на протекание переходного процесса. Поэтому в общем случае при анализе переходного процесса необходимо совместно исследовать процессы в электрических цепях машины и механическое движение ее ротора, т.е. совместно решать систему дифференциальных уравнений напряжений в контурах машины и уравнения моментов сил, действующих на ее ротор.

Из принятого ранее допущения о том, что все дополнительные по отношению к обмотке возбуждения контуры ротора по каждой оси машины замещаются одним эквивалентным демпферным контуром следует, что синхронная машина с демпферными контурами имеет шесть контуров – три контура фаз, контур возбуждения, продольный демпферный контур и поперечный демпферный контур. Поэтому для исследования переходных процессов в синхронной машине необходимо составить шесть уравнений напряжений в ее контурах и уравнение моментов.

При этом положительными направлениями токов в фазных обмотках якоря условимся считать направления от нейтрали обмоток к выводам машины; положительным направлением токов возбуждения и продольного демпферного контура – то направление, при котором созданными ими магнитные потоки направлены по положительному направлению продольной оси; положительным направлением тока поперечного демпферного контура – направление, при котором созданный им магнитный поток направлен по положительному направлению поперечной оси; положительными направлениями ЭДС в фазах якоря – положительные направления токов в фазах; положительным направлением напряжения, приложенного к обмотке возбуждения, – направление, совпадающее с положительным направлением тока возбуждения.

При выбранных положительных направлениях токов, ЭДС и напряжений дифференциальные уравнения напряжений в контурах машины имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -\frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A; \\ u_B &= -\frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B; \\ u_C &= -\frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + R_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + R_{1q} i_{1q}, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

где  $R, R_f, R_{1d}, R_{1q}$  – активные сопротивления соответственно фазных обмоток якоря, обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров.

Дифференциальное уравнение моментов, действующих на ротор машины, имеет вид:

$$M_{\text{мх}} - M_{\text{эм}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.2)$$

где  $M_{\text{мх}}$  – момент механических сил;  $M_{\text{эм}}$  – момент электромагнитных сил (электромагнитный момент), обусловленный взаимодействием магнитного потока от токов обмоток якоря и магнитного потока от токов в контурах ротора;  $J$  – момент инерции агрегата;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора.

Даже при постоянной частоте вращения ротора многие индуктивности и взаимные индуктивности машины зависят от угла  $\gamma$  между магнитной осью фазы  $A$  и положительным направлением продольной оси ротора, т.е. являются периодическими функциями времени. Таким образом, потокосцепления обмоток, входящие в (4.1) и взятые в матричной форме, зависят от времени не только вследствие изменения их токов, но и за счет изменения индуктивностей и взаимных индуктивностей. Поэтому дифференциальные уравнения (4.1) являются уравнениями с переменными коэффициентами, что существенно усложняет задачу анализа переходных процессов в синхронной машине. Вследствие этого часто идут на линейные преобразования фазных переменных к некоторым новым переменным, учитывающим особенности симметрии явнополусной машины и позволяющим получить уравнения с постоянными коэффициентами.

### 4.3. Потокосцепления, собственные индуктивности и взаимные индуктивности обмоток синхронных машин

Математический анализ электромагнитных переходных процессов в электрических машинах основан на исследовании уравнений напряжения для их контуров. В эти уравнения входят потокосцепления контуров, которые зависят не только от токов, но и от индуктивностей этих контуров.

Рассмотрим синхронные машины, отличающиеся от других машин более сложной структурой магнитопровода и контуров ротора. При принятых выше допущениях потокосцепления контуров связаны с токами в них линейными соотношениями, которые в матричной форме имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} & M_{Af} & M_{A1d} & M_{A1q} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} & M_{Bf} & M_{B1d} & M_{B1q} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C & M_{Cf} & M_{C1d} & M_{C1q} \\ M_{fA} & M_{fB} & M_{fC} & L_f & M_{f1d} & 0 \\ M_{1dA} & M_{1dB} & M_{1dC} & M_{1df} & L_{1d} & 0 \\ M_{1qA} & M_{1qB} & M_{1qC} & 0 & 0 & L_{1q} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_f \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

В (4.3) принадлежность величины к тому или иному контуру отмечена подстрочными индексами: для фазных обмоток якоря –  $A, B, C$ ; для обмотки возбуждения –  $f$ ; для продольного и поперечного эквивалентных демпферных контуров – соответственно  $1d$  и  $1q$ .

Поскольку магнитная проницаемость магнитопровода машины принята постоянной, то, в соответствии с принципом взаимности, взаимные индуктивности с одинаковыми, но переставленными местами подстрочными индексами равны, т.е.  $M_{AB} = M_{BA}$ ,  $M_{Af} = M_{fA}$  и т.д. Между обмотками, у которых магнитные оси сдвинуты на  $\pi/2$ , отсутствует магнитная связь, поэтому соответствующие взаимные индуктивности равны нулю.

Некоторые индуктивности и взаимные индуктивности, входящие в (4.3), не зависят от положения ротора машины в пространстве, т.е. при вращении ротора остаются постоянными, другие – зависят от положения ротора и при его вращении периодически изменяются. Постоянство или непостоянство индуктивностей и взаимных индуктивностей определяется тем, остается или не остается неизменной конфигурация ферромагнитных масс по отношению к соответствующим контурам машины при повороте ее ротора (предполагается, что влияние пазов на якорь и роторе не учитывается). В явнополюсных маши-

нах постоянными являются лишь индуктивности всех контуров ротора и взаимная индуктивность обмотки возбуждения и продольного демпферного контура. В неявнополюсных машинах постоянны также индуктивности фазных обмоток и взаимные индуктивности между этими обмотками.

Выявим закономерности изменения индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток синхронной машины.

Принципиальная схема синхронной машины представлена на рис. 4.1.

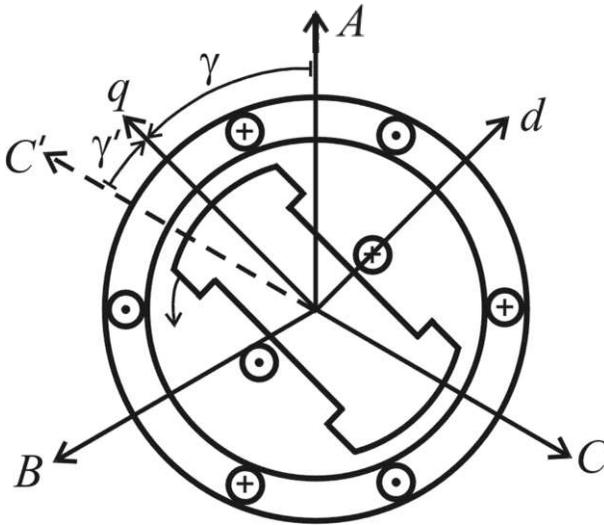


Рис. 4.1. Принципиальная схема синхронной машины

Обмотка каждой фазы якоря характеризуется магнитной осью, которая означает направление магнитного потока в центре расточки машины, обусловленного током данной фазы, если его направление совпадает с принятым положительным. При сделанных выше допущениях магнитные оси обмоток фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  сдвинуты друг относительно друга на  $2\pi/3$ , а их порядок чередования зависит от направления вращения ротора. Если предположить, что ротор синхронной машины вращается в положительном направлении, т.е. против часовой стрелки, то магнитные оси фаз должны следовать друг за другом в том же направлении.

Положительное направление продольной оси ротора  $d$  определяется направлением магнитного потока, созданного током возбуждения, при направлении этого тока, принятом в качестве положительного. За положительное направление оси  $q$  выберем направление, отстающее от

положительного направления продольной оси на  $\pi/2$ . Это удобно для синхронной машины, работающей генератором.

Обычно положение ротора синхронной машины определяется углом  $\gamma$  между магнитной осью фазы  $A$  и положительным направлением продольной оси ротора (см. рис. 4.1). Поэтому целесообразно рассмотреть зависимости переменных индуктивностей и взаимных индуктивностей контуров машины от угла  $\gamma$ .

Индуктивности фазных обмоток якоря представляют собой периодические функции угла  $\gamma$  с периодом, равным  $\pi$ , так как при повороте ротора на этот угол ферромагнитные массы ротора займут то же положение, которое они занимали до поворота. Следовательно, и магнитная проводимость зазора для магнитного потока, созданного фазным током якоря, остается той же. Поскольку эти индуктивности не зависят от знака угла  $\gamma$ , то соответствующие выражения являются четными функциями этого угла, т.е. не содержат синусов. Таким образом,

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma + l_4 \cos 4\gamma + \dots \quad (4.4)$$

Выражения для  $L_B$  и  $L_C$  ввиду симметрии фазных обмоток содержат те же коэффициенты  $l_0, l_2, l_4, \dots$  и получаются из (4.4) заменой  $\gamma$  соответственно на  $\gamma - 2\pi/3$  и  $\gamma + 2\pi/3$ .

При принятых выше допущениях коэффициенты четвертого и более высоких порядков малы и не оказывают влияния на ЭДС основной частоты, поэтому можно в (4.4) и в выражениях для других фаз ограничиться только первыми двумя членами, т.е. использовать следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} L_A &= l_0 + l_2 \cos 2\gamma; \\ L_B &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma - 2\pi/3); \\ L_C &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

В качестве примера на рис. 4.2 показана зависимость  $L_A = f(\gamma)$ .

У неявнополюсных машин  $l_2 = 0$  и  $L_A = L_B = L_C = l_0$ .

Взаимные индуктивности фазных обмоток являются четными периодическими функциями угла между осью, симметричной относительно магнитных осей рассматриваемых фаз, и продольной осью ротора, с периодом  $\pi$  (так как при повороте ротора на угол  $\pi$  взаимные индуктивности имеют такие же значения, как и при исходном положении ротора). В частности, выражение для взаимной индуктивности между фазами  $A$  и  $B$  «идеализированной» машины содержит постоянную составляющую и вторую гармонику:

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2\gamma', \quad (4.6)$$

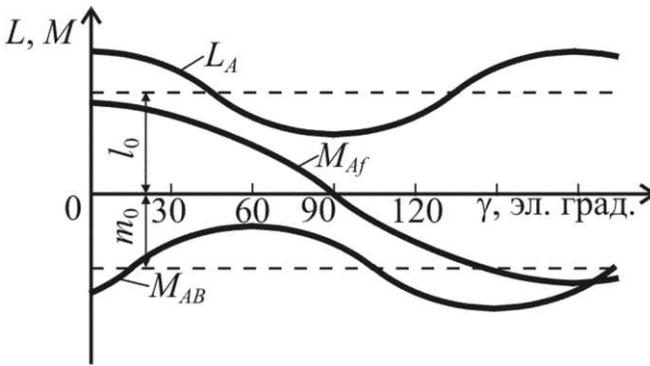
где  $\gamma'$  – угол между осью  $C'$ , симметричной относительно магнитных осей фаз  $A$  и  $B$ , и продольной осью ротора (см. рис. 4.1).

Взаимные индуктивности фазных обмоток отрицательны, поскольку магнитные оси этих обмоток сдвинуты на углы, превышающие  $\pi/2$ , поэтому  $m_0 < 0$ . Модуль  $M_{AB}$  достигает минимума при  $\gamma' = 0$  и максимума при  $\gamma' = \pi/2$ , поэтому  $m_2 > 0$ . Учитывая, что  $\gamma' = \gamma - \pi/3$ , получим

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2(\gamma - \pi/3). \quad (4.6a)$$

Эта зависимость представлена на рис 4.2. Чтобы получить выражения для  $M_{BC}$  и  $M_{AC}$ , достаточно в формуле (4.6a) заменить  $\gamma$  соответственно на  $\gamma - 2\pi/3$  и  $\gamma + 2\pi/3$ .

У неявнополюсных синхронных машин  $M_{AB} = M_{BC} = M_{AC} = m_0$ .



**Рис. 4.2.** Изменение индуктивностей обмоток синхронной машины при изменении положения ротора

Взаимные индуктивности каждой фазной обмотки якоря и любого роторного контура изменяются при вращении ротора периодически, причем наибольших значений они достигают при совпадении магнитных осей рассматриваемых контуров, а период соответствует полному обороту ротора, т.е. равен  $2\pi$ , так как при повороте ротора из какого-либо исходного положения на угол  $\pi$  магнитный поток, созданный, например, током обмотки возбуждения и пронизывающий контур любой фазы, оказывается таким же по абсолютной величине, но направленным противоположно. Кроме того, рассматриваемые взаимные индуктивности не зависят от знака угла  $\gamma$ , поскольку при повороте ротора на этот угол в ту или другую сторону потокосцепление контура любой фазы якоря имеет одно и то же значение. Поэтому выражения для взаимных индуктивностей между фазными обмотками якоря и обмоткой возбуждения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} M_{Af} &= M_{adf} \cos \gamma; \\ M_{Bf} &= M_{adf} \cos(\gamma - 2\pi/3); \\ M_{Cf} &= M_{adf} \cos(\gamma + 2\pi/3), \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

где  $M_{adf}$  – взаимная индуктивность между фазной обмоткой якоря и обмоткой возбуждения при совпадении их магнитных осей.

Аналогичный вид имеют выражения для взаимных индуктивностей между фазными обмотками и демпферными контурами.

В качестве примера на рис. 4.2 показана зависимость  $M_{lf} = f(\gamma)$ .

Обычно с целью упрощения расчетов переходных процессов в синхронных машинах с учетом демпферных контуров полагают, что при совпадении продольной оси ротора с магнитной осью любой фазы якоря все три контура (обмотка якоря, обмотка возбуждения и продольный демпферный контур) связаны одним общим магнитным потоком взаимоиндукции, пренебрегая таким образом частичными потоками взаимоиндукции, связанными только с отдельными парами контуров. Это допущение означает, что взаимные индуктивности между двумя любыми указанными выше контурами, приведенные к обмотке якоря, одинаковы и составляют  $M_{ad}$ . При этом выражение (4.7) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} M_{Af} &= M_{A1d} = M_{ad} \cos \gamma; \\ M_{Bf} &= M_{B1d} = M_{ad} \cos(\gamma - 2\pi/3); \\ M_{Cf} &= M_{C1d} = M_{ad} \cos(\gamma + 2\pi/3), \end{aligned} \right\} \quad (4.7a)$$

где  $M_{A1d}$ ,  $M_{B1d}$ ,  $M_{C1d}$  – взаимные индуктивности между обмотками фаз якоря и продольным демпферным контуром.

#### 4.14. Линейные преобразования уравнений трехфазной электрической машины. Понятие об изображающем векторе

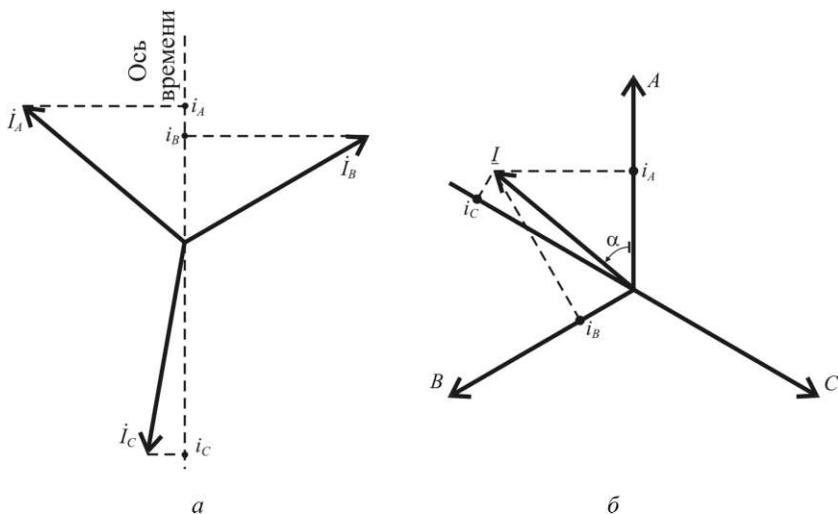
Линейные преобразования уравнений состоят в замене в этих уравнениях исходных переменных новыми переменными, линейно связанными с исходными. При этом коэффициенты линейного преобразования могут быть и функциями времени.

Линейному преобразованию целесообразно дать геометрическую интерпретацию. Как известно, синусоидальные токи трехфазной системы можно представить тремя векторами, вращающимися относительно полюса с частотой сети. Проекции этих векторов на ось времени определяют мгновенные значения фазных токов (рис. 4.3.a).

Однако эти значения можно получить и иначе. Как известно, если сложить пульсирующие магнитные поля отдельных фаз, получим синусоидальную волну магнитной индукции, движущуюся вдоль зазора машины. Но вращающуюся результирующую намагничивающую силу можно представить пространственным вектором, равным по модулю амплитуде этой силы и направленным из центра расточки статора в направлении той точки зазора, в которой в данный момент намагничивающая сила максимальна. Таким образом, этот вектор вращается с синхронной частотой, соответствующей частоте сети. В любой момент времени вектор результирующей намагничивающей силы определяется мгновенными значениями намагничивающих сил отдельных фаз и, наоборот, мгновенные значения фазных намагничивающих сил определяются как проекции вектора результирующей намагничивающей силы на магнитные оси фаз.

С помощью такого вращающегося вектора, обычно называемого изображающим, можно определять не только намагничивающие силы, но и пропорциональные им токи (рис. 4.3, б) и любые другие фазные величины  $f_A, f_B, f_C$ , например, потокосцепления, напряжения, причем  $f_A, f_B, f_C$  могут как угодно изменяться во времени, но при условии, что всегда

$$f_A + f_B + f_C = 0. \quad (4.8)$$



**Рис. 4.3. Определение мгновенных значений фазных токов:**

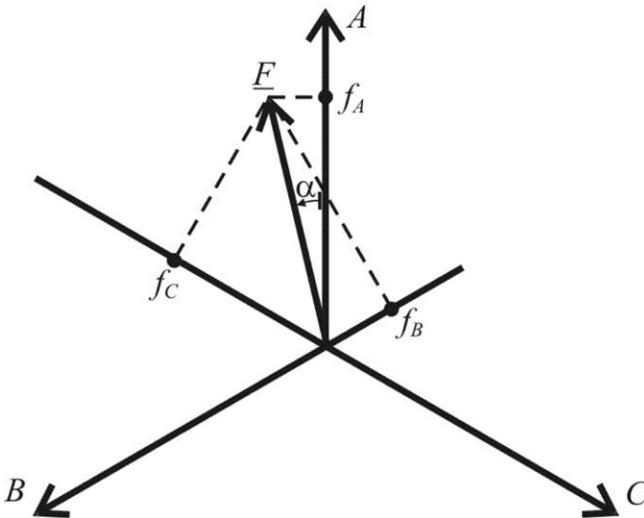
*a* – проекции векторов токов на ось времени;

*б* – проекции изображающего вектора тока на магнитные оси фаз машины

Это условие следует из изложенного способа нахождения мгновенных значений фазных величин  $f_A, f_B, f_C$  как проекций некоторого вектора  $\underline{F}$  на три оси, сдвинутые на  $2\pi/3$  (рис. 4.4):

$$\left. \begin{aligned} f_A &= F \cos \alpha; \\ f_B &= F \cos(\alpha - 2\pi/3); \\ f_C &= F \cos(\alpha + 2\pi/3), \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

а сумма этих проекций при любом законе изменения вектора во времени равна нулю.



**Рис. 4.4. Определение мгновенных значений фазных величин с помощью изображающего вектора**

Следовательно, каким бы образом не изменялись во времени фазные величины  $f_A, f_B, f_C$ , удовлетворяющие условию (4.8), в каждый момент времени их значения можно рассматривать как проекции некоторого вектора  $\underline{F}$  на магнитные оси машины, поэтому вектор  $\underline{F}$

однозначно определен по модулю и положению относительно магнитных осей машины.

Используя (4.9), запишем:

$$f_A^2 + f_B^2 + f_C^2 = F^2 \left[ \cos^2 \alpha + \cos^2 \left( \alpha - \frac{2}{3} \pi \right) + \cos^2 \left( \alpha + \frac{2}{3} \pi \right) \right] = \frac{3}{2} F^2,$$

поэтому модуль искомого изображающего вектора

$$F = \sqrt{\frac{2}{3}(f_A^2 + f_B^2 + f_C^2)}. \quad (4.10)$$

а его положение относительно любой магнитной оси машины определяется из соответствующего равенства (4.9).

Если фазные величины изменяются по синусоидальному закону и симметричны, то изображающий вектор вращается с постоянной частотой, а его конец описывает окружность. Если же они несимметричны, хотя и изменяются по синусоидальному закону и удовлетворяют условию (4.8), то изображающий вектор вращается с переменной частотой, а конец его описывает эллипс. В общем случае изображающий вектор вращается с переменной частотой, а его конец описывает сложную кривую.

Уже отмечалось, что в любой момент времени изображающий вектор тока якоря направлен в ту точку зазора, в которой результирующая намагничивающая сила максимальна. Следовательно, он может рассматриваться как ток якоря некоторой воображаемой машины, отличающейся от реальной тем, что вместо трех фазных обмоток на якоре она имеет только одну одноосную, но вращающуюся обмотку, магнитная ось которой в любой момент времени совпадает по направлению с изображающим вектором тока, причем действие этого тока эквивалентно суммарному действию токов трех фаз якоря реальной машины.

Таким образом, изображающий вектор тока характеризует собой как установившийся, так и переходный режимы. Поэтому при исследовании переходных процессов в электрических машинах, где приходится иметь дело с токами, изменяющимися во времени не по синусоидальному закону, введение пространственного изображающего вектора существенно облегчает исследования.

Изображающий вектор позволяет выполнить разные линейные преобразования, так как последние по существу сводятся к изменению системы координат, в которой производится отсчет величин. Поскольку положение любого вектора на плоскости, в том числе и изображающего, полностью характеризуется двумя координатами, то в качестве новой системы координат целесообразно выбрать прямоугольную двухосную систему  $x, y$  (рис. 4.5). Новые переменные, т.е. проекции вектора  $F$  на оси  $x, y$  равны соответственно

$$\left. \begin{aligned} f_x &= F \cos(\theta - \alpha); \\ f_y &= F \sin(\theta - \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

где  $\theta$  — угол сдвига оси  $x$  относительно магнитной оси фазы  $A$ .

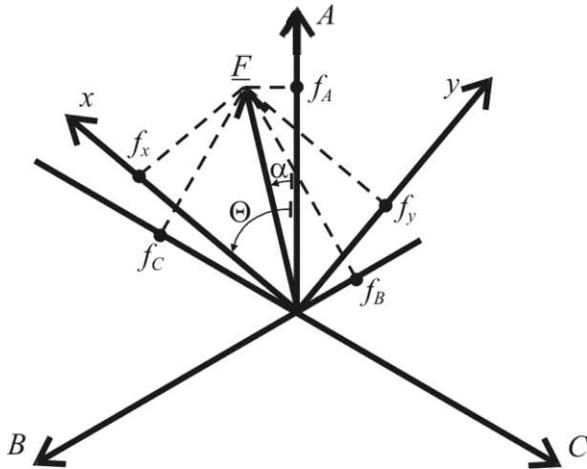


Рис. 4.5. Изображающий вектор и его проекции на магнитные оси фаз и на оси  $x, y$

Целесообразно в (4.11)  $f_x$  и  $f_y$  выразить через фазные величины  $f_A, f_B, f_C$ , а в (4.9), наоборот, фазные величины выразить через  $f_x$  и  $f_y$ . При этом следует исключить угол  $\alpha$ , так как до решения уравнений машины частота вращения изображающего вектора неизвестна.

В соответствии с рис. 4.5 имеем

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_x \cos \theta + f_y \sin \theta; \\ f_B &= f_x \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) + f_y \sin \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right); \\ f_C &= f_x \cos \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) + f_y \sin \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right). \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Из этих уравнений следует

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{2}{3} \left[ f_A \cos \theta + f_B \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) + f_C \cos \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right]; \\ f_y &= \frac{2}{3} \left[ f_A \sin \theta + f_B \sin \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) + f_C \sin \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Можно показать, что определитель системы уравнений (4.13) не зависит от угла  $\theta$  и является постоянной величиной. Это указывает на то, что линейные преобразования могут быть принципиально осуществлены при любом характере изменения угла  $\theta$ . Это также указывает на однозначность выражения одних переменных величин через другие.

Выражения (4.13) получены в предположении, что всегда выполняется условие (4.8). Тем не менее они справедливы и тогда, когда это условие не выполняется. Только в последнем случае при линейных преобразованиях помимо переменных  $f_x$  и  $f_y$  необходимо ввести третью переменную величину. Обычно ее определяют как

$$f_0 = \frac{1}{3}(f_A + f_B + f_C) \quad (4.14)$$

и называют нулевой составляющей. Таким образом, три переменные в фазных координатах можно однозначно заменить тремя переменными в координатах  $x, y, 0$ .

Чтобы доказать справедливость выражений (4.13) при  $f_A + f_B + f_C \neq 0$ , следует каждую фазную величину уменьшить на  $f_0$ , т.е. ввести новые переменные

$$\left. \begin{aligned} f'_A &= f_A - f_0; \\ f'_B &= f_B - f_0; \\ f'_C &= f_C - f_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Эти переменные удовлетворяют условию  $f'_A + f'_B + f'_C = 0$  при любых значениях  $f_A, f_B, f_C$ , поэтому для  $f'_A, f'_B, f'_C$  справедливы выражения (4.13). Но после подстановки выражений (4.15) в каждое из выражений (4.13) нулевая составляющая  $f_0$  исключается и выражения (4.13) принимают первоначальный вид.

Таким образом, изображающий вектор не зависит от нулевой составляющей фазной величины. Очевидно, при наличии этой составляющей проекциями изображающего вектора на магнитные оси фаз  $A, B, C$  являются не действительные фазные величины  $f_A, f_B, f_C$ , а величины  $f'_A, f'_B, f'_C$ . Поскольку  $f_A = f'_A + f_0, f_B = f'_B + f_0,$

$f_C = f'_C + f_0$ , т.е. фазные величины представляют собой совокупности величин  $f'_A, f'_B, f'_C$  и нулевой составляющей  $f_0$ , то при обратном переходе от  $f_x$  и  $f_y$  к фазным величинам необходимо в правую часть каждого из соотношений (4.12) прибавить  $f_0$ , т.е.

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_x \cos \theta + f_y \sin \theta + f_0; \\ f_B &= f_x \cos \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) + f_y \sin \left( \theta - \frac{2}{3} \pi \right) + f_0; \\ f_C &= f_x \cos \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) + f_y \sin \left( \theta + \frac{2}{3} \pi \right) + f_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Разложению изображающего вектора на составляющие  $f_x$  и  $f_y$  можно дать такое физическое истолкование: оно означает замену реальной трехфазной машины двухфазной, у которой оси обмоток якоря взаимно перпендикулярны и совпадают с осями  $x$  и  $y$ .

В теории переходных процессов в электрических машинах используют различные координатные оси, выбор которых позволяет или упростить дифференциальные уравнения, определяющие переходный процесс в машине, или даже исключить в них периодические коэффициенты. С этой целью оси координат располагают неподвижно или относительно якоря, или относительно ротора, в зависимости от того, где имеется магнитная или электрическая несимметрия. Применяется и система координат, оси которой вращаются в пространстве с синхронной частотой. Наибольшее распространение получили три системы координат, которые кратко описаны ниже.

Переходные процессы в асинхронных машинах, а также несимметричные режимы синхронных машин удобно исследовать в системе координат, неподвижной в пространстве. Такую систему координат называют системой  $\alpha, \beta$ . При этом ось  $\alpha$  совмещают с магнитной осью фазы  $A$  электрической машины (рис. 4.6). Соотношение между исходными переменными и переменными в осях  $\alpha, \beta$  могут быть получены из (4.13), где следует положить  $\theta = \pi/2$ .

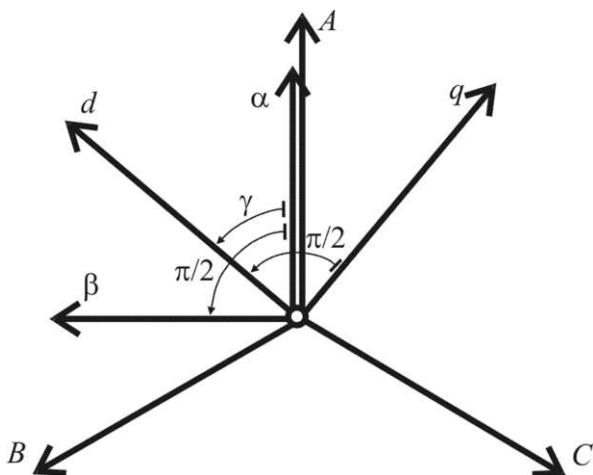


Рис. 4.6. Системы координат  $\alpha, \beta$  и  $d, q$

Переходные процессы в синхронных машинах, при которых сохраняется симметрия фаз, целесообразно исследовать в системе координат, вращающихся вместе с ротором. Такую систему координат называют системой  $d, q, 0$ , так как ось  $x$  совмещают с продольной осью ротора. Переход к системе координат  $d, q, 0$  физически означает

замену реальной трехфазной обмотки якоря синхронной машины двухфазной, причем оси двух обмоток взаимно перпендикулярны, совпадают с осями  $d$  и  $q$  ротора, т.е. вращаются вместе с ротором с той же частотой вращения. Такая машина в магнитном отношении оказывается симметричной при любом положении ротора, вследствие чего индуктивности всех ее обмоток постоянны, а взаимные индуктивности между обмотками или постоянны, или равны нулю. Поэтому дифференциальные уравнения напряжений имеют постоянные коэффициенты, что существенно облегчает их решение.

Соотношение между переменными в системах координат  $A, B, C$  и  $d, q, 0$  можно получить из (4.13), положив в них  $\theta = \gamma$ ,

$$\left. \begin{aligned} f_d &= \frac{2}{3} \left[ f_A \cos \gamma + f_B \cos \left( \gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + f_C \cos \left( \gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]; \\ f_q &= \frac{2}{3} \left[ f_A \sin \gamma + f_B \sin \left( \gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + f_C \sin \left( \gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Обратные соотношения в соответствии с (4.16) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_d \cos \gamma + f_q \sin \gamma + f_0; \\ f_B &= f_d \cos \left( \gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + f_q \sin \left( \gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + f_0; \\ f_C &= f_d \cos \left( \gamma + \frac{2}{3} \pi \right) + f_q \sin \left( \gamma + \frac{2}{3} \pi \right) + f_0. \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Переходные процессы в асинхронных машинах, а также в группе машин целесообразно исследовать в системе координат  $x, y$ , вращающейся в пространстве с синхронной угловой частотой  $\omega_{\text{синх}}$ . Соотношения между составляющими в системах координат  $A, B, C$  и  $x, y, 0$  и наоборот аналогичны (4.17) и (4.18), только необходимо  $f_d$  заменить на  $f_x, f_q$  — на  $f_y$  и иметь в виду, что  $\gamma = \omega_{\text{синх}} t + \gamma_0$ .

#### **4.5. Линейные преобразования исходных дифференциальных уравнений переходного процесса в синхронной машине к осям ротора**

Преобразование первых трех уравнений системы (4.1) к осям  $d, q$  означает переход к таким уравнениям, которые вместо реальных фазных величин содержат их  $d, q$  и нулевые составляющие. Такое

преобразование можно выполнить с помощью формул линейного преобразования (4.18). С этой целью необходимо в одной из первых трех формул системы (4.1) выразить фазное напряжение, потокосцепление и ток через  $d$ ,  $q$  и нулевые составляющие, используя соответствующую формулу из (4.18).

Например, если в системе (4.1) в качестве исходного выбрать уравнение для фазы  $A$  и выразить в нем напряжение, потокосцепление и ток через  $d$ ,  $q$  и нулевые составляющие, используя с этой целью однотипные выражения

$$\begin{aligned} u_A &= u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0; \\ \Psi_A &= \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0; \\ i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0. \end{aligned}$$

то получим

$$\begin{aligned} &\left( u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d \right) \cos \gamma + \\ &+ \left( u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q \right) \sin \gamma + \\ &+ \left( u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + Ri_0 \right) = 0. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Аналогичные преобразования второго и третьего уравнений системы (4.1) дают выражения, отличающиеся от (4.19) только тем, что в них вместо  $\gamma$  входят соответственно  $\gamma - 2\pi/3$  и  $\gamma + 2\pi/3$ .

Уравнение (4.19) должно удовлетворяться в любой момент времени, т.е. при любых значениях угла  $\gamma$ . Это возможно только в том случае, когда каждое выражение, заключенное в скобки, равно нулю. Следовательно, (4.19) эквивалентно трем уравнениям:

$$u_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - Ri_d; \quad (4.20)$$

$$u_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - Ri_q; \quad (4.21)$$

$$u_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt} - Ri_0. \quad (4.22)$$

В (4.20) и (4.21) слагаемые, содержащие производную  $\frac{d\gamma}{dt}$ , представляют собой ЭДС вращения, так как являются следствием

вращения ротора, а слагаемые, содержащие производные  $\frac{d\Psi_d}{dt}$  и  $\frac{d\Psi_q}{dt}$ , представляют собой ЭДС трансформации, так как обусловлены изменением значений потокосцеплений.

Уравнения (4.20) и (4.21) совместно с уравнениями напряжений контуров ротора [последние три уравнения из системы (4.1)] и уравнением моментов (4.2) позволяют исследовать любой переходный процесс в синхронной машине.

Отметим, что потокосцепление  $\Psi_0$  зависит только от токов  $i_0$ , так как для них синхронная машина представляет собой простое индуктивное сопротивление (поскольку потоки нулевой последовательности не проникают в ротор) и никаких нулевых составляющих ЭДС в машине в результате вращения ее ротора не индуктируется. Поэтому уравнение напряжения для нулевых составляющих (4.22) может быть решено самостоятельно, независимо от других уравнений синхронной машины. Кроме того, это уравнение имеет смысл только при несимметричных режимах и его решение не вызывает трудностей, поэтому в дальнейшем оно не рассматривается.

Обычно при исследовании режимов работы электрических машин рассматривают не абсолютное движение ротора относительно статора, а его относительное движение по отношению к некоторой координатной системе (вернее, к одной из ее осей), вращающейся с синхронной частотой, которое характеризуется скольжением. Если считать скольжение положительным при вращении ротора с частотой, превышающей синхронную, то  $s = \frac{\omega - \omega_{\text{синх}}}{\omega_{\text{синх}}}$ .

При этом

$$\gamma = \omega t + \gamma_0 = \omega_{\text{синх}} (1-s)t + \gamma_0;$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega = \omega_{\text{синх}} (1-s);$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_{\text{синх}} \frac{ds}{dt},$$

поэтому уравнения (4.20), (4.21) и (4.2) можно представить в таком виде:

$$u_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_{\text{синх}} (1-s)\Psi_q - Ri_d; \quad (4.23)$$

$$u_q = \omega_{\text{синх}} (1-s)\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - Ri_q; \quad (4.24)$$

$$M_{\text{мх}} + M_{\text{эм}} = -J\omega_{\text{синх}} \frac{ds}{dt}. \quad (4.25)$$

Электромагнитный момент, входящий в последнее уравнение, связан с продольными и поперечными составляющими потокоцеплений и токов обмотки якоря простым соотношением

$$M_{эм} = \frac{3}{2}(\Psi_{q^i d} - \Psi_{d^i q}), \quad (4.26)$$

поэтому уравнение моментов, действующих на ротор синхронной машины в переходном процессе, целесообразно записать как

$$M_{мк} + \frac{3}{2}(\Psi_{q^i d} - \Psi_{d^i q}) = -J\omega_{синх} \frac{ds}{dt}. \quad (4.27)$$

Потокоцепления контуров машины, входящие в уравнения (4.20) и (4.21), в уравнения контуров ротора [3 последних уравнения системы (4.1)] и в уравнение моментов (4.27), являются функциями преобразованных токов якоря  $i_d$  и  $i_q$  и токов контуров ротора.

Если все параметры контуров ротора приведены к обмотке якоря, то при принятом ранее допущении о том, что при совпадении продольной оси ротора синхронной машины с магнитной осью любой фазы якоря все три контура, расположенные по этой оси, связаны только одним общим магнитным потоком взаимоиндукции, потокоцепления разных контуров определяются выражением:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_{ad} & M_{ad} & 0 & 0 \\ 3M_{ad}/2 & L_f & M_{ad} & 0 & 0 \\ 3M_{ad}/2 & M_{ad} & L_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & M_{aq} \\ 0 & 0 & 0 & 3M_{aq}/2 & L_{1q} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Все индуктивности и взаимные индуктивности, входящие в (4.28), являются постоянными величинами. Однако в этом выражении нарушен принцип взаимности между магнитно-связанными контурами ротора и преобразованными обмотками якоря: взаимные индуктивности между контурами ротора по любой из осей и обмоткой якоря по той же оси, определяемые со стороны последней, в 1,5 раза больше взаимных индуктивностей, определяемых со стороны контуров ротора. В справедливости этого легко убедиться, вычислив, например, потокоцепление обмотки возбуждения, обусловленное токами фаз якоря.

В соответствии с (4.3) потокоцепление обмотки возбуждения от токов фаз якоря составляет

$$\Psi_f = M_{fA}i_A + M_{fB}i_B + M_{fC}i_C.$$

Если сюда подставить выражения для  $M_{fd} = M_{df}$ ,  $M_{fB} = M_{Bf}$ ,  $M_{fC} = M_{cf}$ , используя (4.7а), и выражения для токов фаз якоря, используя (4.17), то получим:

$$\begin{aligned} \Psi_f = & M_{ad} \cos \gamma (i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0) + \\ & + M_{ad} \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \left[ i_d \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_0 \right] + \\ & + M_{ad} \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \left[ i_d \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + i_0 \right] \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \Psi_f = & M_{ad} i_d \left[ \cos^2 \gamma + \cos^2 \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos^2 \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\ & + M_{ad} i_q \left[ \cos \gamma \sin \gamma + \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\ & + M_{ad} i_0 \left[ \cos \gamma + \cos \left( \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left( \gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{aligned}$$

Выраженис в квадратных скобках первого слагаемого равно  $3/2$ , второго слагаемого – равно нулю и третьего слагаемого – равно нулю.

Таким образом

$$\Psi_f = \frac{3}{2} M_{ad} i_d.$$

Нарушение принципа взаимности объясняется тем, что согласно введенным линейным преобразованиям контуры якоря по осям  $d$  и  $q$  имеют то же число витков, что и каждая фазная обмотка якоря, а максимальные токи этих контуров равны амплитуде тока фазной обмотки. Поэтому ЭДС, индуцируемая в продольном или поперечном контуре якоря магнитным потоком какого-либо контура ротора, расположенного по той же оси, определяется взаимной индуктивностью этих контуров ( $M_{ad}$  или  $M_{aq}$ ), в то время как ЭДС, индуцируемая в любом контуре ротора магнитным потоком якоря, направленным по той же оси, является функцией токов всех трех фаз якоря, которые создают результирующую намагничивающую силу, превышающую амплитуду намагничивающей силы одной фазы в  $3/2$  раза.

Более удобна, очевидно, такая форма записи выражений для потокосцеплений, при которой выполняется принцип взаимности между магнитно-связанными контурами, т.е. когда взаимная индук-

тивность между любыми двумя контурами не зависит от направления индукции. С этой целью производят преобразования (4.28) – в него вместо действительных токов контуров ротора вводят приведенные токи, которые меньше действительных в  $3/2$  раза, а вместо действительных индуктивностей контуров ротора и взаимных индуктивностей  $M_{ad}$  и  $M_{aq}$  – соответствующие индуктивности и взаимные индуктивности, превышающие действительные в  $3/2$  раза.

В практике исследования переходных процессов в синхронных машинах широко используются уравнения, записанные в системе относительных единиц. При этом базисные условия можно выбрать так, чтобы при переходе от системы именованных единиц к системе относительных единиц одновременно осуществлялись указанные преобразования и таким образом выполнялся принцип взаимности между магнитно-связанными контурами ротора и преобразованными обмотками якоря. Такую систему относительных единиц называют взаимной.

Во взаимной системе относительных единиц в качестве базисной угловой частоты вращения  $\omega_6$  принимают синхронную угловую частоту вращения  $\omega_{\text{синх}}$ , в качестве базисного тока якоря  $I_6$  – амплитуду номинального фазного тока якоря, в качестве базисного напряжения якоря  $U_6$  – амплитуду номинального фазного напряжения. При таких условиях базисные сопротивление, индуктивность, потокосцепление, мощность и момент составляют:

$$Z_6 = \frac{U_6}{I_6};$$

$$L_6 = \frac{Z_6}{\omega_6} = \frac{Z_6}{\omega_{\text{синх}}};$$

$$\Psi_6 = L_6 I_6 = \frac{Z_6 I_6}{\omega_{\text{синх}}} = \frac{U_6}{\omega_{\text{синх}}};$$

$$S_6 = \frac{3}{2} U_6 I_6;$$

$$M_6 = \frac{S_6}{\omega_{\text{синх}}} = \frac{3U_6 I_6}{2\omega_{\text{синх}}} = \frac{3\Psi_6 I_6}{2}.$$

Если все члены уравнений (4.23) и (4.24) и последних трех уравнений из системы (4.1) разделить на  $U_6$ , а члены уравнения (4.27) – на  $M_6$  и опустить звездочки, обозначающие относительные значения величин (в дальнейшем звездочки для обозначения относительных значений будем применять лишь там, где их отсутствие может вызвать ошибочное представление), указанные уравнения примут вид:

$$\left. \begin{aligned}
 u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} \frac{1}{\omega_{\text{синх}}} - (1-s)\Psi_q - Ri_d; \\
 u_q &= (1-s)\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} \frac{1}{\omega_{\text{синх}}} - Ri_q; \\
 u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} \frac{1}{\omega_{\text{синх}}} + R_f i_f; \\
 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{dt} \frac{1}{\omega_{\text{синх}}} + R_{1d} i_{1d}; \\
 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{dt} \frac{1}{\omega_{\text{синх}}} + R_{1q} i_{1q}; \\
 T_J \frac{ds}{dt} &= M_{\text{мх}} + (\Psi_q i_d - \Psi_d i_q),
 \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

где  $T_J = J \frac{\omega_{\text{синх}}^2}{S_0}$  – механическая постоянная времени агрегата генератор-турбина.

В этих уравнениях синхронная частота вращения  $\omega_{\text{синх}}$  выражена в радианах в секунду, время и механическая постоянная времени агрегата – в секундах, остальные величины – в относительных единицах.

При выбранной системе относительных единиц индуктивности и взаимные индуктивности оказываются численно равными соответствующим индуктивностям сопротивлений и выполняется принцип взаимности между магнитно-связанными преобразованными обмотками якоря и контурами ротора. Поэтому выражение для потокоцеплений различных контуров можно представить так:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_q \\ \Psi_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ X_{ad} & X_f & X_{ad} & 0 & 0 \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \\ 0 & 0 & 0 & X_{aq} & X_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_q \\ i_{1q} \end{bmatrix}. \quad (4.30)$$

Часто в уравнениях синхронной машины время также выражают в относительных единицах, причем за базисное время принимают время, за которое ротор машины при синхронной угловой частоте вращения поворачивается на один радиан (электрический), т.е.  $t_0 = \frac{1}{\omega_{\text{синх}}}$ .

При этом время, выраженное в относительных единицах,  $\tau = \frac{t}{T_0} = t\omega_{\text{синх}}$ , поэтому уравнения синхронной машины принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{d\tau} - (1-s)\Psi_q - Ri_d; \\ u_q &= (1-s)\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{d\tau} - Ri_q; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{d\tau} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{d\tau} + R_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{d\tau} + R_{1q} i_{1q}; \\ T_J \omega_{\text{синх}} \frac{ds}{d\tau} &= M_{\text{мх}} - (\Psi_q i_d - \Psi_d i_q). \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

Уравнения синхронной машины в осях  $d$  и  $q$  были получены независимо друг от друга американским инженером Парком и российским ученым Горевым А.А. и в литературе называются уравнениями Парка–Горева.

При анализе электромагнитных переходных процессов в синхронных машинах обычно пренебрегают изменением  $s$  с частоты вращения, т.е. считают скольжение равным нулю. При этом процессы определяются только уравнениями напряжений контуров, которые существенно упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\frac{d\Psi_d}{d\tau} - \Psi_q - Ri_d; \\ u_q &= \Psi_d - \frac{d\Psi_q}{d\tau} - Ri_q; \\ u_f &= \frac{d\Psi_f}{d\tau} + R_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1d}}{d\tau} + R_{1d} i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{1q}}{d\tau} + R_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

## 4.6. Уравнения переходного процесса в синхронной машине в операторной форме

Для получения аналитических зависимостей между величинами, характеризующими переходный процесс в синхронной машине, часто используют уравнения Парка–Горева, записанные в операторной форме, которые отличаются экономичностью записи и быстротой решения. Наиболее простыми операторные уравнения оказываются при нулевых начальных условиях. Чтобы получить такие условия, целесообразно представить все переменные, входящие в систему уравнений Парка–Горева, в виде сумм значений этих переменных в предшествующем режиме и отклонений переменных от предшествующих значений, обусловленных изменением одной какой-либо величины (например, напряжения на выводах какой-либо обмотки синхронной машины), т.е.

$$\begin{aligned}\Psi_d &= \Psi_{d(0)} + \Delta\Psi_d; \\ u_q &= u_{q(0)} + \Delta u_q; \\ i_d &= i_{d(0)} + \Delta i_d \text{ и т.д.},\end{aligned}$$

где  $\Psi_{d(0)}$ ,  $u_{q(0)}$ ,  $i_{d(0)}$  – значения соответствующих переменных в предшествующем режиме;  $\Delta\Psi_d$ ,  $\Delta u_q$ ,  $\Delta i_d$  – отклонения переменных от предшествующих значений.

Если все переменные, записанные в указанной форме, подставить в уравнения Парка–Горева и исключить значения этих величин в предшествующем режиме, тождественно удовлетворяющие уравнениям, получим уравнения Парка–Горева для отклонений переменных:

$$\left. \begin{aligned}\Delta u_d &= -\frac{d\Delta\Psi_d}{d\tau} - \Delta\Psi_q - R\Delta i_d; \\ \Delta u_q &= \Delta\Psi_d - \frac{d\Delta\Psi_q}{d\tau} - R\Delta i_q; \\ \Delta u_f &= \frac{d\Delta\Psi_f}{d\tau} + R_f\Delta i_f; \\ 0 &= \frac{d\Delta\Psi_{1d}}{d\tau} + R_{1d}\Delta i_{1d}; \\ 0 &= \frac{d\Delta\Psi_{1q}}{d\tau} + R_{1q}\Delta i_{1q}.\end{aligned}\right\} \quad (4.33)$$

Поскольку в предшествующем режиме отклонения величин, входящих в (4.33), равны нулю, то уравнения Парка–Горсва для отклонений, записанные в операторной форме, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_d(p) &= -p\Delta\Psi_d(p) - \Delta\Psi_q(p) - R\Delta i_d(p); \\ \Delta u_q(p) &= \Delta\Psi_d(p) - p\Delta\Psi_q(p) - R\Delta i_q(p); \\ \Delta u_f(p) &= p\Delta\Psi_f(p) + R_f\Delta i_f(p); \\ 0 &= p\Delta\Psi_{1d}(p) + R_{1d}\Delta i_{1d}(p); \\ 0 &= p\Delta\Psi_{1q}(p) + R_{1q}\Delta i_{1q}(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

где

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_d(p) \\ \Delta\Psi_f(p) \\ \Delta\Psi_{1d}(p) \\ \Delta\Psi_q(p) \\ \Delta\Psi_{1q}(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{ad} & X_{ad} & 0 & 0 \\ X_{ad} & X_f & X_{ad} & 0 & 0 \\ X_{ad} & X_{ad} & X_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_q & X_{aq} \\ 0 & 0 & 0 & X_{aq} & X_{1q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_d(p) \\ \Delta i_f(p) \\ \Delta i_{1d}(p) \\ \Delta i_q(p) \\ \Delta i_{1q}(p) \end{bmatrix}. \quad (4.35)$$

Таким образом, уравнения (4.34) имеют тот же вид, что и исходные (4.33), только вместо отклонений переменных, являющихся функциями времени, в них входят изображения отклонений этих переменных, представляющие собой функции  $p$ , а знак дифференцирования заменен символом  $p$ , который является множителем.

## ГЛАВА ПЯТАЯ

---

---

# РАСЧЕТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОБЩЕННЫХ НАГРУЗОК

---

---

### 5.1. Общие замечания

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 представляют как сумму периодической и аperiodической 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 уравнения Парка–Горева и подставив в полученные выражения  $t = 0$ . Однако 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. Определение синхронной ЭДС синхронной машины из предшествующего установившегося режима

В установившемся симметричном режиме синхронной машины продольный и поперечный токи якоря  $i_d$  и  $i_q$ , а также ток возбуждения  $i_f$  постоянны, а токи в демпферных контурах отсутствуют. При этом потокосцепления всех контуров постоянны и в машине отсутствуют трансформаторные ЭДС. Поэтому первые два уравнения из системы (4.28) имеют вид:

$$u_d = -\Psi_q - Ri_d = -X_q i_q - Ri_d; \quad (5.1)$$

$$u_q = \Psi_d - Ri_q = X_{ad} i_f + X_d i_d - Ri_q \quad (5.2)$$

или

$$u_q = e_q + X_d i_d - Ri_q, \quad (5.2a)$$

где  $e_q = X_{ad} i_f$  – синхронная ЭДС машины.

Эти уравнения записаны в  $d, q$  координатах, а уравнения внешней электрической сети, подключенной к синхронной машине, обычно записывают в координатах комплексной плоскости. Поскольку в установившемся режиме работы синхронной машины  $d, q$  координаты вместе с ротором вращаются с синхронной частотой вращения, то оси  $d$  и  $q$  целесообразно совместить с осями комплексной плоскости и таким образом записать уравнения машины в координатах комплексной плоскости.

Возможны различные способы совмещения  $d, q$  координат и координат комплексной плоскости. Обычно ось вещественных величин комплексной плоскости (+) совмещают с осью  $q$  ротора, а ось мнимых

величин (+j) – с осью  $d$ . При этом  $u_q = \dot{U}_q$ ;  $i_q = \dot{I}_q$ ;  $ju_d = \dot{U}_d$ ;

$ji_d = \dot{I}_d$ . Поэтому, чтобы уравнения (5.1) и (5.2) записать в комплексной форме, следует умножить все члены (5.1) на  $j$ , а второе слагаемое правой части (5.2a) представить в виде:  $-jX_d ji_d$ . Тогда получим

$$\dot{U}_d = -jX_q \dot{I}_q - R \dot{I}_d; \quad (5.3)$$

$$\dot{U}_q = \dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d - R \dot{I}_q. \quad (5.4)$$

Если в (5.4) член  $-jX_d \dot{I}_d$  представить как  $-jX_q \dot{I}_d - j(X_d - X_q) \dot{I}_d$ , сложить левые и правые части (5.3) и (5.4) и учесть, что  $\dot{U}_d + \dot{U}_q = \dot{U}$  и  $\dot{I}_d + \dot{I}_q = \dot{I}$ , то

$$\dot{U} = \dot{E}_q - jX_q \dot{I} - R \dot{I} - j(X_d - X_q) \dot{I}_d,$$

откуда

$$\dot{E}_q = \dot{U} + R \dot{I} + jX_q \dot{I} + j(X_d - X_q) \dot{I}_d. \quad (5.5)$$

Это выражение позволяет построить векторную диаграмму синхронной машины на комплексной плоскости и определить из нее синхронную ЭДС  $\dot{E}_q$ . Исходными при построении векторной диаграммы являются векторы  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  и угол  $\varphi$  между ними (рис. 5.1).

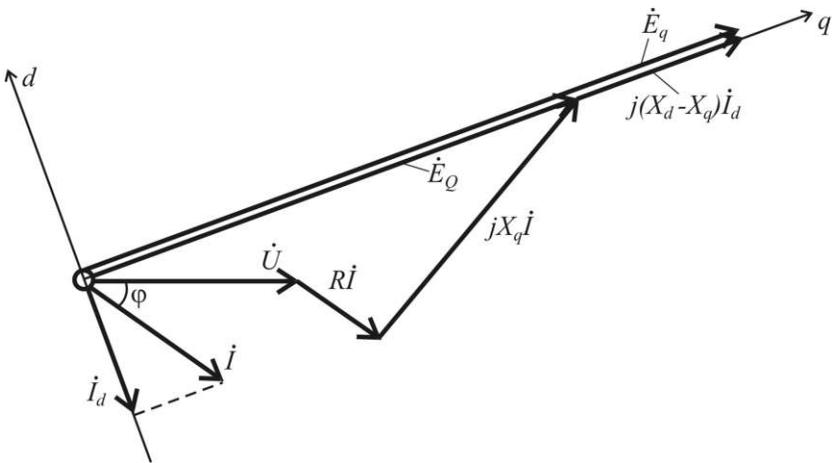


Рис. 5.1. Векторная диаграмма синхронной машины

Добавив к вектору  $\dot{U}$  сумму  $R \dot{I} + jX_q \dot{I}$ , найдем некоторый вектор  $\dot{E}_Q$ , который, как видно из (5.5), совпадает с поперечной осью  $q$  машины. Таким образом, положение оси  $q$  на комплексной плоскости определено. Проведя ось  $d$ , легко найти ток  $\dot{I}_d$  как проекцию

вектора тока  $\dot{I}$  на ось  $d$ . Откладывая, далее, от конца вектора  $\dot{E}_Q$  вектор  $j(\chi_d - \chi_q)\dot{I}_d$ , найдем вектор ЭДС  $\dot{E}_q$ .

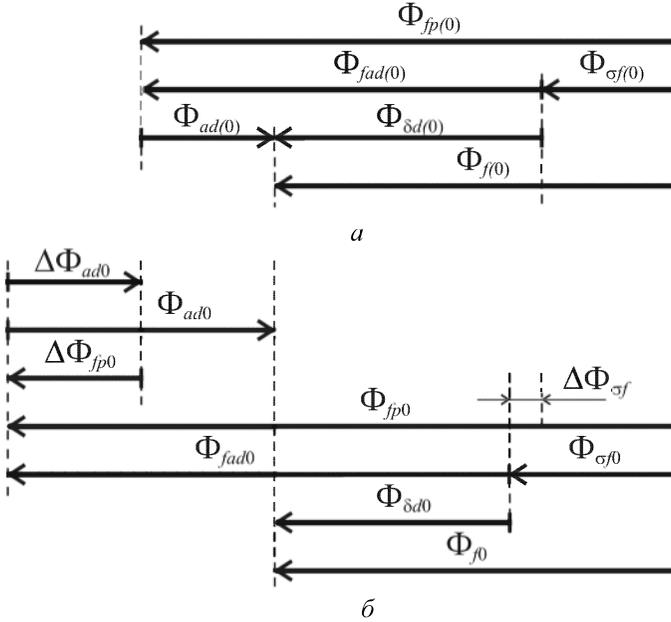
Синхронная ЭДС является важным режимным параметром синхронной машины. Однако, как будет видно из дальнейшего, эта ЭДС может быть использована только для анализа установившегося режима синхронной машины, а в момент любого внезапного изменения режима она мгновенно изменяется и степень ее изменения не может быть заранее определена.

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

Каждая синхронная машина имеет демпферные контуры, причем у гидрогенераторов они обычно устанавливаются специально, а у турбогенераторов роль демпферных контуров выполняет стальной массив ротора. Однако при анализе различных режимов работы синхронных машин с целью облегчения расчетов и более легкого представления физических процессов влиянием демпферных контуров часто пренебрегают (однако, в литературе, для простоты, при неучете влияния демпферных контуров, синхронную машину называют машиной без демпферных контуров, а при учете их влияния – машиной с демпферными контурами; такой подход принят и в данном учебнике).

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, обусловленная магнитным потоком от тока возбуждения; ЭДС зазора, индуктируемая магнитным потоком зазора машины; ЭДС, обусловленная магнитным потоком реакции якоря и т.д. Чтобы выявить, как изменяются эти ЭДС синхронного генератора в начальный момент короткого замыкания в цепи его якоря в случае неучета влияния демпферных контуров, и возможно ли определить такую ЭДС, которая остается неизменной в момент нарушения режима синхронной машины, рассмотрим баланс магнитных потоков в продольной оси ротора машины до короткого замыкания и в его начальный момент. Магнитный поток, созданный током возбуждения  $\Phi_{fp(0)}$ , совпадает с положительным направлением оси  $d$  и представляет собой сумму двух магнитных потоков – полезного потока  $\Phi_{fad(0)}$ , связанного с обмоткой якоря, и потока рассеяния обмотки возбуждения  $\Phi_{eff(0)}$

(см. рис. 5.2,*а*). Если до короткого замыкания генератор работал с активно-индуктивной нагрузкой, то магнитный поток реакции якоря  $\Phi_{ad(0)}$  направлен против магнитного потока  $\Phi_{fad(0)}$ , поэтому магнитный поток зазора равен  $\Phi_{\delta l(0)} = \Phi_{fad(0)} - \Phi_{ad(0)}$ . При этом суммарный магнитный поток, пронизывающий обмотку возбуждения, равен  $\Phi_{f(0)} = \Phi_{\delta l(0)} + \Phi_{\sigma f(0)}$ .



**Рис. 5.2. Баланс магнитных потоков по продольной оси ротора:**  
*а* – до короткого замыкания; *б* – в начальный момент короткого замыкания

В начальный момент короткого замыкания периодическая составляющая тока якоря синхронной машины мгновенно увеличивается. В результате мгновенно увеличивается и магнитный поток реакции якоря на  $\Delta\Phi_{ad0}$  и становится равным  $\Phi_{ad0}$  (см. рис. 5.2,*б*). Однако суммарный магнитный поток  $\Phi_f$ , пронизывающий обмотку возбуждения, не может мгновенно измениться. Поэтому в обмотке возбуждения возникает свободный ток, который по знаку совпадает с током возбуждения предшествующего режима и создает дополнительный магнитный поток  $\Delta\Phi_{fp0}$ , полностью компенсирующий приращение магнитного потока реакции якоря. Таким образом, магнитный поток, созданный током возбуждения, увеличивается и становится равным  $\Phi_{fp0} = \Phi_{fp(0)} + \Delta\Phi_{fp0}$ . При этом увеличивается и магнитный поток рассеяния обмотки возбуждения до  $\Phi_{\sigma f0}$ , так как при отсутствии насыщения магнитопровода коэффициент рассеяния обмотки возбужде-

ния  $\sigma_f = \Phi_{cf} / \Phi_{fp}$  остается неизменным. Увеличение потока рассеяния обмотки возбуждения приводит к такому же уменьшению потока в зазоре, поскольку поток  $\Phi_{\delta k} = \Phi_{fak} - \Phi_{adk}$ , а эта разность меньше разности  $\Phi_{fad(0)} - \Phi_{ad(0)} = \Phi_{\delta d(0)}$  на  $\Delta\Phi_{cf0}$  (см. рис. 5.2,б). Таким образом, появление в обмотке возбуждения свободного тока приводит к мгновенному увеличению синхронной ЭДС машины  $E_q$ , пропорциональной  $\Phi_{fp}$ , и уменьшению ЭДС зазора  $E_{\delta q}$ , причем их новые значения зависят от искомого значения периодической составляющей тока якоря. Поэтому указанные ЭДС не могут быть использованы для определения последнего.

Поскольку в начальный момент короткого замыкания неизменным остается суммарный магнитный поток  $\Psi_f$ , пронизывающий обмотку возбуждения, и соответственно потокосцепление обмотки возбуждения  $\Psi_f$ , то, очевидно, неизменной остается и ЭДС якоря, пропорциональная указанному потокосцеплению. Найдем эту ЭДС. С этой целью, используя выражение для потокосцепления обмотки возбуждения при отсутствии демпферных контуров

$$\Psi_f = X_f i_f + X_{ad} i_d,$$

найдем ток возбуждения

$$i_f = \frac{\Psi_f}{X_f} - \frac{X_{ad}}{X_f} i_d$$

и подставим это выражение в (5.2). В результате получим:

$$u_q = \Psi_f \frac{X_{ad}}{X_f} + \left( X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \right) i_d$$

или

$$u_q = e'_q + X'_d i_d, \quad (5.6)$$

где

$$e'_q = \Psi_f \frac{X_{ad}}{X_f} \quad (5.7)$$

и

$$X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}. \quad (5.8)$$

Как видно из (5.7), именно ЭДС  $e'_q$  пропорциональна потокосцеплению обмотки возбуждения, вследствие чего в момент любого

го нарушения режима остается неизменной, что позволяет перейти от исходного режима к новому. Указанная ЭДС называется переходной.

Соответствующее этой ЭДС сопротивление  $X'_d$  называется переходным индуктивным сопротивлением по продольной оси.

В координатах комплексной плоскости уравнение (5.6) записывается так:

$$\dot{U}_q = \dot{E}'_q - jX'_d \dot{I}_d, \quad (5.9)$$

откуда

$$\dot{E}'_q = \dot{U}_q + jX'_d \dot{I}_d. \quad (5.10)$$

Последнее выражение позволяет определить начальное значение переходной ЭДС  $E'_{q0}$  из векторной диаграммы синхронной машины до момента короткого замыкания (рис. 5.3,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 ее действующее значение равно

$$\dot{I}_{п0} = \dot{I}'_{d0} = \frac{\dot{E}'_{q0}}{j(X'_d + X_{вн})}, \quad (5.11)$$

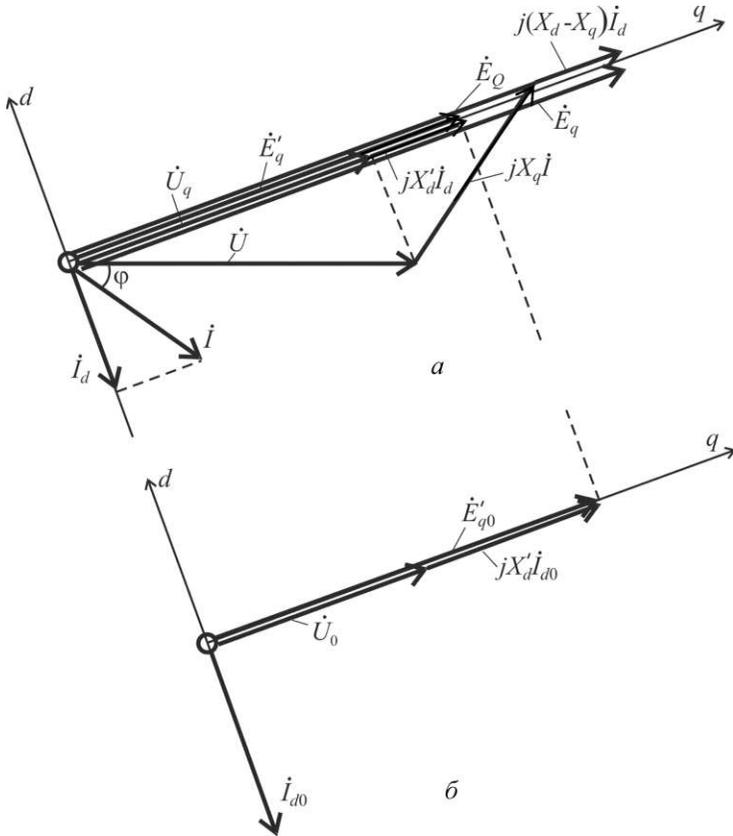
а напряжение на выводах генератора  $\dot{U} = jX_{вн} \dot{I}_{п0}$ .

Соответствующая векторная диаграмма синхронной машины в начальный момент короткого замыкания приведена на рис. 5.3,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 доста-

точно знать истинные напряжение и ток машины до короткого замыкания. Искомая ЭДС связана с этими величинами соотношением:

$$\dot{E}' = \dot{U} + jX'_d \dot{I}. \quad (5.12)$$



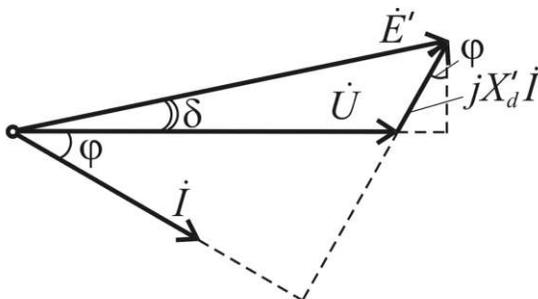
**Рис. 5.3. Векторные диаграммы тока и напряжения синхронного генератора без демпферных контуров:**  
*a* – до короткого замыкания;  
*б* – в начальный момент короткого замыкания

Векторная диаграмма синхронного генератора, построенная по (5.12), приведена на рис. 5.4. Из этой диаграммы следует

$$E'_{(0)} = \sqrt{\left( U_{(0)} \cos \phi_{(0)} \right)^2 + \left( U_{(0)} \sin \phi_{(0)} + X'_d I_{(0)} \right)^2} \quad (5.13)$$

или

$$E'_{(0)} = \sqrt{\left( U_{(0)} + X'_d I_{(0)} \sin \phi_{(0)} \right)^2 + \left( X'_d I_{(0)} \cos \phi_{(0)} \right)^2}. \quad (5.14)$$



**Рис. 5.4.** Упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора без демпферных контуров

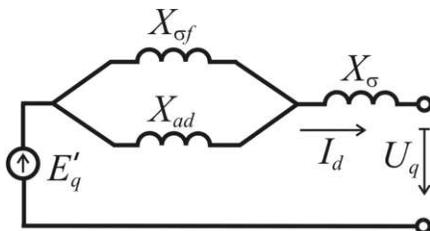
Поскольку угол  $\delta$  между векторами напряжения и переходной ЭДС незначителен, то для определения  $E'_{(0)}$  можно использовать также следующее приближенное выражение

$$E'_{(0)} \approx U_{(0)} + X'_d I_{(0)} \sin \phi_{(0)}. \quad (5.15)$$

Формулу (5.8) для переходного сопротивления можно преобразовать так:

$$X'_d = X_\sigma + X_{ad} - \frac{X_{ad}^2}{X_{\sigma f} + X_{ad}} = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{ad}}}. \quad (5.16)$$

Выражениям (5.10) и (5.16) соответствует схема замещения синхронной машины без демпферных контуров, приведенная на рис. 5.5.



**Рис. 5.5.** Схема замещения синхронной машины без демпферных контуров

## 5.4. 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. Найдем эту ЭДС.

В соответствии с (4.26) при установившемся симметричном режиме второе уравнение из системы (4.28) можно представить как

$$u_q = (X_{ad} + X_{\sigma})i_d + X_{ad}i_f + X_{ad}i_{1d} - Ri_q. \quad (5.17)$$

Входящие в (5.17) ток обмотки возбуждения  $i_f$  и ток продольного демпферного контура  $i_{1d}$  целесообразно исключить, используя с этой целью выражения для потокосцеплений обмотки возбуждения  $\Psi_f$  и продольного демпферного контура  $\Psi_{1d}$ :

$$\begin{aligned} \Psi_f &= X_{ad}i_d + (X_{\sigma f} + X_{ad})i_f + X_{ad}i_{1d}; \\ \Psi_{1d} &= X_{ad}i_d + X_{ad}i_f + (X_{\sigma 1d} + X_{ad})i_{1d}. \end{aligned}$$

Если представить в первом равенстве  $X_f$  как  $X_{\sigma f} + X_{ad}$ , а во втором  $X_{1d}$  как  $X_{\sigma 1d} + X_{ad}$  и разделить обе части первого равенства на  $X_{\sigma f}$ , а второго – на  $X_{\sigma 1d}$ , затем сложить левые и правые части полученных выражений, то найдем, что

$$\frac{\Psi_f}{X_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{X_{\sigma 1d}} = \left( \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} \right) X_{ad}i_d + \left( \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}} \right) (X_{ad}i_f + X_{ad}i_{1d}),$$

откуда

$$X_{ad}i_f + X_{ad}i_{1d} = \frac{\frac{\Psi_f}{X_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{X_{\sigma 1d}}}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} - \frac{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}}}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} X_{ad}i_d.$$

Подстановка полученного выражения для  $X_{ad}i_f + X_{ad}i_{1d}$  в (5.17) даст:

$$u_q = \frac{\frac{\Psi_f}{X_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{X_{\sigma 1d}}}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} + \left( X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} \right) i_d - Ri_q$$

или

$$u_q = e_q'' + X_d'' i_d - Ri_q, \quad (5.18)$$

где

$$e_q'' = \frac{\frac{\Psi_f}{X_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{X_{\sigma 1d}}}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}} \quad (5.19)$$

и

$$X_d'' = X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}}}. \quad (5.20)$$

Как видно из (5.19), ЭДС  $e_q''$  определяется только параметрами синхронной машины и потокосцеплениями обмотки возбуждения и продольного демпферного контура, которые в момент любого нарушения режима остаются неизменными. Поэтому она позволяет перейти от одного режима к другому, в частности, от нормального установившегося режима к режиму короткого замыкания и называется сверхпереходной ЭДС по поперечной оси. Соответствующее этой ЭДС сопротивление  $X_d''$  называется сверхпереходным индуктивным сопротивлением по продольной оси.

В координатах комплексной плоскости выражение (5.18) записывается так:

$$\dot{U}_q = \dot{E}_q'' - jX_d'' \dot{I}_d - R \dot{I}_q \quad (5.21)$$

или, пренебрегая активным сопротивлением обмотки якоря,

$$\dot{U}_q = \dot{E}_q'' - jX_d'' \dot{I}_d, \quad (5.21a)$$

откуда

$$\dot{E}_q'' = \dot{U}_q + jX_d'' \dot{I}_d. \quad (5.22)$$

Продольная составляющая напряжения синхронной машины с демпферными контурами в установившемся режиме в соответствии с (4.28) составляет

$$u_d = -\Psi_q - Ri_d = -X_q i_q - X_{aq} i_q - Ri_d. \quad (5.23)$$

В начальный момент короткого замыкания неизменным в поперечной оси машины остается только потокоцепление поперечного демпферного контура, определяемое выражением

$$\Psi_{1q} = X_{aq}i_q + X_{1q}i_{1q}.$$

Отсюда ток поперечного демпферного контура

$$i_{1q} = \frac{\Psi_{1q}}{X_{1q}} - \frac{X_{aq}}{X_{1q}}i_q.$$

Подставив это выражение в (5.23), получим

$$u_d = -\Psi_{1q} \frac{X_{aq}}{X_{1q}} - \left( X_q - \frac{X_{aq}^2}{X_{1q}} \right) i_q - Ri_d$$

или

$$u_d = e_d'' - X_q'' i_q - Ri_d, \quad (5.24)$$

где

$$e_d'' = -\Psi_{1q} \frac{X_{aq}}{X_{1q}} \quad (5.25)$$

и

$$X_q'' = X_q - \frac{X_{aq}^2}{X_{1q}} = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma 1q}} + \frac{1}{X_{aq}}}. \quad (5.26)$$

Как видно из (5.25), ЭДС  $e_d''$  пропорциональна потокоцеплению поперечного демпферного контура, поэтому в момент любого нарушения режима остается неизменной и называется сверхпереходной ЭДС по продольной оси. Соответствующее этой ЭДС сопротивление  $X_q''$  называется сверхпереходным индуктивным сопротивлением по поперечной оси.

В координатах комплексной плоскости выражение (5.24) имеет вид:

$$\dot{U}_d = \dot{E}_d'' - jX_q'' \dot{I}_q - R \dot{I}_d \quad (5.27)$$

или, при неучете активного сопротивления обмотки якоря,

$$\dot{U}_d = \dot{E}_d'' - jX_q'' \dot{I}_q, \quad (5.27a)$$

откуда

$$\dot{E}_d'' = \dot{U}_d + jX_q'' \dot{I}_q. \quad (5.28)$$

Выражения (5.22) и (5.28) показывают, что сверхпереходные ЭДС

$\dot{E}''_q$  и  $\dot{E}''_d$  могут быть определены по данным предшествующего короткому замыканию установившегося режима работы машины. С этой целью из векторной диаграммы машины, построенной для этого режима, находят продольные и поперечные составляющие тока и напряжения и, используя (5.22) и (5.28), находят искомые ЭДС (рис. 5.6,а).

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

$$\dot{i}''_{d0} = \frac{\dot{E}''_{q0}}{j(X''_d + X_{вн})} = \frac{\dot{E}''_{q(0)}}{j(X''_d + X_{вн})}; \quad (5.29)$$

$$\dot{i}''_{q0} = \frac{\dot{E}''_{d0}}{j(X''_q + X_{вн})} = \frac{\dot{E}''_{d(0)}}{j(X''_q + X_{вн})}, \quad (5.30)$$

поэтому искомое начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания

$$I_{п0} = \sqrt{I_{d0}''^2 + I_{q0}''^2}. \quad (5.31)$$

Векторная диаграмма машины в начальный момент короткого замыкания приведена на рис. 5.6,б. Поскольку  $X''_q > X''_d$ , то, как видно из (5.29) и (5.30), угол между векторами результирующей ЭДС  $\dot{E}''_0$  и результирующего тока  $\dot{I}_{п0}$  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:

$$\dot{E}'' = \dot{U} + jX''_d \dot{I}, \quad (5.32)$$

а ее модуль к моменту короткого замыкания

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} \cos \phi_{(0)}\right)^2 + \left(U_{(0)} \sin \phi_{(0)} + X''_d I_{(0)}\right)^2} \quad (5.33)$$

или

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} + X''_d I_{(0)} \sin \phi_{(0)}\right)^2 + \left(X''_d I_{(0)} \cos \phi_{(0)}\right)^2}. \quad (5.34)$$

В приближенных расчетах можно использовать следующую формулу:

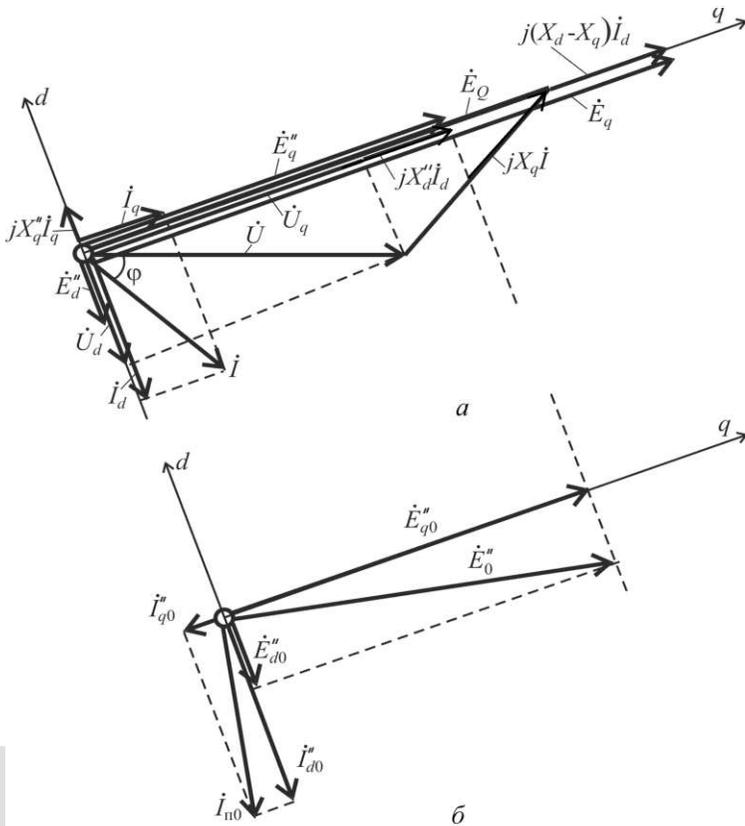
$$E''_{(0)} \approx U_{(0)} + X''_d I_{(0)} \sin \phi_{(0)}. \quad (5.35)$$

Сверхпереходная ЭДС синхронного компенсатора определяется как

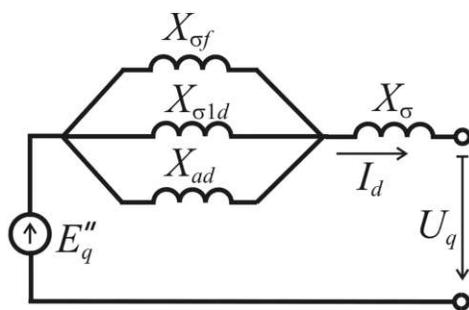
$$E''_{(0)} = U_{(0)} \pm X''_d I_{(0)}, \quad (5.36)$$

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

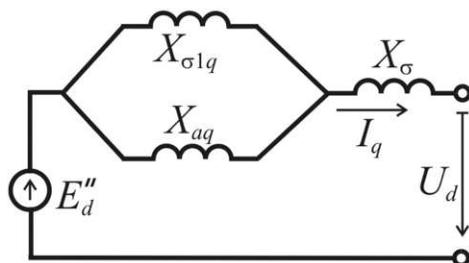
Выражения (5.22), (5.20) и (5.28), (5.26) позволяют составить схемы замещения синхронной машины с демпферными контурами соответственно по продольной и поперечной осям ротора. Такие схемы приведены на рис. 5.7,а и 5.7,б.



**Рис. 5.6. Векторные диаграммы тока и напряжения синхронного генератора с демпферными контурами:**  
*а* – до короткого замыкания; *б* – в начальный момент короткого замыкания



*a*



*б*

**Рис. 5.7. Схемы замещения синхронной машины с демпферными контурами:**

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

## 5.5. 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;

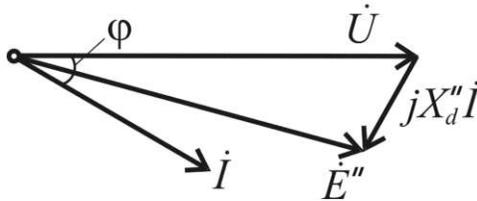
- если же остаточное напряжение остается больше сверхпереходной ЭДС, то они продолжают потреблять реактивную мощность из сети.

Сверхпереходная ЭДС синхронного электродвигателя до короткого замыкания при его работе с недовозбуждением в соответствии с упрощенной векторной диаграммой ( $X_q'' = X_d''$ ), приведенной на рис. 5.8, может быть определена по формуле

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} - X_d'' I_{(0)} \sin \phi_{(0)}\right)^2 + \left(X_d'' I_{(0)} \cos \phi_{(0)}\right)^2} \quad (5.37)$$

или

$$E''_{(0)} \approx U_{(0)} - X_d'' I_{(0)} \sin \phi_{(0)}. \quad (5.38)$$



**Рис. 5.8. Векторная диаграмма синхронного электродвигателя, работающего с недовозбуждением**

Асинхронные электродвигатели в начальный момент короткого замыкания можно рассматривать как синхронные электродвигатели, работающие с недовозбуждением, поэтому их влияние на начальный ток в месте короткого замыкания 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  $X_{*K(\text{ном})}$  (так как только в

этом случае можно пренебречь активными сопротивлениями  $\frac{R}{s}$ ), т.е.

$$X_{*}''_{(\text{ном})} \approx X_{*} K_{(\text{ном})} \approx \frac{1}{I_{*}''_{\text{п}}}, \quad (5.39)$$

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

Для определения сверхпереходной ЭДС асинхронных электродвигателей применимы формулы (5.37) и (5.38). При этом в них вместо  $X_{*}''_{\text{д}}$  следует подставлять сверхпереходное сопротивление асинхронного электродвигателя, определяемое по (5.39).

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 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 эквивалентируют следующими параметрами:  $I_{*}''_{(\text{ном})} = 0,85$  и  $X_{*}''_{(\text{ном})} = 0,35$ .

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.

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

---

---

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ДЕМПФЕРНЫХ КОНТУРОВ

---

---

### 6.1. Уравнения переходного процесса синхронной машины и их корни

При неучете демпферных контуров у синхронной машины изображения отклонений потокоцеплений ее контуров согласно (4.31) составляют

$$\Delta\Psi_d(p) = X_d\Delta i_d(p) + X_{ad}\Delta i_f(p); \quad (6.1)$$

$$\Delta\Psi_f(p) = X_{ad}\Delta i_d(p) + X_f\Delta i_f(p); \quad (6.2)$$

$$\Delta\Psi_q(p) = X_q\Delta i_q(p), \quad (6.3)$$

поэтому уравнения Парка–Горсва в операторной форме имеют вид:

$$\Delta u_d(p) = -(pX_d + R)\Delta i_d(p) - pX_{ad}\Delta i_f(p) - X_q\Delta i_q(p); \quad (6.4)$$

$$\Delta u_q(p) = X_d\Delta i_d(p) + X_{ad}\Delta i_f(p) - (pX_q + R)\Delta i_q(p); \quad (6.5)$$

$$\Delta u_f(p) = pX_{ad}\Delta i_d(p) + (pX_f + R_f)\Delta i_f(p). \quad (6.6)$$

Характеристическое уравнение, соответствующее этой системе уравнений, после ряда преобразований может быть представлено как

$$p^3 + \left( \frac{R}{X_q} + \frac{X_d}{T_{f0}X'_d} + \frac{R}{X'_d} \right) p^2 + \left[ 1 + \frac{R(X_d + X_q)}{T_{f0}X'_dX_q} + \frac{R^2}{X'_dX_q} \right] p + \frac{X_d}{T_{f0}X'_d} + \frac{R^2}{T_{f0}X'_dX_q} = 0, \quad (6.7)$$

где  $T_{f0} = \frac{X_f}{R_f}$  – собственная постоянная времени обмотки возбуждения.

Таким образом, система дифференциальных уравнений синхронной машины даже при отсутствии у нее демпферных контуров имеет третий порядок, что является следствием несимметрии ротора. Корни характеристического уравнения могут быть определены в общем виде, однако получающиеся при этом выражения оказываются очень сложными и мало пригодными для практического использования. Поэтому обычно применяют приближенные способы определения корней. Поскольку активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения синхронных машин значительно меньше индуктивных сопротивлений, приемлемую точность результатов обеспечивает способ, основанный на поочередном приравнении нулю входящих в уравнение активных сопротивлений этих обмоток.

Полагая в (6.7) активное сопротивление обмотки возбуждения равным нулю (т.е.  $T_{f0} = \infty$ ), получим уравнение

$$\left[ p^2 + \frac{(X'_d + X_q)R}{X'_d X_q} p + \left( 1 + \frac{R^2}{X'_d X_q} \right) \right] p = 0,$$

откуда

$$p_{1,2} = -\frac{(X'_d + X_q)R}{2X'_d X_q} \pm j \sqrt{1 - \frac{(X_q - X'_d)^2 R^2}{4X'^2_d X^2_q}}; \quad (6.8)$$

$$p_3 = 0.$$

Если же принять активное сопротивление обмотки якоря равным нулю, то уравнение (6.7) примет вид:

$$p^3 + \frac{X_d}{T_{f0} X'_d} p^2 + p + \frac{X_d}{T_{f0} X'_d} = (p^2 + 1) \left( p + \frac{X_d}{T_{f0} X'_d} \right) = 0,$$

откуда

$$p_{1,2} = \pm j;$$

$$p_3 = -\frac{X_d}{T_{f0} X'_d}. \quad (6.9)$$

Третья степень характеристического уравнения физически означает, что в синхронной машине без демпферных контуров при переходных процессах, связанных с изменением напряжения на выводах обмотки якоря или обмотки возбуждения, возникают три сво-

бодных магнитных потока (потокосцепления) и тока. При этом вещественная часть любого корня этого уравнения характеризует затухание соответствующего свободного магнитного потока и тока, а мнимая часть корня определяет частоту вращения потока по отношению к той системе координат, в которой рассматривается этот поток. Поскольку любой свободный магнитный поток синхронной машины является затухающим, то действительная часть каждого из трех корней не может быть равна нулю. Таким образом, значения корней  $p_1 = +j$ ,  $p_2 = -j$  и  $p_3 = 0$ , означающие отсутствие затухания свободных магнитных потоков, должны быть отброшены. Только выражения (6.8) и (6.9) соответствуют реальным условиям и с приемлемой точностью определяют значения корней характеристического уравнения.

Корень  $p_3$ , определяемый выражением (6.9), показывает, что соответствующий ему свободный магнитный поток неподвижен относительно ротора, а относительно якоря вращается с синхронной частотой и затухает с постоянной времени

$$T'_d = -\frac{1}{p} = \frac{T_{f0} X'_d}{X_d} = T'_f. \quad (6.10)$$

где  $T'_f$  – постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой накоротко обмотке якоря.

Рассматриваемый магнитный поток обусловлен затухающей с постоянной времени  $T'_d$  свободной апериодической составляющей тока обмотки возбуждения и свободной периодической (переходной) составляющей основной частоты тока якоря, амплитуда которой затухает с той же постоянной времени  $T'_d$ .

Подкоренное выражение в (6.8) близко к единице, поэтому

$$p_{1,2} \approx -\frac{R}{X_2} \pm j = -\frac{1}{T_a} \pm j. \quad (6.11)$$

где  $X_2 = \frac{2X'_d X_q}{X'_d + X_q}$  – сопротивление обратной последовательности синхронной машины;

$$T_a = \frac{X_2}{R}. \quad (6.12)$$

Выражение (6.11) показывает, что корням  $p_1$  и  $p_2$  соответствуют свободные магнитные потоки, которые относительно ротора вращаются практически с синхронной частотой в противоположных направлениях. Один из них относительно обмотки якоря оказывается неподвижным, а другой – вращается с двойной синхронной частотой в сто-

рону вращения ротора, причем оба затухают с постоянной времени  $T_a$ . Эти магнитные потоки обусловлены двумя свободными составляющими тока якоря – аperiodической и периодической двойной частоты, а также свободной периодической составляющей основной частоты тока возбуждения, причем как аperiodическая, так и амплитуды указанных периодических составляющих токов затухают с одинаковой постоянной времени  $T_a$ .

Таким образом, при переходном процессе в синхронной машине без демпферных контуров, вызванном, например, коротким замыканием, ток якоря  $i$  кроме принужденной установившейся периодической составляющей  $i_y$  (рис. 6.1) содержит свободную переходную составляющую основной частоты  $i_{п\text{ св}}$  (на рис. 6.1 представлен суммарный периодический ток основной частоты  $i_{п} = i_y + i_{п\text{ св}}$ ), амплитуда которой затухает с постоянной времени  $T'_d$ , свободную аperiodическую составляющую  $i_a$ , затухающую с постоянной времени  $T_a$ , и свободную периодическую составляющую двойной частоты  $i_{2f}$ , амплитуда которой затухает с той же постоянной времени  $T_a$ . А ток обмотки возбуждения  $i_f$  (рис. 6.2) помимо постоянной принужденной составляющей  $i_{f0}$  содержит свободную аperiodическую составляющую  $i_{fa}$ , затухающую с постоянной времени  $T'_d$ , и свободную периодическую составляющую основной частоты  $i_{fn}$ , амплитуда которой затухает с постоянной времени  $T_a$ .

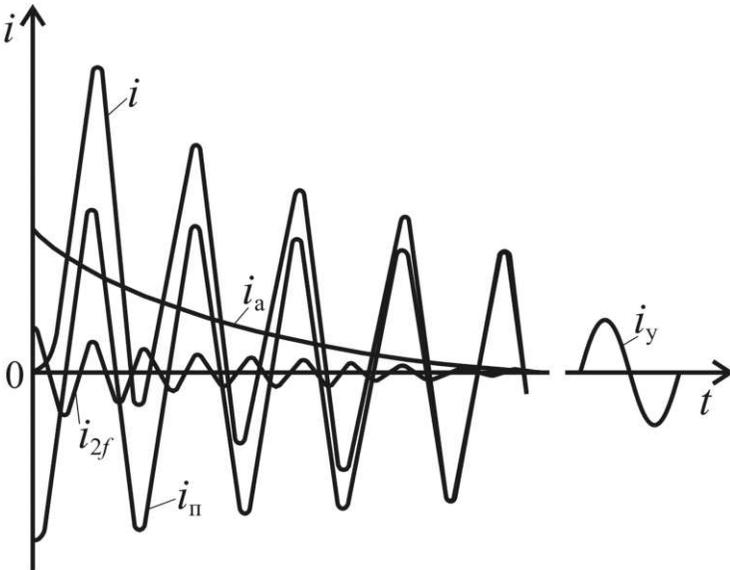


Рис. 6.1. Ток обмотки якоря  $i$  и его составляющие при трехфазном коротком замыкании

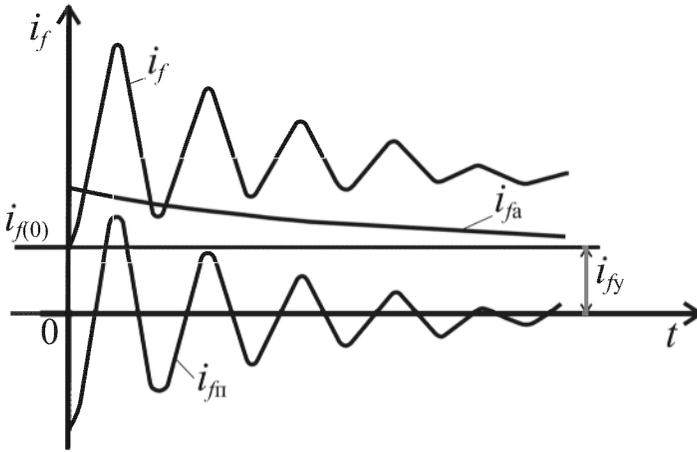


Рис. 6.2. Ток обмотки возбуждения и его составляющие при трехфазном коротком замыкании

## 6.2. Изменение во времени тока якоря синхронной машины при трехфазном коротком замыкании

Обычно исследование переходного процесса в синхронной машине при коротком замыкании сводится к определению закона изменения тока якоря. Изображения отклонений продольной и поперечной составляющих этого тока могут быть найдены из уравнений напряжения обмоток якоря (6.4) и (6.5), если предварительно исключить из них изображение отклонения тока возбуждения. Из (6.6) следует:

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_f(p)}{pX_f + R_f} - \frac{pX_{ad}}{pX_f + R_f} \Delta i_d(p),$$

поэтому

$$\Delta u_d(p) = - \left[ p \left( X_d - \frac{pX_{ad}^2}{pX_f + R_f} \right) + R \right] \Delta i_d(p) - p \frac{X_{ad} \Delta u_f(p)}{pX_f + R_f} - X_q \Delta i_q(p);$$

$$\Delta u_q(p) = \left( X_d - \frac{pX_{ad}^2}{pX_f + R_f} \right) \Delta i_d(p) + \frac{X_{ad} \Delta u_f(p)}{pX_f + R_f} - (pX_q + R) \Delta i_q(p)$$

или

$$\Delta u_d(p) = -[pX_d(p) + R]\Delta i_d(p) - pG(p)\Delta u_f(p) - X_q\Delta i_q(p); \quad (6.13)$$

$$\Delta u_q(p) = X_d(p)\Delta i_d(p) + G(p)\Delta u_f(p) - (pX_q + R)\Delta i_q(p), \quad (6.14)$$

где

$$X_d(p) = X_d - \frac{pX_{ad}^2}{pX_f + R_f} = \frac{pT_{f0}X'_d + X_d}{pT_{f0} + 1} = X_d \frac{pT'_d + 1}{pT_{f0} + 1}; \quad (6.15)$$

$$G(p) = \frac{X_{ad}}{pX_f + R_f} = \frac{X_{ad}}{R_f(pT_{f0} + 1)}. \quad (6.16)$$

Функция  $X_d(p)$  называется операторным сопротивлением синхронной машины по продольной оси, а функция  $G(p)$  – операторной проводимостью машины по продольной оси.

Из (6.13) и (6.14) следует

$$\Delta i_d(p) = \frac{X_q\Delta u_q(p) - (pX_q + R)\Delta u_d(p) - [(p^2 + 1)X_q + pR]G(p)\Delta u_f(p)}{[pX_d(p) + R](pX_q + R) + X_d(p)X_q}; \quad (6.17)$$

$$\Delta i_q(p) = -\frac{[pX_d(p) + R]\Delta u_q(p) + X_d(p)\Delta u_d(p) + RG(p)\Delta u_f(p)}{[pX_d(p) + R](pX_q + R) + X_d(p)X_q}. \quad (6.18)$$

Выражения (6.17) и (6.18) позволяют определить  $\Delta i_d(p)$  и  $\Delta i_q(p)$  при переходных процессах, связанных с внезапным изменением напряжения на выводах какой-либо обмотки или обсах обмоток машины. В частности, при трехфазном коротком замыкании на выводах синхронной машины напряжение в месте короткого замыкания мгновенно снижастся до нуля. Это можно представить как наложение на напряжение в предшествующем режиме  $U_{(0)}$  отклонения напряжения  $\Delta U$ , при котором  $U_{(0)} + \Delta U = 0$ , откуда  $\Delta U = -U_{(0)}$ . Соответственно  $\Delta u_d = -u_{d(0)}$  и  $\Delta u_q = -u_{q(0)}$ , т.е. отклонения напряжений  $\Delta u_d$  и  $\Delta u_q$  определяются предшествующими значениями продольной и поперечной составляющих напряжения якоря и являются постоянными величинами, поэтому  $\Delta u_d(p) = -\frac{u_{d(0)}}{p}$  и  $\Delta u_q(p) = -\frac{u_{q(0)}}{p}$ . Таким образом,

при трехфазном коротком замыкании на выводах синхронной машины без демпферных контуров выражения для  $\Delta i_d(p)$  и  $\Delta i_q(p)$  имеют вид:

$$\Delta i_d(p) = \frac{-\frac{X_q u_{q(0)}}{p} + \frac{(pX_q + R)u_{d(0)}}{p} - [(p^2 + 1)X_q + pR]G(p)\Delta u_f(p)}{[pX_d(p) + R](pX_q + R) + X_d(p)X_q}; \quad (6.17a)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{\frac{[pX_d(p) + R]u_{q(0)} + X_d(p)u_{d(0)}}{p} - RG(p)\Delta u_f(p)}{[pX_d(p) + R](pX_q + R) + X_d(p)X_q}. \quad (6.18a)$$

Если короткое замыкание происходит не на выводах синхронной машины, а во внешней сети, то целесообразно индуктивное сопротивление элементов цепи, заключенных между выводами машины и точкой короткого замыкания, рассматривать как часть сопротивления рассеяния якоря этой машины, т.е. прибавлять его к параметрам машины  $X_d$ ,  $X_q$  и др. Такой подход позволяет короткое замыкание в любой точке сети свести к короткому замыканию на выводах машины. При этом под  $u_{d(0)}$  и  $u_{q(0)}$  в выражениях (6.17a) и (6.18a) следует понимать предшествующие значения составляющих напряжения в той точке сети, где находится расчетное короткое замыкание.

Обычно короткое замыкание сопровождается увеличением напряжения на выводах обмотки возбуждения синхронной машины, что обусловлено действием устройства для автоматического регулирования возбуждения (АРВ), а при значительных снижениях напряжения на выводах обмотки якоря (обычно до 0,8–0,85 от номинального напряжения) – действием устройства для форсировки возбуждения. В последнем случае в зависимости от удаленности точки короткого замыкания напряжение возбуждения синхронной машины может увеличиваться существенно, вплоть до предельного (потолочного) значения, на которое рассчитана система возбуждения машины.

Если изображение  $\Delta u_f(p)$  найдено, то изображения отклонений токов  $\Delta i_d(p)$  и  $\Delta i_q(p)$  становятся определенными функциями оператора  $p$ . По полученным изображениям можно, например, с помощью теоремы разложения найти оригиналы – отклонения токов  $\Delta i_d$  и  $\Delta i_q$  как функций времени. Добавив затем к найденным отклонениям токов их предшествующие значения  $i_{d(0)}$  и  $i_{q(0)}$ , получим полные токи  $i_d$  и  $i_q$ . Наконец, с помощью формул линейного преобразования нетрудно найти фазные токи машины  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ .

Вместе с тем, как видно из выражений (6.17a) и (6.18a), даже при работе машины без АРВ, т.е. при  $\Delta u_f(p) = 0$  выражения для  $\Delta i_d(p)$  и  $\Delta i_q(p)$  являются достаточно сложными. Поскольку индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения синхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то задачу расчета тока короткого замыкания можно существенно упростить, если сначала найти закон изменения во времени тока короткого замыкания без учета затухания его свободных составляющих, т.е. полагая одновременно  $R = 0$  и  $R_f = 0$ , а затем, рассчитав по формулам (6.10) и (6.12) постоянные времени  $T_d'$  и  $T_a$ , учесть затухание свободных составляющих тока короткого замыкания.

При таком способе решения задачи выражения (6.17а) и (6.18а) существенно упрощаются. Например, если устройство АРВ машины отключено, то

$$\Delta i_d(p) = \frac{1}{(p^2 + 1)X'_d} \left( u_{d(0)} - \frac{u_{q(0)}}{p} \right); \quad (6.17б)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{1}{(p^2 + 1)X_q} \left( u_{q(0)} + \frac{u_{d(0)}}{p} \right). \quad (6.18б)$$

Окончательное выражение для тока фазы А имеет вид:

$$i_A = \left[ \frac{e_{q(0)}}{X_d} + \left( \frac{e'_{q(0)}}{X'_d} - \frac{e_{q(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \cos(t + \gamma_0) - \\ - \left( u_{q(0)} \cos \gamma_0 + u_{d(0)} \sin \gamma_0 \right) \frac{X'_d + X_q}{2X'_d X_q} e^{-\frac{t}{T'_a}} - \\ - \left[ u_{q(0)} \cos(2t + \gamma_0) - u_{d(0)} \sin(2t + \gamma_0) \right] \frac{X_q - X'_d}{2X'_d X_q} e^{-\frac{t}{T'_a}}, \quad (6.19)$$

где  $e_{q(0)}$ ,  $e'_{q(0)}$  – предшествующие значения синхронной ЭДС по поперечной оси и переходной ЭДС до момента КЗ.

Первый член этого выражения определяет составляющую основной частоты тока короткого замыкания, второй член – апериодическую составляющую и третий член – составляющую двойной частоты тока короткого замыкания. Первая составляющая обусловлена ЭДС вращения, а вторая и третья – трансформаторными ЭДС.

### 6.3. Влияние форсировки возбуждения на переходный процесс в синхронной машине при коротком замыкании

Часто задача исследования переходных процессов в синхронной машине при коротком замыкании ограничивается определением закона изменения во времени периодической составляющей тока короткого замыкания. При этом, очевидно, в уравнениях (6.13) и (6.14) можно пренебречь трансформаторными ЭДС и активным сопротивлением обмотки якоря. Тогда указанные уравнения принимают простой вид:

$$\Delta u_d(p) = -X_q \Delta i_q(p); \quad (6.20)$$

$$\Delta u_q(p) = X_d(p) \Delta i_d(p) + G(p) \Delta u_f(p). \quad (6.21)$$

Из (6.21) следует

$$\Delta i_d(p) = \frac{\Delta u_q(p)}{X_d(p)} - G(p) \frac{\Delta u_f(p)}{X_d(p)} = -\frac{u_{q(0)}}{pX_d(p)} - G(p) \frac{\Delta u_f(p)}{X_d(p)}. \quad (6.22)$$

Чтобы это выражение представить в виде определенной функции оператора  $p$ , необходимо предварительно найти аналитическое выражение для закона изменения во времени напряжения на выводах обмотки возбуждения синхронной машины при форсировке возбуждения. Однако последний зависит от используемой в машине системы возбуждения и обычно является сложной функцией многих переменных. С целью упрощения задачи часто действительный закон замещения экспоненциальным, подбирая постоянную времени эквивалентной экспоненциальной функции  $T_e$  (обычно  $T_e$  называют постоянной времени системы возбуждения) таким образом, чтобы отклонения значений напряжения возбуждения, получаемые с помощью экспоненциальной функции, от реальных значений были по возможности минимальными. При этом приращение напряжения возбуждения определяется выражением:

$$\Delta u_f = (u_{f\infty} - u_{f(0)}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) = \Delta u_{f\infty} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right), \quad (6.23)$$

где  $u_{f\infty}$  — предельное напряжение возбуждения (потолок возбуждения по напряжению);  $u_{f(0)}$  — напряжение возбуждения машины в предшествующем режиме.

Выражению (6.23) соответствует изображение

$$\Delta u_f(p) = \frac{\Delta u_{f\infty}}{p(pT_e + 1)},$$

поэтому

$$\Delta i_d(p) = -\frac{u_{q(0)}}{p} \cdot \frac{pT_{f0} + 1}{X_d(pT'_d + 1)} - \frac{X_{ad} \Delta u_{f\infty}}{X_d R_f p(pT_e + 1)(pT'_d + 1)}.$$

Но

$$\frac{\Delta u_{f\infty}}{R_f} = \Delta i_{f\infty}$$

и

$$X_{ad} \Delta i_{f\infty} = \Delta e_{qp},$$

где  $\Delta i_{fн}$  – предельное приращение тока возбуждения;  $\Delta e_{qн}$  – предельное приращение синхронной ЭДС по поперечной оси.

Поэтому

$$\Delta i_d(p) = -\frac{u_{q(0)}}{p} \cdot \frac{pT_{f0} + 1}{X_d(pT'_d + 1)} - \frac{\Delta e_{qн}}{p} \cdot \frac{1}{X_d(pT'_e + 1)(pT'_d + 1)}.$$

Используя теорему разложения, получим следующую функцию времени:

$$\Delta i_d(t) = -\frac{u_{q(0)}}{X_d} - \left( \frac{u_{q(0)}}{X'_d} - \frac{u_{q(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{\Delta e_{qн}}{X_d} F(t), \quad (6.24)$$

где

$$F(t) = 1 - \frac{T'_d e^{-\frac{t}{T'_d}} - T_e e^{-\frac{t}{T_e}}}{T'_d - T_e}. \quad (6.25)$$

Знаки «минус» перед слагаемыми в (6.24) объясняются тем, что за положительный принят ток, намагничивающий синхронную машину в направлении оси  $d$ .

Если к правой части (6.24) прибавить предшествующий продольный ток якоря  $i_{d(0)}$  и учесть, что при пренебрежении активным сопротивлением якоря предшествующее значение напряжения  $u_{q(0)}$  в соответствии с (5.2а) и (5.6) можно представить как

$$u_{q(0)} = e_{q(0)} + X_d i_{d(0)},$$

и

$$u_{q(0)} = e'_{q(0)} + X'_d i_{d(0)}$$

то получим следующее выражение для продольного тока якоря в функции времени:

$$i_d(t) = -\left( \frac{e_{q(0)} + X_d i_{d(0)}}{X_d} - i_{d(0)} \right) - \left( \frac{e'_{q(0)} + X'_d i_{d(0)}}{X'_d} - \frac{e_{q(0)} + X_d i_{d(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{\Delta e_{qн}}{X_d} F(t) = -\frac{e_{q(0)}}{X_d} - \left( \frac{e'_{q(0)}}{X'_d} - \frac{e_{q(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{\Delta e_{qн}}{X_d} F(t).$$

В соответствии с выражением (6.20) изображение отклонения поперечного тока якоря синхронной машины при коротком замыкании

$$\Delta i_q(p) = -\frac{\Delta u_d(p)}{X_q} = \frac{u_{d(0)}}{pX_q},$$

поэтому

$$\Delta i_q(t) = \frac{u_{d(0)}}{X_q}$$

и

$$i_q(t) = \frac{u_{d(0)}}{X_q} + i_{q(0)}.$$

Но при неучете активного сопротивления обмотки якоря в предшествующем установившемся режиме напряжение  $u_{d(0)}$  и ток  $i_{q(0)}$  в соответствии с (5.1) связаны соотношением:

$$u_{d(0)} = -X_q i_{q(0)},$$

откуда

$$i_{q(0)} = -\frac{u_{d(0)}}{X_q},$$

поэтому  $i_q(t) = 0$ . Таким образом, при рассматриваемых условиях (неучет активного сопротивления якоря синхронной машины и отсутствие у машины поперечного демпферного контура) ток якоря содержит только продольную составляющую. Поэтому в соответствии с первым уравнением системы (4.17) и формулой (6.26) выражение для действующего значения периодической составляющей тока КЗ машины без демпферных контуров имеет вид:

$$I_{\text{ст}} = \frac{E'_{q(0)}}{X_d} + \left( \frac{E'_{q(0)}}{X'_d} - \frac{E_{q(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{E_{qn} - E_{q(0)}}{X_d} F(t), \quad (6.27)$$

где  $E_{q(0)}$  и  $E'_{q(0)}$  – действующие значения соответственно синхронной и переходной ЭДС машины по поперечной оси к моменту КЗ;  $E_{qn}$  – действующее значение синхронной ЭДС по поперечной оси при предельном токе возбуждения.

Поскольку при  $t = 0$  функция  $F(t) = 0$ , то  $I_{\text{п0}} = \frac{E'_{q(0)}}{X_d}$ . При  $t = \infty$

функция  $F(t) = 1$  и  $I_y = \frac{E_{qn}}{X_d}$ .

Если расчетная точка короткого замыкания находится не на выводах синхронной машины, а во внешней цепи, сопротивление которой до места повреждения составляет  $X_{\text{вн}}$ , то в соответствии со сказанным выше в расчетных выражениях это сопротивление следует учитывать путем его сложения с  $X_d$  и  $X'_d$  машины. При этом выражение (6.27) принимает вид:

$$I_{пт} = \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} + \left( \frac{E'_{q(0)}}{X'_d + X_{вщ}} - \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} \right) e^{-\frac{t}{T'd}} + \frac{E_{qp} - E_{q(0)}}{X_d + X_{вщ}} F(t) \leq \frac{U_{ном}}{X_{вщ}}, \quad (6.28)$$

где

$$T'_d = T_{f0} \frac{T'_d + X_{вщ}}{X_d + X_{вщ}} = T'_f. \quad (6.29)$$

Анализ выражения (6.28) показывает, что на характер изменения во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания существенное влияние оказывает значение сопротивления внешней цепи до точки повреждения. При малых значениях  $X_{вщ}$  начальное значение периодической составляющей тока

$$I_{п0} = \frac{E'_{q(0)}}{X'_d + X_{вщ}} \text{ больше установившегося значения } I_y = \frac{E_{qp}}{X_d + X_{вщ}}.$$

$$\text{При } X_{вщ1} = \frac{E'_{q(0)}X_d - E_{qp}X'_d}{E_{qp} - E'_{q(0)}} \text{ эти токи одинаковы, хотя в дру-}$$

гис моменты времени  $I_{пт} < I_{п0} = I_y$ .

Если же  $X_{вщ} > X_{вщ1}$ , то установившийся ток  $I_y$  больше начального  $I_{п0}$ .

Указанное в конце выражения (6.28) ограничение тока короткого замыкания обусловлено тем, что при любом сопротивлении внешней цепи до места повреждения, даже значительном, напряжение на выводах синхронной машины не может превышать номинальное. То минимальное сопротивление внешней цепи, при коротком замыкании за которым напряжение на выводах синхронной машины в установившемся режиме оказывается равным номинальному, называется критическим. Очевидно, если сопротивление  $X_{вщ}$  равно критическому  $X_{кр}$ , то при коротком замыкании за таким сопротивлением в установившемся режиме синхронная ЭДС машины по поперечной оси  $E_q$  равна ее предельному значению  $E_{qp}$ , поэтому, как видно из (6.28), при  $t = \infty$  выполняется условие

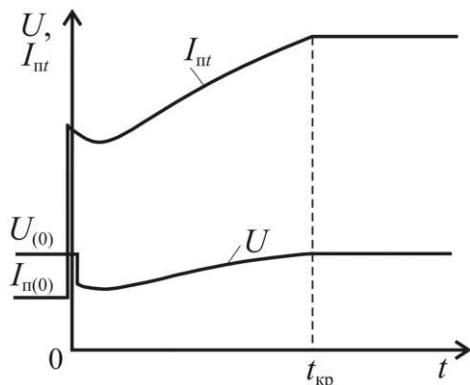
$$\frac{E_{qp}}{X_d + X_{кр}} = \frac{U_{ном}}{X_{кр}},$$

откуда

$$X_{кр} = X_d \frac{U_{ном}}{E_{qp} - U_{ном}}. \quad (6.30)$$

В тех случаях, когда сопротивление внешней цепи до точки короткого замыкания  $X_{вщ} > X_{кр}$ , напряжения на выводах синхронной машины через некоторое время  $t_{кр}$ , называемое критическим, под дей-

ствием АРВ поднимается до номинального (рис. 6.3) и в дальнейшем остается неизменным (небольшие затухающие колебания напряжения относительно номинального, имеющие место при  $t > t_{кр}$ , обычно не учитываются). Вместе с прекращением увеличения напряжения на выводах машины прекращается и увеличение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания.



**Рис. 6.3. Изменение во времени напряжения на выводах синхронной машины и действующего значения периодической составляющей тока якоря при сопротивлении внешней цепи до точки короткого замыкания, превышающем критическое**

Седлообразный характер кривых  $U = f(t)$  и  $I_{пт} = f(t)$  объясняется тем, что в течение первых периодов после начального момента короткого замыкания существенно уменьшаются свободная апериодическая составляющая тока обмотки возбуждения и соответственно амплитуда свободной составляющей основной частоты тока якоря, тогда как влияние АРВ, особенно при больших постоянных времени системы возбуждения ( $T_e > 0,04$  с), проявляется еще слабо. Затем заметно возрастает составляющая тока возбуждения, обусловленная действием АРВ, в результате чего увеличиваются и действующее значение периодической составляющей тока якоря, и напряжение на выводах синхронной машины.

Часто при исследовании переходных процессов в синхронных машинах, имеющих современную быстродействующую систему возбуждения, принимают постоянную времени  $T_e$  равной нулю, т.е. полагают, что при форсировке возбуждения напряжение возбуждения скачком увеличивается от предшествующего значения до предельного. При этом, как сле-

дует из (6.25), функция  $F(t)$  существенно упрощается:  $F(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_d}}$ . Поэтому формулы (6.27) и (6.28) принимают простой вид:

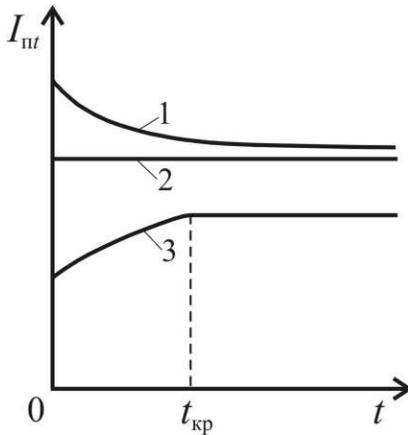
$$I_{nt} = \frac{E_{qn}}{X_d} + \left( \frac{E'_{q(0)}}{X'_d} - \frac{E_{qn}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}}; \quad (6.31)$$

$$I_{nt} = \frac{E_{qn}}{X_d + X_{вш}} + \left( \frac{E'_{q(0)}}{X'_d + X_{вш}} - \frac{E_{qn}}{X_d + X_{вш}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \leq \frac{U_{ном}}{X_{вш}}. \quad (6.32)$$

Таким образом, при  $T_e = 0$  кривые изменения во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания имеют не седлообразный, а экспоненциальный характер. Причем в зависимости от значения сопротивления  $X_{вш}$  действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания может или уменьшаться (кривая 1 на рис. 6.4), или увеличиваться, а при некотором значении сопротивления  $X_{вш}$ , определяемом из равенства

$\frac{E'_{q(0)}}{X'_d + X_{вш}} = \frac{E_{qn}}{X_d + X_{вш}}$ , оно остается неизменным во времени

(прямая 2 на рис. 6.4). При  $X_{вш} > X_{кр}$  ток  $I_{nt}$  сначала возрастает по экспоненциальному закону, а по истечении времени, равного критическому, когда напряжение на выводах синхронной машины становится равным номинальному, ток  $I_{nt}$  достигает предельного значения и затем остается неизменным (кривая 3 на рис. 6.4).



**Рис. 6.4.** Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания при мгновенном увеличении напряжения возбуждения до предельного и разных удаленностях точки короткого замыкания от синхронной машины: 1 – при  $X_{вш} < X_{кр}$ ; 2 – при  $E'_{q(0)}/(X'_d + X_{вш}) = E_{qn}/(X_d + X_{вш})$ ; 3 – при  $X_{вш} > X_{кр}$

## 6.4. Переходный процесс в синхронной машине при гашении магнитного поля

В процессе эксплуатации синхронных машин нередко возникают ситуации, при которых необходимо снять с них возбуждение. В частности, при коротком замыкании в самой машине или в части внешней цепи, заключенной между машиной и соответствующим выключателем (обычно это токопровод, а иногда также и трансформатор), быстро развозбуждают машину, так как такие аварии не могут быть ликвидированы только за счет отключения выключателя. Развозбуждение производят посредством гашения магнитного поля машины. С этой целью системы возбуждения синхронных машин содержат специальные устройства – автоматы гашения поля (АГП).

Существует много способов гашения магнитного поля синхронных машин. Простейший из них предусматривает замыкание обмотки возбуждения машины  $LG$  (рис. 6.5) на гасительный (разрядный) резистор  $R_{\text{гаш}}$  и последующее (с небольшой задержкой) отключение возбудителя  $GE$ . Эти операции выполняются с помощью контактов 1 и 2.

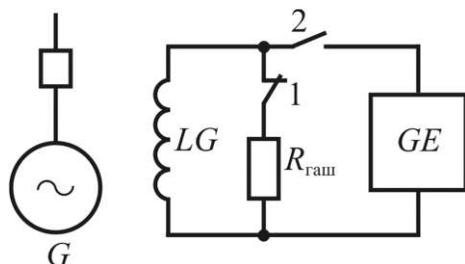
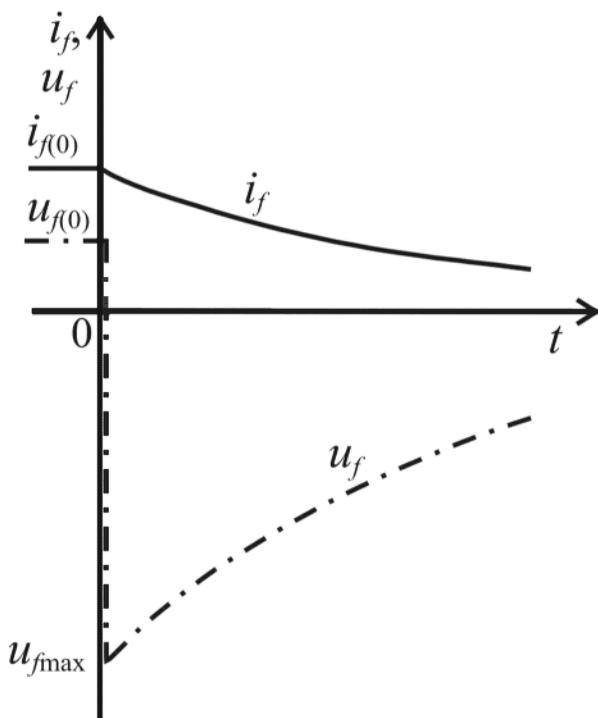


Рис. 6.5. Схема включения АГП с гасительным резистором

Если для упрощения задачи допустить, что подключение в цепь обмотки возбуждения синхронной машины гасительного резистора и отключение возбудителя происходят одновременно, то в начальный момент напряжение на выводах обмотки возбуждения изменяется по знаку и становится равным падению напряжения в резисторе (рис. 6.6), т.е.

$$u_{f\max} = R_{\text{гаш}} i_{f(0)},$$

где  $R_{\text{гаш}}$  – сопротивление резистора;  $i_{f(0)}$  – предшествующий ток возбуждения синхронной машины.



**Рис. 6.6.** Изменение во времени тока возбуждения синхронной машины и напряжения на выводах обмотки возбуждения при гашении магнитного поля с помощью резистора

Во избежание пробоя изоляции обмотки возбуждения сопротивление резистора  $R_{\text{гаш}}$  должно быть таким, чтобы максимальное напряжение на выводах этой обмотки не превышало 0,7–0,75 от напряжения, при котором испытывают изоляцию обмотки. Исходя из этого условия, кратность гасительного сопротивления  $K_{\text{гаш}} = \frac{R_{\text{гаш}}}{R_f}$

обычно принимают равной 4–5.

Если гашение магнитного поля происходит при разомкнутой обмотке якоря синхронной машины, то ее ток возбуждения и напряжение на выводах обмотки возбуждения изменяются во времени по законам:

$$i_f = i_{f(0)} e^{-\frac{t}{T_{\text{гаш}0}}};$$

$$u_f = u_{f\text{max}} e^{-\frac{t}{T_{\text{гаш}0}}},$$

где

$$T_{\text{гаш}0} = \frac{X_f}{R_f + R_{\text{гаш}}} = \frac{T_{f0}}{1 + K_{\text{гаш}}}. \quad (6.33)$$

Если же гашение магнитного поля синхронной машины происходит при замкнутой накоротко обмотке якоря, то ток возбуждения и напряжение на выводах обмотки возбуждения изменяются с другой постоянной времени:

$$i_f = i_{f(0)} e^{-\frac{t}{T'_{\text{гаш}}}}$$

и

$$u_f = u_{f\text{max}} e^{-\frac{t}{T'_{\text{гаш}}}},$$

где

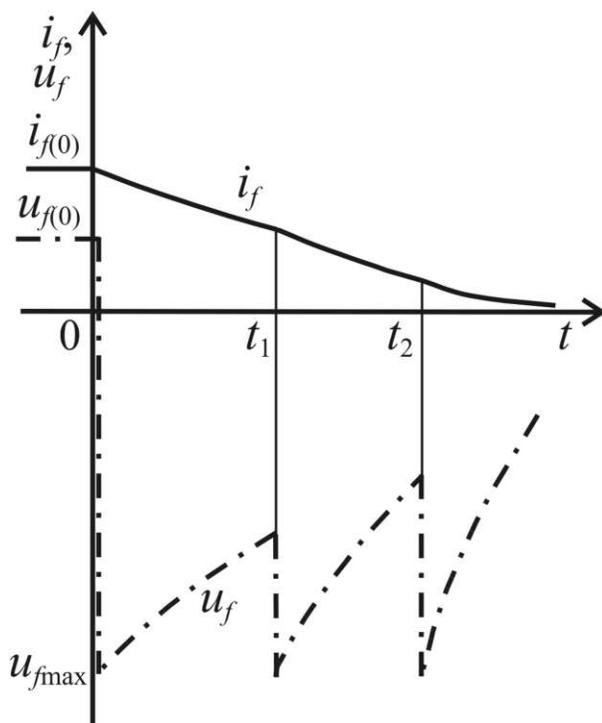
$$T'_{\text{гаш}} = \frac{T'_f}{1 + K_{\text{гаш}}} = \frac{T_{f0} X'_d}{X_d (1 + K_{\text{гаш}})}. \quad (6.34)$$

Из сравнения (6.33) и (6.34) следует, что  $T'_{\text{гаш}} < T_{\text{гаш}0}$ , поэтому во втором случае процесс гашения магнитного поля машины происходит быстрее. Однако в обоих случаях скорость изменения тока возбуждения и соответственно скорость гашения магнитного поля машины со временем существенно уменьшаются, вследствие чего продолжительность гашения поля оказывается значительной. Его можно уменьшить, если по мере затухания тока возбуждения машины и соответствующего уменьшения напряжения на выводах обмотки возбуждения скачками увеличивать сопротивление  $R_{\text{гаш}}$ , исходя из условия, чтобы повторные броски напряжения на выводах обмотки возбуждения не превышали допустимого значения  $u_{f\text{доп}}$  (рис. 6.7). Однако АГП с многоступенчатым гашением поля громоздки и ненадежны.

Для обеспечения минимально возможной продолжительности гашения поля необходимо иметь нелинейное сопротивление, причем с такой характеристикой, при которой напряжение на выводах обмотки возбуждения в течение всего процесса гашения поля поддерживалось бы постоянным и равным предельно допустимому. Нетрудно показать, что при таком условии скорость уменьшения тока возбуждения синхронной машины оказывается почти постоянной, т.е. ток уменьшается по закону, близкому к линейному.

Практически оптимальный закон изменения тока возбуждения получается при применении АГП, в котором для гашения магнитного поля используется дугогасительная решетка (рис. 6.8). Последняя состоит из ряда плоских медных пластин-дисков, которые с целью

получения дуговых промежутков отделены друг от друга с помощью небольших колец из изоляционного материала. Кроме дугогасительной решетки АГП имеет две пары контактов – рабочие 1 и дугогасительные 2. При работе АГП сначала размыкаются рабочие контакты 1, а затем – дугогасительные контакты 2. На последних появляется дуга, которая под действием внешнего магнитного поля, создаваемого специальными магнитами, втягивается в дугогасительную решетку и разбивается на ряд последовательно включенных коротких дуг. Они горят до тех пор, пока ток возбуждения синхронной машины не снизится до нуля, для чего необходимо, чтобы по модулю напряжение на дуге было больше предшествующего напряжения возбуждения.



**Рис. 6.7. Изменение во времени тока возбуждения синхронной машины и напряжения на выводах обмотки возбуждения при ступенчатом увеличении сопротивления гасительного резистора**

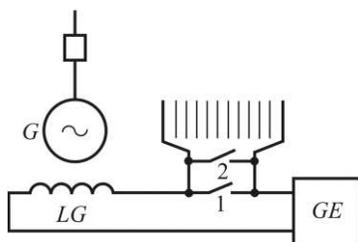


Рис. 6.8. Схема включения АГП с дугогасительной решеткой

Как показывает опыт, падение напряжения на короткой дуге, находящейся между соседними пластинами решетки, в весьма широком диапазоне изменения токов сохраняется практически постоянным и равным 25–30 В. Поэтому напряжение на всей дуге также можно считать постоянным и равным

$$u_{\text{дуг}} = u_{\text{к}} n,$$

где  $u_{\text{к}}$  – напряжение на короткой дуге;  $n$  – число промежутков между пластинами.

Таким образом, появление дуги в дугогасительной решетке эквивалентно внезапному введению в цепь обмотки возбуждения синхронной машины постоянной ЭДС, равной  $u_{\text{дуг}}$  и направленной против напряжения возбудителя, т.е.  $\Delta u_f = -u_{\text{дуг}}$ . Если при этом обмотка якоря машины разомкнута, то в соответствии с (6.6) изображение отклонения тока возбуждения

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_f(p)}{pX_f + R_f} = -\frac{u_{\text{дуг}}}{p(pX_f + R_f)},$$

поэтому

$$\Delta i_f(t) = -i_{fy} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right)$$

и

$$i_f(t) = i_{f(0)} - i_{fy} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \right), \quad (6.35)$$

где  $i_{fy} = \frac{u_{\text{дуг}}}{R_f}$  – фиктивный установившийся ток возбуждения, обусловленный действием ЭДС, численно равной напряжению на дуге.

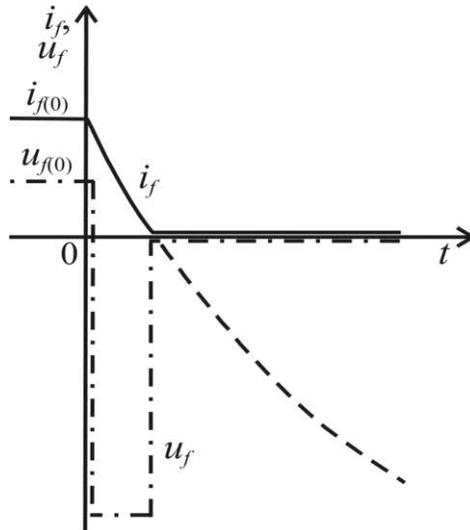
Если во время гашения магнитного поля обмотка якоря синхронной машины замкнута, то процесс изменения тока возбуждения

протекает также по экспоненциальному закону, но с меньшей постоянной времени  $T'_f$ , т.е.

$$i_f(t) = i_{f(0)} - i_{fy} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T'_f}} \right). \quad (6.36)$$

Указанная постоянная времени зависит от места замыкания. При коротком замыкании на выводах обмотки якоря  $T'_f$  определяется по (6.10), а при коротком замыкании во внешней цепи, обладающей индуктивным сопротивлением, – по (6.29).

Выражения (6.35) и (6.36) справедливы лишь до момента перехода тока возбуждения через нулевое значение, так как в указанный момент времени дуга в дугогасительной решетке гаснет и переходный процесс заканчивается (рис. 6.9).



**Рис. 6.9.** Изменение во времени тока возбуждения синхронной машины и напряжения на выводах обмотки возбуждения при действии АГП с дугогасительной решеткой

С целью обеспечения минимальной продолжительности гашения поля обычно число пластин дугогасительной решетки выбирают таким, чтобы при горении дуги напряжение на обмотке возбуждения поддерживалось близким к максимально допустимому:

$$u_f = u_{\text{дуг}} - u_{f(0)} \approx u_{f\text{доп}}$$

При этом участок кривой  $i_f(t)$ , соответствующий процессу горения дуги в дугогасительной решетке, близок к линейному, т.е. к оптимальному.

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

---

---

# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДЕМПФЕРНЫХ КОНТУРОВ

---

---

### 7.1. Уравнения переходного процесса синхронной машины и их корни

В момент изменения напряжения на выводах обмотки якоря или обмотки возбуждения синхронной машины с учетом влияния демпферных контуров все контуры можно рассматривать как идеальные и характер токов во всех контурах определяется условием постоянства их потокосцеплений. Поэтому физическая картина в машине с демпферными контурами не отличается от картины, имеющей место в машине без демпферных контуров. В каждом контуре возникает свободная апериодическая составляющая тока, обеспечивающая постоянство начального потокосцепления, и свободная периодическая составляющая тока основной частоты, обусловленная вращением контура относительно магнитного поля от апериодической составляющей тока другого контура. В токе якоря появляется также свободная периодическая составляющая двойной частоты, однако в машине с демпферными контурами она проявляется слабее, чем при их отсутствии, так как демпферные контуры уменьшают электромагнитную несимметрию ротора. Действительный характер протекания переходных процессов в синхронной машине с демпферными контурами может быть раскрыт при решении уравнений Парка–Горева.

В соответствии с (4.34) и (4.35) уравнения Парка–Горева в операторной форме для машины с демпферными контурами можно представить как

$$\begin{aligned} \Delta i_q(p) = X_d \Delta i_d(p) + X_{ad} \Delta i_f(p) + X_{ad} \Delta i_{1d}(p) - \\ - (pX_q + R) \Delta i_q(p) - pX_{aq} \Delta i_{1q}(p); \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\Delta u_f(p) = pX_{ad}\Delta i_d(p) + (pX_f + R_f)\Delta i_f(p) + pX_{ad}\Delta i_d(p); \quad (7.2)$$

$$0 = pX_{ad}\Delta i_d(p) + pX_{ad}\Delta i_f(p) + (pX_{1d} + R_{1d})\Delta i_{1d}(p); \quad (7.3)$$

$$\Delta u_d(p) = -(pX_d + R)\Delta i_d(p) - pX_{ad}\Delta i_f(p) - pX_{ad}\Delta i_{1d}(p) - X_q\Delta i_q(p) - X_{aq}\Delta i_{1q}(p); \quad (7.4)$$

$$0 = pX_{aq}\Delta i_q(p) + (pX_{1q} + R_{1q})\Delta i_{1q}(p). \quad (7.5)$$

Нетрудно убедиться, что характеристическое уравнение, соответствующее этой системе дифференциальных уравнений, имеет пятый порядок и его решение в общем виде практически невозможно. Для его приближенного решения можно использовать тот же прием, что и при анализе переходных процессов в машине без демпферных контуров (см. гл. 6), поочередно принимая активные сопротивления контуров ротора и обмотки якоря равными нулю.

Если положить  $R_f = R_{1d} = R_{1q} = 0$ , то характеристическое уравнение запишется в виде

$$\left[ p^2 + \frac{(X_d'' + X_q'')R}{X_d''X_q''}p + \left( 1 + \frac{R^2}{X_d''X_q''} \right) \right] p = 0,$$

откуда

$$p_{1,2} = -\frac{(X_d'' + X_q'')R}{2X_d''X_q''} \pm j \sqrt{1 - \frac{(X_q'' - X_d'')^2 R^2}{4X_d''^2 X_q''^2}} \quad (7.6)$$

или, принимая во внимание, что подкоренное выражение в (7.6) близко к единице, получим

$$p_{1,2} \approx -\frac{R}{X_2} \pm j = -\frac{1}{T_a} \pm j.$$

где

$$X_2 = 2 \frac{X_d''X_q''}{X_d'' + X_q''}; \quad (7.7)$$

$$T_a = \frac{X_2}{R}. \quad (7.8)$$

Значение корня  $p_3 = 0$  не имеет физического смысла и должно быть опущено.

Нетрудно заметить, что выражение (7.6) аналогично выражению (6.8) для машины без демпферных контуров, только в (7.6) вме-

сто  $X'_d$  и  $X_q$  входят соответственно  $X''_d$  и  $X''_q$ . Как и в синхронной машине без демпферных контуров корням  $p_1$  и  $p_2$  соответствуют свободные магнитные потоки, вращающиеся относительно ротора в противоположных направлениях с синхронной частотой. Эти потоки обусловлены свободной аperiodической и второй гармонической составляющими тока якоря, а также свободными периодическими составляющими основной частоты тока возбуждения и тока продольного демпферного контура, которые затухают с одной и той же постоянной времени  $T_a$ .

Чтобы определить остальные корни характеристического уравнения и соответствующие свободные токи в различных контурах машины, пренебрежем, как и ранее (см. гл. 6), не только активным сопротивлением обмоток якоря, но и трансформаторными ЭДС, наводимыми в этих обмотках. При этом уравнения (7.1) и (7.4) примут простой вид:

$$\Delta u_q(p) = X_d \Delta i_d(p) + X_{ad} \Delta i_f(p) + X_{ad} \Delta i_{ld}(p); \quad (7.9)$$

$$\Delta u_d(p) = -X_q \Delta i_q(p) - X_{aq} \Delta i_{lq}(p), \quad (7.10)$$

причем (7.9), (7.2) и (7.3) оказываются независимыми от уравнений (7.10) и (7.5), что позволяет анализировать и решать указанные группы уравнений независимо друг от друга.

Рассмотрим простейший случай, когда обмотка якоря синхронной машины разомкнута и переходный процесс вызван изменением напряжения возбуждения. В этом случае уравнения напряжения для замкнутых контуров ротора, расположенных по продольной оси машины, запишутся как

$$\Delta u_f(p) = (pX_f + R_f) \Delta i_f(p) + pX_{ad} \Delta i_{ld}(p); \quad (7.11)$$

$$0 = pX_{ad} \Delta i_f(p) + (pX_{ld} + R_{ld}) \Delta i_{ld}(p). \quad (7.12)$$

Полученным дифференциальным уравнениям соответствует следующее характеристическое уравнение:

$$(pX_f + R_f)(pX_{ld} + R_{ld}) - X_{ad}^2 p^2 = 0$$

или

$$\left(1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f X_{ld}}\right) X_f X_{ld} p^2 + (X_f R_{ld} + X_{ld} R_f) p + R_f R_{ld} = 0. \quad (7.13)$$

Сомножитель первого члена уравнения, заключенный в скобки, характеризует систему обмотка возбуждения—продольный демпферный контур в магнитном отношении. В самом деле, известно, что

$\sigma_f = \frac{X_{\sigma f}}{X_f}$  и  $\sigma_{1d} = \frac{X_{\sigma 1d}}{X_{1d}}$  представляют собой коэффициенты рассеяния соответственно обмотки возбуждения и продольного демпферного контура, а  $k_f = 1 - \sigma_f = \frac{X_{ad}}{X_f}$  и  $k_{1d} = 1 - \sigma_{1d} = \frac{X_{ad}}{X_{1d}}$  — их коэффициенты магнитной связи.

Поэтому коэффициент магнитной связи системы обмотка возбуждения—продольный демпферный контур при разомкнутой обмотке якоря  $k_0 = k_f k_{1d} = \frac{X_{ad}^2}{X_f X_{1d}}$ , а коэффициент рассеяния этой системы при разомкнутой обмотке якоря  $\sigma_0 = 1 - k_0 = 1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f X_{1d}}$  (иногда коэффициент магнитной связи системы двух контуров определяют по формуле  $k_0 = \sqrt{k_f k_{1d}} = \frac{X_{ad}}{\sqrt{X_f X_{1d}}}$ ; при этом под коэффициентом рассеяния системы понимают  $\sigma_0 = 1 - k_0^2 = 1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f X_{1d}}$ , т.е. ту же величину). Та-

ким образом, упомянутый множитель первого члена характеристического уравнения равен  $\sigma_0$ .

Разделив все члены характеристического уравнения (7.13) на  $R_f R_{1d}$ , получим

$$\sigma_0 T_{f0} T_{1d0} p^2 + (T_{f0} + T_{1d0}) p + 1 = 0, \quad (7.14)$$

где  $T_{1d0} = \frac{X_{1d}}{R_{1d}}$  — собственная постоянная времени продольного демпферного контура (т.е. постоянная времени этого контура, измеренная при разомкнутых обмотках возбуждения и якоря).

Легко показать, что корни уравнения (7.14)  $p_4$  и  $p_5$  являются вещественными и отрицательными, поэтому соответствующие им свободные магнитные потоки неподвижны относительно ротора, а относительно якоря вращаются с синхронной частотой и затухают с постоянными времени  $T'_{d0}$  и  $T''_{d0}$ . Указанные магнитные потоки обусловлены свободными апериодическими составляющими токов обмотки возбуждения и продольного демпферного контура, затухающими по экспоненциальным законам с теми же постоянными времени. Найдем эти постоянные времени, для чего в (7.14) введем  $T_0 = -\frac{1}{p}$ :

$$T_0^2 - (T_{f0} + T_{1d0})T_0 + \sigma_0 T_{f0} T_{1d0} = 0. \quad (7.15)$$

Из (7.15) следует

$$T_0 = \frac{T_{f0} + T_{1d0}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}}{(T_{f0} + T_{1d0})^2}} \right) = \frac{T_{f0} + T_{1d0}}{2} (1 \pm q_0),$$

где

$$q_0 = \sqrt{1 - \frac{4\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}}{(T_{f0} + T_{1d0})^2}}. \quad (7.16)$$

При этом

$$T_{01} = T'_{d0} = (T_{f0} + T_{1d0}) \frac{1 + q_0}{2}; \quad (7.17)$$

$$T_{02} = T''_{d0} = (T_{f0} + T_{1d0}) \frac{1 - q_0}{2}. \quad (7.18)$$

Коэффициент  $q_0$  близок к единице, поэтому  $T'_{d0} \gg T''_{d0}$ .

Два корня указывают на то, что возникающие при переходном процессе в синхронной машине с демпферными контурами свободные аperiodические токи обмотки возбуждения и продольного демпферного контура независимо от значений их собственных постоянных времени  $T'_{f0}$  и  $T'_{1d0}$  представляют собой сумму двух составляющих, затухающих по экспоненциальным законам. Одна составляющая, называемая переходной, обусловлена изменением общего магнитного потока обмотки возбуждения и продольного демпферного контура и затухает медленно с постоянной времени  $T'_{d0}$ . Другая, называемая сверхпереходной, — изменением потока рассеяния контуров и затухает быстро с постоянной времени  $T''_{d0}$ . Соответственно постоянная времени  $T'_{d0}$  называется переходной постоянной времени машины по ее продольной оси при разомкнутой обмотке якоря, а постоянная времени  $T''_{d0}$  — сверхпереходной постоянной времени машины по ее продольной оси при разомкнутой обмотке якоря.

Хотя  $q_0$  близко к единице, но полагать  $q_0 = 1$  в формуле (7.18) нельзя, так как получаемое при этом  $T''_{d0} = 0$  означает отсутствие у обмотки возбуждения и продольного демпферного контура потоков рассеяния, что не соответствует действительности. Используя (7.16), формулу (7.18) можно преобразовать к виду:

$$T''_{d0} = \frac{2\sigma_0 T_{f0} T_{1d0}}{(1 + q_0)(T_{f0} + T_{1d0})}. \quad (7.19)$$

Теперь, принимая в выражениях (7.17) и (7.19)  $q_0 = 1$ , получим упрощенные выражения для  $T'_{d0}$  и  $T''_{d0}$ :

$$T'_{d0} \approx T_{f0} + T_{1d0}; \quad (7.20)$$

$$T''_{d0} \approx \sigma_0 \frac{T_{f0} T_{1d0}}{T_{f0} + T_{1d0}}. \quad (7.21)$$

Последние выражения показывают следующее:

- постоянная времени  $T'_{d0}$  примерно равна сумме собственных постоянных времени обмотки возбуждения и продольного демпферного контура;
- если бы обмотка возбуждения синхронной машины и продольный демпферный контур не имели потоков рассеяния, то быстро затухающих составляющих в апериодических токах этих контуров вообще бы не было и в обоих контурах, независимо от соотношения их собственных постоянных времени, имелись бы только медленно затухающие составляющие.

## 7.2. Переходный процесс в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров при трехфазном коротком замыкании

Ограничим задачу исследованием характера изменения периодической составляющей тока якоря и апериодических составляющих токов в контурах ротора при коротком замыкании в цепи якоря машины. При этом, как было отмечено ранее, допустимо не учитывать активное сопротивление обмоток якоря и трансформаторные ЭДС, наводимые в этих обмотках. Такое допущение существенно упрощает задачу и сводит ее к решению независимых друг от друга двух систем уравнений: системы (7.9), (7.2), (7.3) для контуров по продольной оси и системы (7.10), (7.5) для контуров по поперечной оси машины.

Учитывая, что при коротком замыкании  $\Delta u_q(p) = -\frac{u_{q(0)}}{p}$ , из уравнения (7.9) имеем

$$\Delta i_d(p) = -\frac{u_{q(0)}}{pX_d} - \frac{X_{ad}\Delta i_f(p)}{X_d} - \frac{X_{ad}\Delta i_{1d}(p)}{X_d}. \quad (7.22)$$

Подставив это выражение в (7.2) и (7.3), получим

$$\Delta u_f(p) + u_{q(0)} \frac{X_{ad}}{X_d} = (pX'_f + R_f) \Delta i_f(p) + pX'_{ad} \Delta i_{1d}(p); \quad (7.23)$$

$$u_{g(0)} \frac{X_{ad}}{X_d} = pX'_{ad} \Delta i_f(p) + (pX'_{1d} + R_{1d}) \Delta i_{1d}(p), \quad (7.24)$$

где  $X'_{ad} = X_{ad} - \frac{X_{ad}^2}{X_d} = X_{\sigma} \frac{X_{ad}}{X_d}$  – эквивалентное сопротивление взаимной индукции между контурами машины по продольной оси при короткозамкнутой обмотке якоря;

$X'_f = X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d} = X_{\sigma f} + X'_{ad}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке якоря;

$X'_{1d} = X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d} = X_{\sigma 1d} + X'_{ad}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление продольного демпферного контура при короткозамкнутой обмотке якоря.

Характеристическое уравнение, соответствующее (7.23) и (7.24), имеет вид:

$$(pX'_f + R_f)(pX'_{1d} + R_{1d}) - X_{ad}^2 p^2 = 0$$

или

$$\left(1 - \frac{X_{ad}^2}{X'_f X'_{1d}}\right) X'_f X'_{1d} p^2 + (X'_f R_{1d} + X'_{1d} R_f) p + R_f R_{1d} = 0.$$

В этом уравнении множитель первого члена  $\left(1 - \frac{X_{ad}^2}{X'_f X'_{1d}}\right) = \sigma'$

представляет собой коэффициент рассеяния между обмоткой возбуждения и продольным демпферным контуром при короткозамкнутой обмотке якоря. Разделив все члены уравнения на  $R_f R_{1d}$  и введя  $T = -1/p$ , получим

$$T^2 - (T'_f + T'_{1d})T + \sigma' T'_f T'_{1d} = 0, \quad (7.25)$$

где  $T'_f = \frac{X'_f}{R_f}$  – постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутом продольном демпферном контуре;  $T'_{1d} = \frac{X'_{1d}}{R_{1d}}$  – постоянная времени продольного демпферного контура при короткозамкнутой обмотке якоря и разомкнутой обмотке возбуждения.

Решение уравнения (7.25) имеет вид:

$$T = \frac{T'_f + T'_{1d}}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T'_f T'_{1d}}{(T'_f + T'_{1d})^2}} \right) = \frac{T'_f + T'_{1d}}{2} (1 \pm q'), \quad (7.26)$$

где

$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T'_f T'_{1d}}{(T'_f + T'_{1d})^2}}. \quad (7.27)$$

Таким образом,

$$T_1 = T'_d = \frac{(T'_f + T'_{1d})(1 + q')}{2}; \quad (7.28)$$

$$T_2 = T''_d = \frac{(T'_f + T'_{1d})(1 - q')}{2}. \quad (7.29)$$

Используя (7.27), выражение (7.29) можно преобразовать к виду:

$$T''_d = \frac{2\sigma' T'_f T'_{1d}}{(1 + q')(T'_f + T'_{1d})}. \quad (7.29a)$$

Сравнивая результаты анализа переходных процессов в продольных контурах ротора синхронной машины с демпферными контурами при разомкнутой и замкнутой обмотке якоря, нетрудно увидеть, что характер изменения аperiodических токов в указанных контурах не зависит от состояния обмотки якоря. Как при разомкнутой, так и при замкнутой обмотке якоря свободные аperiodические токи обмотки возбуждения и продольного демпферного контура содержат две составляющие – переходную и сверхпереходную, которые обусловлены изменением соответственно общего магнитного потока продольных контуров ротора и магнитных потоков рассеяния этих контуров. Только при замкнутой обмотке якоря свободные переходные составляющие токов затухают с постоянной времени  $T'_d < T'_{d0}$ , а свободные сверхпереходные составляющие – с постоянной времени  $T''_d < T''_{d0}$ . Поскольку упомянутые магнитные потоки относительно якоря вращаются с синхронной частотой, то при замкнутой обмотке якоря в сс токе возникают свободная переходная и свободная сверхпереходная периодические составляющие основной частоты, амплитуды которых затухают по экспоненциальным законам с теми же постоянными времени  $T'_d$  и  $T''_d$ .

Постоянная времени  $T'_d$  называется переходной постоянной времени машины по ее продольной оси при замкнутой обмотке яко-

ря, а постоянная времени  $T_d''$  – сверхпереходной постоянной времени машины по ее продольной оси при замкнутой обмотке якоря.

Формулы для определения  $T_d'$ ,  $T_d''$  и  $q'$  справедливы при коротком замыкании в любой точке цепи якоря синхронной машины – как на ее выводах, так и во внешней цепи, причем при увеличении удаленности точки короткого замыкания увеличиваются и значения указанных величин. Так, при изменении сопротивления внешней цепи до места повреждения от 0 до  $\infty$  значение  $q'$  изменяется в пределах 0,78...0,94. Если приближенно принять  $q' = 1$ , то получим следующие упрощенные выражения для постоянных времени:

$$T_d' \approx T_f' + T_{1d}'; \quad (7.30)$$

$$T_d'' \approx \sigma' \frac{T_f' T_{1d}'}{T_f' + T_{1d}'}. \quad (7.31)$$

При коротком замыкании на выводах синхронной машины погрешности в определении постоянных времени по указанным упрощенным формулам достигают 10 %. При коротком замыкании во внешней цепи погрешности уменьшаются.

Если предположить, что в процессе короткого замыкания возбуждение машины не регулируется, т.е.  $\Delta u_f = 0$ , то, используя уравнения (7.2), (7.3) и (7.9) и выполнив необходимые операции, после некоторых упрощений можно получить следующее выражение для действующего значения продольной периодической составляющей тока короткого замыкания в общепринятой форме:

$$I_{dt} = \frac{E_{q(0)}}{X_d} + \left( \frac{E_{q(0)}'}{X_{dн}'} - \frac{E_{q(0)}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{E_{q(0)}''}{X_d''} - \frac{E_{q(0)}'}{X_{dн}'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}}, \quad (7.32)$$

где  $\frac{E_{q(0)}}{X_d}$  – действующее значение продольной составляющей тока короткого замыкания в установившемся режиме;

$\frac{E_{q(0)}''}{X_d''}$  – начальное действующее значение продольной сверхпереходной составляющей тока короткого замыкания;

$\frac{E_{q(0)}'}{X_{dн}'}$  – начальное действующее значение продольной переходной составляющей тока короткого замыкания;

$X_{dн}'$  – переходное индуктивное сопротивление по продольной оси машины с демпферными контурами, определяющее начальное значе-

ние продольной переходной составляющей тока короткого замыкания. Оно может быть найдено по формуле

$$X'_{дп} = \frac{X_d X_d'' (T'_d - T_d'')}{X_d'' (T'_{d0} + T_d'') - (X_d + X_d'') T_d''}. \quad (7.33)$$

Как видно из (7.33), сопротивление  $X'_{дп}$  и, следовательно, начальное значение продольной переходной составляющей тока короткого замыкания зависят не только от параметров обмотки якоря и обмотки возбуждения, но и от параметров продольного демпферного контура, причем не только от индуктивного сопротивления этого контура, но и от его постоянной времени, т.е. активного сопротивления.

Из формулы (7.33) легко также установить, что переходное индуктивное сопротивление  $X'_{дп}$  собственно синхронной машины зависит и от сопротивления внешней цепи до места повреждения, причем с увеличением последнего  $X'_{дп}$  уменьшается. Например, сопротивление  $X'_{дп}$  при разомкнутой обмотке якоря может быть почти на 10 % меньше, чем при замкнутой накоротко обмотке.

Принимая, как и ранее,  $q_0 \approx q' \approx 1$  и учитывая (7.30), из (7.33) можно получить следующее приближенное выражение для переходного индуктивного сопротивления  $X'_{дп}$ :

$$X'_{дп} \approx X_d \frac{T'_f + T'_{1d}}{T_{f0} + T_{1d0}} \approx X_d \frac{T'_d}{T'_{d0}}. \quad (7.34)$$

Расчеты показывают, что сопротивление  $X'_{дп}$  несколько меньше переходного индуктивного сопротивления  $X'_d$  машины, найденного без учета влияния демпферного контура (обычно отношение  $\frac{X'_{дп}}{X'_d}$  находится в пределах  $0.9 \leq \frac{X'_{дп}}{X'_d} < 1$ ).

Из изложенного следует, что продольный демпферный контур оказывает существенное влияние на характер переходного процесса в синхронной машине при коротком замыкании.

Как уже отмечалось, в начальный момент короткого замыкания размагничивающему действию магнитного потока якоря в машине с демпферными контурами противодействует не только свободный ток обмотки возбуждения, но и свободный ток демпферного контура, причем начальные значения свободных токов из условия, что в момент короткого замыкания потокосцепления обмотки возбуждения и продольного демпферного контура остаются неизменными. Поэтому распределение свободных токов между обмоткой возбуждения и продольным демпферным контуром в начальный момент короткого замыкания зависит только от собственных и взаим-

ных индуктивностей продольных контуров машины. В контуре ротора, имеющем большую магнитную связь с обмоткой якоря, в начальный момент короткого замыкания возникает большой свободный ток. Обычно таким является продольный демпферный контур.

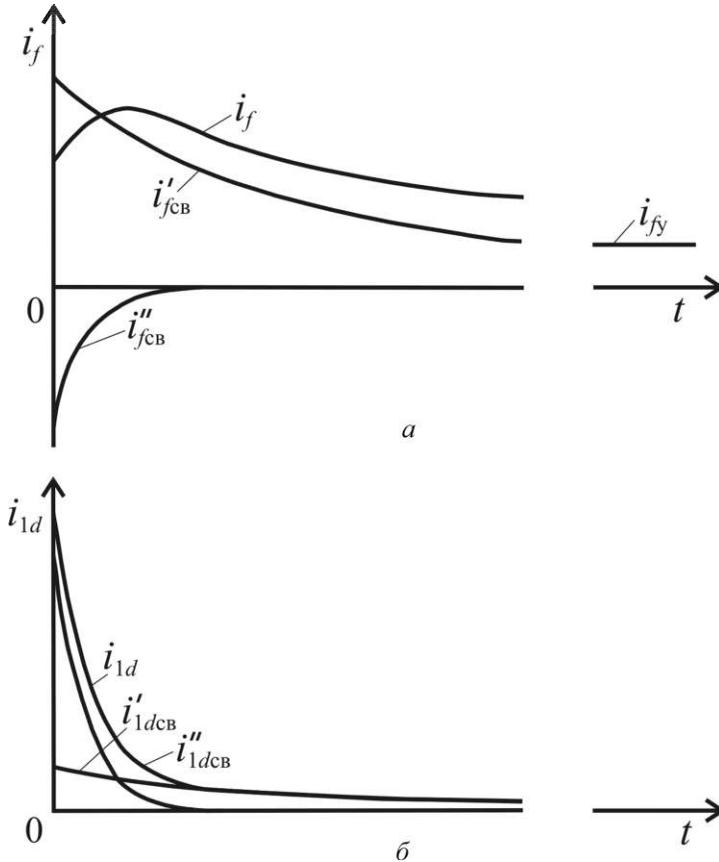
Поскольку обмотка возбуждения и продольный демпферный контур обладают активным сопротивлением, то возникшие в них свободные апериодические токи начинают затухать по законам затухания свободных токов в двух магнитно-связанных друг с другом контурах (точнее – в трех магнитно-связанных контурах, один из которых – продольный контур якоря по отношению к двум другим может считаться сверхпроводящим): эти токи быстро, с постоянной времени  $T_d''$ , перераспределяются в контурах ротора примерно пропорционально их постоянным времени. Как правило, контур возбуждения имеет большую постоянную времени, поэтому его свободный ток (и соответственно суммарный апериодический ток  $i_f$ ) в начале процесса увеличивается по сравнению с начальным значением, а в демпферном контуре свободный ток уменьшается (рис. 7.1,а и 7.1,б).

В соответствии с указанным процессом изменения во времени свободных токов в контурах ротора происходит изменение действующих значений свободных продольных периодических составляющих основной частоты тока обмотки якоря (рис. 7.1,в). В начальный момент короткого замыкания вследствие противодействия свободных токов обмотки возбуждения и продольного демпферного контура магнитный поток реакции якоря не может пронизать эти контуры и вынужден замыкаться по путям, обладающим большим магнитным сопротивлением. Поэтому действующее значение продольной периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания оказывается значительным и определяется сверхпереходным сопротивлением  $X_d''$ .

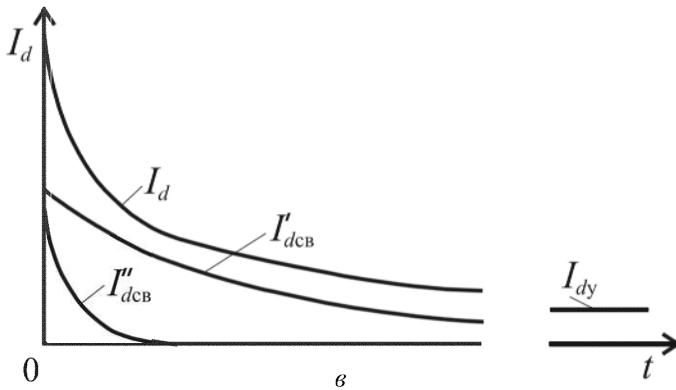
В первые моменты после короткого замыкания, когда процесс затухания свободных сверхпереходных составляющих токов обмотки возбуждения и продольного демпферного контура происходит интенсивно, магнитный поток реакции якоря сравнительно быстро проникает в зону потоков рассеяния между обмоткой возбуждения и продольным демпферным контуром, а затем, по мере замедления процесса затухания свободных токов в продольных контурах ротора, магнитный поток реакции якоря медленно проникает в зону, охватываемую обоими контурами ротора. Этим и объясняется наличие двух свободных периодических составляющих основной частоты в продольном токе якоря – сверхпереходной  $I_{d'св}''$  и переходной  $I_{d'св}'$  (рис. 7.1,в).

Из изложенного следует, что при прочих равных условиях у синхронных машин с демпферными контурами продольная периодическая составляющая тока якоря при коротком замыкании во внешней цепи в любой момент переходного процесса больше, чем у ма-

шин без демпферных контуров. Это объясняется не только наличием в токе машины с демпферными контурами свободной сверхпереходной составляющей, но и тем, что у такой машины начальное значение свободной переходной составляющей тока больше (за счет того, что  $X'_{dн} < X'_d$ ), а определяемая постоянной времени  $T'_d$  скорость затухания этой составляющей меньше, чем у машины без демпферных контуров (так как при наличии демпферных контуров  $T'_d \approx T'_f + T'_{dд}$ , а при их отсутствии  $T'_d = T'_f$ ).



**Рис. 7.1.** Изменение во времени аperiodических составляющих токов обмотки возбуждения (а) и продольного демпферного контура (б), а также действующих значений продольных периодических составляющих основной частоты тока якоря синхронной машины (в) при коротком замыкании во внешней сети



Окончание рис. 7.1

Аналитическое выражение, определяющее действующее значение продольной периодической составляющей тока якоря синхронной машины с демпферными контурами при коротком замыкании, с учетом действия автоматического регулирования возбуждения даже в том случае, когда действительный закон изменения напряжения возбуждения заменяется экспоненциальным, оказывается весьма сложным. Если же принять постоянную времени системы возбуждения  $T_e = 0$ , то выражение для действующего значения продольной периодической составляющей тока короткого замыкания будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 I_{dt} = & \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вш}} + \left( \frac{E'_{q0}}{X'_{d1} + X_{вш}} - \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{вш}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \\
 & + \left( \frac{E''_{q0}}{X''_d + X_{вш}} - \frac{E'_{q0}}{X'_{d1} + X_{вш}} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \\
 & + \left( \frac{E_{qn} - E_{q(0)}}{X_d + X_{вш}} \right) \left( 1 - \frac{T'_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{T''_d - T_{\sigma 1d}}{T'_d - T''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \leq \frac{U_{ном}}{X_{вш}},
 \end{aligned} \tag{7.35}$$

где

$$T_{\sigma 1d} = \frac{X_{\sigma 1d}}{R_{1d}} = T_{1d0} \frac{X_{\sigma 1d}}{X_{1d}} \tag{7.36}$$

– постоянная времени продольного демпферного контура, обусловленная его потоком рассеяния.

Из принятого ранее допущения о замене реальных демпферных контуров синхронной машины одним продольным и одним поперечным контурами следует, что в поперечной оси синхронной машины с демп-

ферными контурами имеется два контура – поперечный контур якоря и поперечный демпферный контур. Но, как было показано при анализе переходных процессов в продольной оси синхронной машины без демпферных контуров, затухание свободной апериодической составляющей тока в контуре, который имеет магнитную связь только с вращающимися относительно него контурами, обусловлено активным сопротивлением лишь этого контура. Поэтому свободная апериодическая составляющая тока поперечного демпферного контура при замкнутой обмотке якоря затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени, которая определяется по формуле, аналогичной (6.10),

$$T'_{1q} = T_{1q0} \frac{X''_q}{X'_q}, \quad (7.37)$$

где  $T_{1q0} = \frac{X_{1q}}{R_{1q}}$  – собственная постоянная времени поперечного демпферного контура.

Если при расчете тока короткого замыкания не учитывается активное сопротивление цепи якоря синхронной машины, то принужденная поперечная составляющая тока якоря равна нулю. Поэтому изменение во времени действующего значения поперечной периодической составляющей тока якоря описывается простым выражением:

$$I_{qt} = \frac{E''_{d(0)}}{X''_q} e^{-\frac{t}{T'_{1q}}}, \quad (7.38)$$

а при коротком замыкании во внешней цепи, индуктивное сопротивление которого до места повреждения составляет  $X_{вщ}$ ,

$$I_{qt} = \frac{E''_{d(0)}}{X''_q + X_{вщ}} e^{-\frac{t}{T'_{1q}}}, \quad (7.38a)$$

где

$$T'_{1q} = T_{1q0} \frac{X''_q + X_{вщ}}{X'_q + X_{вщ}}. \quad (7.39)$$

Результирующее действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени от синхронной машины с демпферными контурами

$$I_{шт} = \sqrt{I_{dt}^2 + I_{qt}^2}. \quad (7.40)$$

Поскольку действующее значение поперечной периодической составляющей тока якоря уменьшается с постоянной времени  $T'_{1q}$ , стремясь к нулю, то при  $t \geq 3T'_{1q}$  можно считать  $I_{шт} = I_{dt}$ .

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

---

---

# ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

---

---

### 8.1. Общие замечания.

#### Определение удаленности точки короткого замыкания от электрической машины

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в произвольный момент времени может быть определена путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений. Однако достаточно высокая точность расчетов может быть обеспечена лишь при учете влияния демпферных контуров синхронных машин, действия автоматического регулирования возбуждения, изменения частоты вращения электрических машин, подключенных нагрузок и других факторов. При этом система дифференциальных уравнений даже в простейшем случае, когда расчетная схема содержит только одну синхронную машину, оказывается сложной и может быть решена лишь с применением вычислительной техники. Между тем в ряде случаев оказываются достаточными приближенные данные о токах короткого замыкания. В частности, в проектной практике широко применение нашли так называемые практические методы расчета периодической составляющей тока короткого замыкания.

При использовании практических методов необходимо знать 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.

$$I_{*п0(ном)} = \frac{I_{п0}}{I_{ном}}. \quad (8.1)$$

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

$$I_{*п0(ном)} = \frac{I_{п0}}{I_{ном}} = \sqrt{3} I_{п0} \frac{U_{ном}^c}{S_{ном}}, \quad (8.2)$$

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

$$I_{*п0(ном)} = I_{*п0(б)} \frac{S_б}{S_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_б}, \quad (8.3)$$

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;  $S_B$  и  $U_B$  – 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  $I_{*п0(ном)} \geq 2$ .

## 8.2. Расчет периодической составляющей тока при удаленных коротких замыканиях

При расчетах токов короткого замыкания индивидуально учитывают лишь источники энергии (синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели), находящиеся вблизи точки короткого замыкания, т.е. для которых короткое замыкание является близким.

Самую удаленную часть электроэнергетической системы часто представляют в виде одного источника энергии (обычно его называют системой) с индуктивным сопротивлением  $X_{GS}$ , равным эквивалентному индуктивному сопротивлению соответствующей части электроэнергетической системы, 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

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3}X_{GS}} \quad (8.4)$$

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

$$I_{шт} = I_{п0} = \frac{U_{ср}}{U_6} \cdot \frac{I_6}{X_{*GS(6)}}, \quad (8.5)$$

где  $U_6$  и  $I_6$  – 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:

$$X_{GS} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3}I_{п0}} \quad (8.6)$$

или

$$X_{*GS(6)} = \frac{U_{ср}}{U_6} \cdot \frac{I_6}{I_{п0}}. \quad (8.7)$$

Иногда вместо периодической составляющей тока короткого замыкания задается так называемая мощность короткого замыкания в какой-либо точке электроэнергетической системы, под которой понимают условную величину, равную увеличенному в  $\sqrt{3}$  раз произведению тока трехфазного короткого замыкания на среднее номинальное напряжение соответствующей ступени напряжения электрической сети, т.е.

$$S_K = \sqrt{3}I_{п0}U_{ср}. \quad (8.8)$$

При этом

$$X_{GS} = \frac{U_{ср}^2}{S_K} \quad (8.9)$$

или

$$X_{*GS(6)} = \frac{S_6}{S_K} \cdot \frac{U_{ср}^2}{U_6^2}. \quad (8.10)$$

Если за базисное напряжение той части сети, где находится точка короткого замыкания, принято ее среднее номинальное напряжение, то выражения (8.5), (8.7) и (8.10) существенно упрощаются:

$$I_{шт} = I_{п0} = \frac{I_6}{X_{*GS(6)}}; \quad (8.11)$$

$$X_{*GS(б)} = \frac{I_б}{I_{п0}}; \quad (8.12)$$

$$X_{*GS(б)} = \frac{S_б'}{S_K'}. \quad (8.13)$$

При отсутствии данных о токе или мощности короткого замыкания индуктивное сопротивление системы можно оценить 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 (8.6), (8.7) 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 к их номинальным 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 определяется по формуле

$$I_{пт} = I_{п0} = \frac{E_{эж}}{X_{эж}} \quad (8.14)$$

или

$$I_{пт} = I_{п0} = I_б \frac{E_{*эж(б)}}{X_{*эж(б)}}, \quad (8.15)$$

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

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

### 8.3. Расчет 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 500 МВт и более). 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. 8.1 приведены кривые  $\frac{I_{nr}}{I_{n0}} = f(t)$  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  $\frac{I_{nr}}{I_{n0}} = f(t)$  приближаются друг к другу.

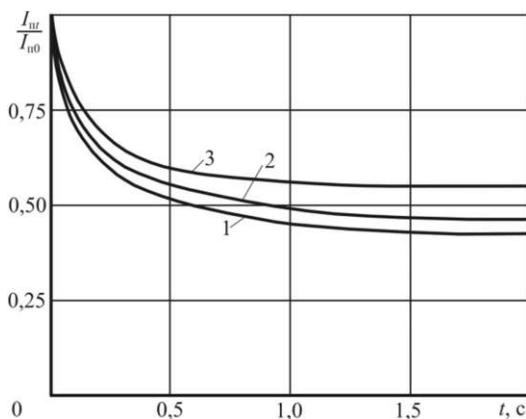


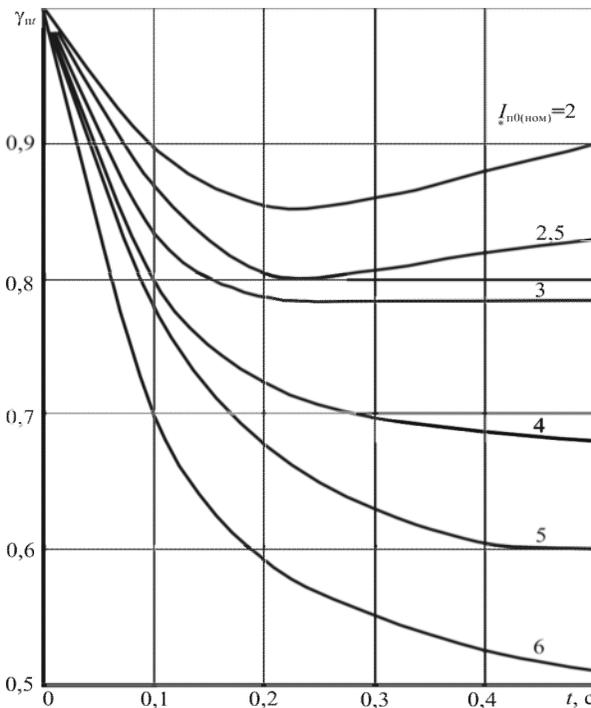
Рис. 8.1. Изменение во времени отношений действующих значений периодической составляющей тока в произвольный момент времени и в начальный момент короткого замыкания при коротких замыканиях на выводах генераторов разных типов

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 замыкания. Типо-

вые кривые для синхронных генераторов и синхронных компенсаторов с тиристорной независимой системой возбуждения приведены на рис. 8.2. 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. 8.2.** Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных генераторов (компенсаторов) с тиристорной независимой системой возбуждения, выраженного в долях 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 производится 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

$$I_{\text{п0}} = \frac{E_0''}{X_{\text{эк}}}. \quad (8.16)$$

3. По одной из приведенных выше формул (8.1), 8.2 или (8.3) 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:

$$I_{\text{пт}} = \gamma_{\text{пт}} I_{\text{п0}} = \gamma_{\text{пт}} I_{* \text{п0(ном)}} I_{\text{ном}} = \gamma_{\text{пт}} I_{* \text{п0(б)}} I_{\text{б}}. \quad (8.17)$$

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) замещают одним эквивалентным, т.е. соответствующие ветви в схеме замещения эквивалентируют, а в формулы (8.2) и (8.3) 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.

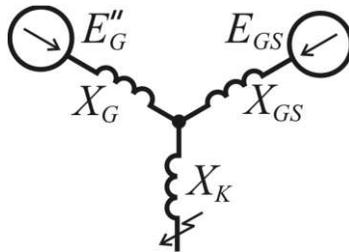
В общем случае, когда расчетная схема является сложной, т.е. содержит несколько источников энергии и при коротком замыкании эти источники оказываются связанными с точкой повреждения независимо друг от друга, а через какой-либо общий элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи и т.д.), при 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

$$\gamma_{kf} = \frac{I_{kf}}{I_{k(0)}}$$

где  $I_{kf}$  и  $I_{k(0)}$  — действующие значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания соответственно в рассматриваемый момент времени и в начальный момент короткого замыкания.

Для определения коэффициента  $\gamma_{kf}$  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. 8.3), а более удаленные источники энергии и связывающие их линии электропередачи, трансформаторы и т.д. вместе с остальной частью электроэнергетической системы были представлены в другой ветви неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС  $E_{GS}$  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. 8.3. Расчетная схема для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от системы 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

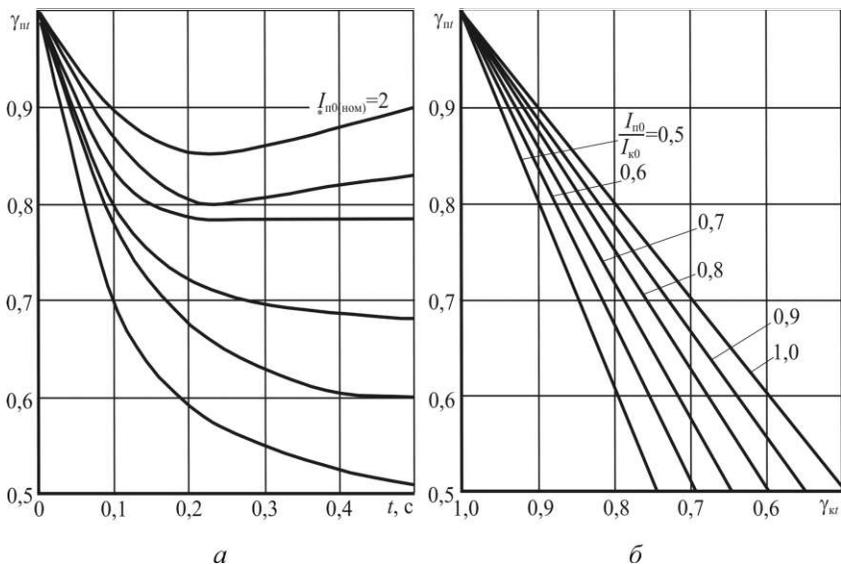
быть разные случаи. Если  $I_{*п0(ном)} < 2$  или  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} < 0,5$  либо одновременно

$I_{*п0(ном)} < 2$  и  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} < 0,5$ , то принимают, что действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания остается неизменным во времени, т.е.  $\gamma_{кп} = 1$ . Если же  $I_{*п0(ном)} \geq 2$

и  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} \geq 0,5$ , т.е. для выделенного генератора (компенсатора) короткое замыкания является близким и его влияние на ток в месте короткого замыкания оказывается существенным, то для определения действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени необходимо сначала для этого момента найти значение коэффициента  $\gamma_{кп}$ . Его приближенное значение может быть определено с помощью вспомогательных

кривых  $\gamma_{кп} = f(\gamma_{пт})$ , построенных для разных отношений  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$ , в пределах от 1 до 0,5. Такие кривые приведены на рис. 8.4 совместно с ти-

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



**Рис. 8.4. Кривые для определения отношения действующих значений периодической составляющей тока короткого замыкания от нескольких источников энергии в произвольный и в начальный моменты короткого замыкания с учетом влияния переходного процесса в ближайшем к месту короткого замыкания генераторе:**  
*a* – кривые  $\gamma_{\text{пт}} = f(t)$ ; *б* – кривые  $\gamma_{\text{кз}} = f(\gamma_{\text{пт}})$

Расчет действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени с использованием кривых  $\gamma_{\text{кз}} = f(\gamma_{\text{пт}})$  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. 8.3),

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

$$I_{к0} = \frac{E'_{ЭК}}{X_{ЭК}}. \quad (8.18)$$

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

$$I_{п0} = \frac{E'_G - X_K I_{к0}}{X_G}. \quad (8.19)$$

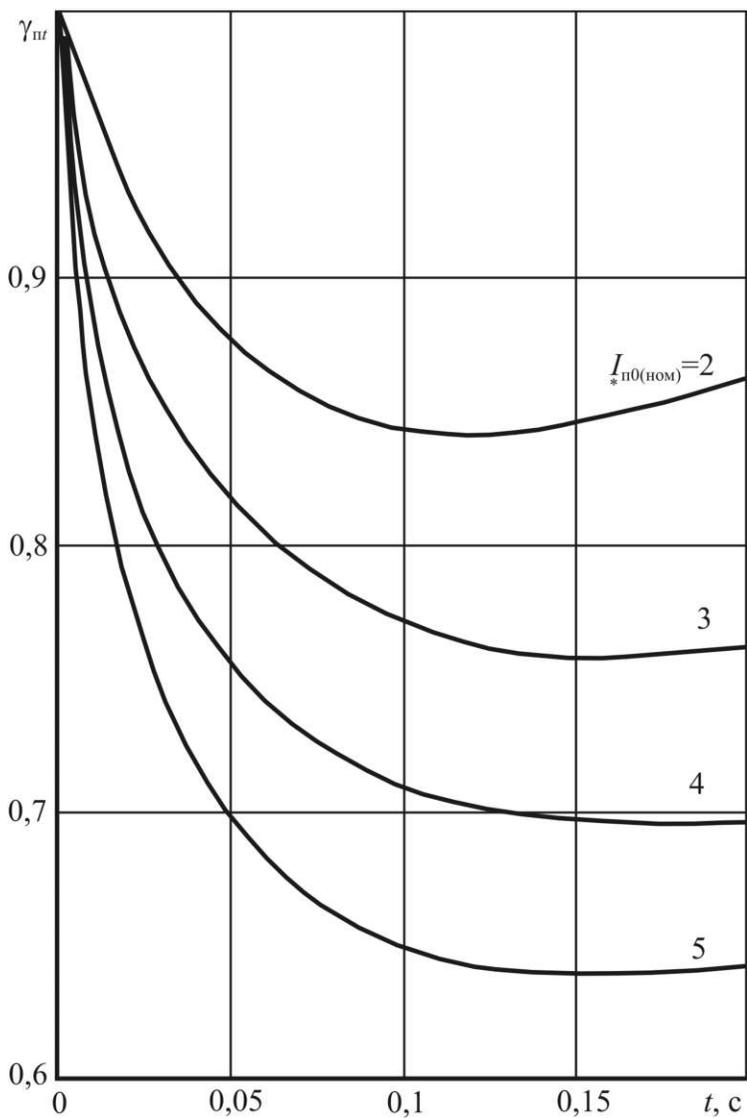
5. Определяют  $I_{*п0(ном)}$ , а также отношение  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$ .

6. Если  $I_{*п0(ном)} \geq 2$  и  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} \geq 0,5$ , то на рис. 8.4,а выбирают кривую  $\gamma_{ит} = f(t)$ , соответствующую найденному значению  $I_{*п0(ном)}$ , а на рис. 8.4,б – кривую  $\gamma_{кт} = f(\gamma_{ит})$ , соответствующую найденному значению  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}}$ , и для заданного расчетного момента времени  $t$  по выбранной кривой  $\gamma_{ит} = f(t)$  определяют  $\gamma_{ит}$ , а затем, используя выбранную кривую  $\gamma_{кт} = f(\gamma_{ит})$ , по найденному  $\gamma_{ит}$  определяют  $\gamma_{кт}$ .

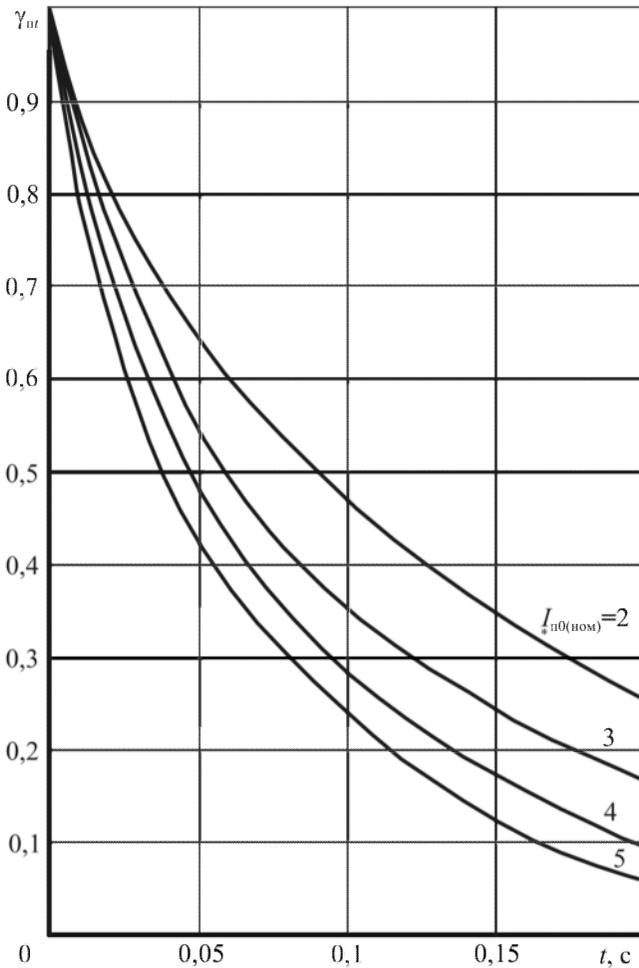
Искомое действующее значение периодической составляющей тока в месте короткого замыкания в заданный момент времени составляет

$$I_{кт} = \gamma_{кт} I_{к0} = \gamma_{кт} I_{*к0(б)} I_{б}. \quad (8.20)$$

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. 8.5 и 8.6.



**Рис. 8.5.** Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных электродвигателей, выраженного в долях его значения в начальный момент короткого замыкания



**Рис. 8.6.** Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от асинхронных электродвигателей, выраженного в долях его значения в начальный момент короткого замыкания

#### **8.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом спрямленных характеристик**

Изменение во времени действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронной машины сопровождается соответствующим изменением ее переходной, синхронной и других ЭДС, причем это изменение определяется не толь-

ко параметрами машины, но и удаленностью расчетной точки короткого замыкания. Таким образом, при прочих равных условиях любая ЭДС синхронной машины в заданный момент времени от начала короткого замыкания является функцией искомого значения периодической составляющей тока короткого замыкания в этот момент времени  $I_{пт}$ . Поэтому она не может быть предварительно определена с целью последующего использования для расчета указанного значения тока короткого замыкания. Тем не менее для каждого момента времени от начала короткого замыкания можно предварительно найти некоторые средние значения расчетной ЭДС синхронной машины  $E_t$  и ее расчетного индуктивного сопротивления  $X_t$ , не зависящие от удаленности расчетной точки короткого замыкания от этой машины и позволяющие с приемлемой для практики точностью определить действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в любой заданный момент времени от начала короткого замыкания, используя простое выражение:

$$I_{пт} = \frac{E_t}{X_t + X_{вн}}. \quad (8.21)$$

Выявим методику определения значений  $E_t$  и  $X_t$ .  
Из (8.21) следует:

$$E_t - X_t I_{пт} = U_{Gt} \quad (8.22)$$

и

$$U_{Gt} = X_{вн} I_{пт}, \quad (8.23)$$

где  $U_{Gt}$  – напряжение на выводах синхронной машины в произвольный момент времени от начала короткого замыкания.

Выражение (8.22) представляет собой внешнюю характеристику синхронной машины для заданного момента времени от начала короткого замыкания, т.е. зависимость напряжения на выводах машины в заданный момент времени от действующего значения периодической составляющей тока якоря в тот же момент времени  $U_{Gt} = f(I_{пт})$  при  $\cos\varphi = 0$ , т.е. при коротких замыканиях за разными индуктивными сопротивлениями внешней цепи. В отличие от обычных внешних характеристик здесь рассматриваются внешние характеристики, полученные с учетом действия устройств для автоматического регулирования возбуждения синхронной машины.

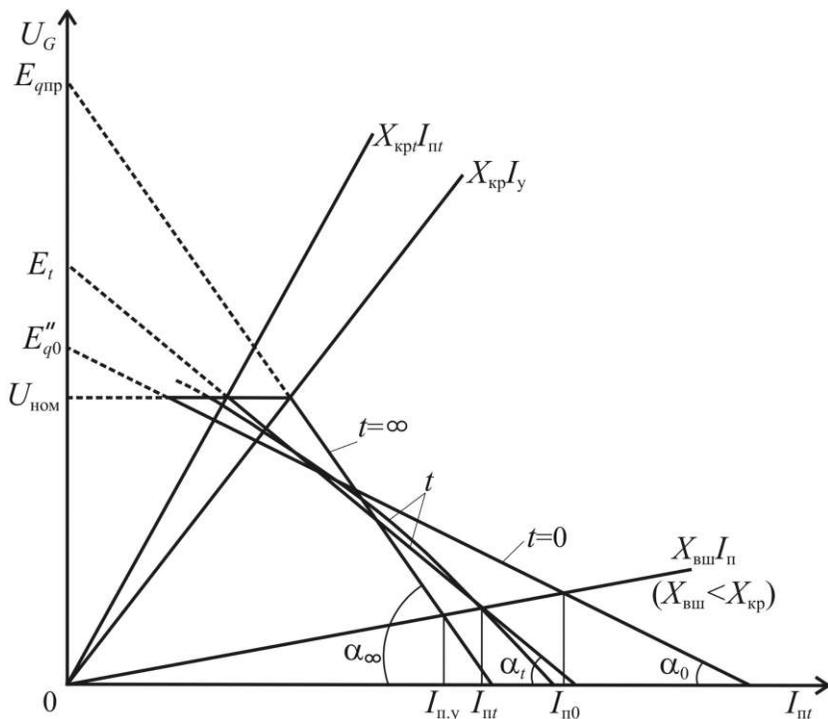
Из (8.22) и (8.23) следует, что действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в заданный момент времени при трехфазном коротком замыкании за произвольным индуктивным сопротивлением внешней цепи определяется положением точки пересечения внешней характеристики, соответствующей этому моменту времени, с прямой падения напряжения во внешнем сопро-

тивлении, проходящей через начало координат под углом к оси абсцисс, определяемым сопротивлением внешней цепи до точки повреждения.

Поскольку расчетная ЭДС синхронной машины  $E_t$  и ее расчетное индуктивное сопротивление  $X_t$  в заданный момент времени предполагаются независимыми от удаленности расчетной точки короткого замыкания, т.е. постоянными, то соответствующая этому моменту времени внешняя характеристика машины должна быть линейной и наклонной к оси абсцисс. Однако в действительности такими являются только внешняя характеристика для начального момента короткого замыкания и часть характеристики для установившегося режима короткого замыкания, соответствующая  $X_{вн} \leq X_{кр}$  (рис. 8.7), а при  $X_{вн} \geq X_{кр}$  внешняя характеристика для  $t = \infty$  параллельна оси абсцисс, что соответствует режиму нормального напряжения машины. Линейность внешней характеристики для начального момента короткого замыкания и наклонной части характеристики для установившегося режима короткого замыкания определяется тем, что в начальный момент короткого замыкания синхронная машина характеризуется независимыми от искомого тока короткого замыкания и соответственно от сопротивления внешней цепи сверхпереходной ЭДС  $E_{q0}''$  и сверхпереходным индуктивным сопротивлением  $X_d''$ , а в установившемся режиме при коротком замыкании за внешним сопротивлением  $X_{вн} \leq X_{кр}$  — синхронной ЭДС при предельном возбуждении  $E_{qп}$  и синхронным индуктивным сопротивлением  $X_d$ . При этом  $X_d''$  и  $X_d$  определяют углы наклона к оси абсцисс соответственно внешней характеристики машины для  $t = 0$  и части внешней характеристики для  $t = \infty$ , когда  $X_{вн} \leq X_{кр}$  (так как  $\text{tg}\alpha_0 \sim X_d''$  и  $\text{tg}\alpha_\infty \sim X_d$ ), а  $E_{q0}''$  и  $E_{qп}$  — положение точек пересечения с осью ординат прямых, отрезками которых являются характеристика машины для  $t = 0$  и наклонная часть характеристики для  $t = \infty$  (см. штриховые линии на рис. 8.7).

Из сказанного, очевидно, можно сделать следующее заключение: только линейный характер наклонной части внешней характеристики синхронной машины, соответствующей произвольному моменту времени от начала короткого замыкания, обеспечивает возможность определить для этого момента времени независимую от искомого тока короткого замыкания расчетную ЭДС машины и ее расчетное индуктивное сопротивление. Между тем в отличие от установившегося режима и начального момента переходного процесса наклонная часть внешней характеристики синхронной машины для произвольного момента времени от начала процесса короткого замыкания криволинейна. Кроме того, в отличие от начального момента времени такая характеристика имеет и линейный горизонталь-

ный участок, причем, чем меньше расчетное время от начала процесса короткого замыкания, тем короче горизонтальный участок характеристики. Горизонтальная часть внешней характеристики синхронной машины соответствует ее работе в заданный момент времени в режиме нормального напряжения, а наклонная часть – в режиме подъема возбуждения, вызванного действием устройства АРВ. Наклон луча, проведенного из начала координат через точку, в которой смыкаются две указанные части внешней характеристики, соответствует так называемому критическому индуктивному сопротивлению для заданного момента времени  $X_{кр}$ . Последнее представляет собой такое индуктивное сопротивление внешней по отношению к синхронной машине цепи, при коротком замыкании за которым напряжение на выводах машины к заданному моменту времени от начала короткого замыкания под действием АРВ поднимается до номинального. Чем меньше рассматриваемый момент времени, тем больше критическое сопротивление  $X_{кр}$ .



**Рис. 8.7.** Внешние характеристики синхронной машины в разные моменты времени от начала короткого замыкания и прямые падения напряжения в сопротивлении внешней цепи до точки повреждения при разных его значениях

Криволинейная часть внешней характеристики синхронной машины для произвольного момента времени от начала короткого замыкания имеет сравнительно небольшую кривизну. Очевидно, если эту часть характеристики заменить прямолинейной, причем такой, чтобы токи короткого замыкания, получаемые с использованием исходной криволинейной части характеристики и заменяющей ее спрямленной, при любых значениях  $X_{\text{вн}} < X_{\text{кр}}$  отличались друг от друга как можно меньше, то угол наклона спрямленной части характеристики определит некоторое расчетное для данного момента времени сопротивление синхронной машины  $X_t$ , а продолжение этой части характеристики до оси ординат – расчетную для этого момента времени ЭДС машины  $E_t$ . Найденные таким образом значения сопротивления  $X_t$  и ЭДС  $E_t$  не будут зависеть от искомого действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания  $I_{\text{пр}}$  и, если  $X_{\text{вн}} < X_{\text{кр}}$ , позволят его определить, используя (8.21). Полученные указанным способом расчетные значения ЭДС  $E_t$  и индуктивного сопротивления машины  $X_t$  для разных моментов времени от начала процесса короткого замыкания обычно представляют в виде кривых  $E_t = f(t)$  и  $X_t = f(t)$ . Такие кривые для турбогенераторов мощностью 200–300 МВт, работающих в предшествующем режиме с номинальной нагрузкой, представлены на рис. 8.8, где ЭДС  $E_t$  и сопротивление  $X_t$  выражены в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

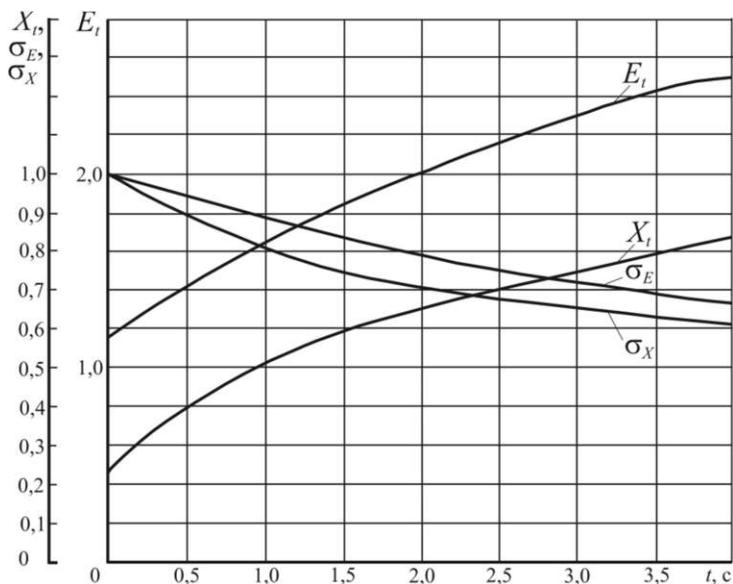


Рис. 8.8. Кривые для определения расчетных значений  $E_t$  и  $X_t$  турбогенераторов мощностью 200–300 МВт

При построении кривых рис. 8.8 принимается следующая расчетная схема: синхронный генератор включен последовательно с повышающим трансформатором, а на стороне обмотки высшего напряжения трансформатора подключены нагрузка, равная номинальной мощности генератора, и линия связи с системой, на которой находятся расчетные точки короткого замыкания. Для турбогенератора были приняты такие параметры:

$$X_{*d(\text{ном})}'' = 0,20; X_{*d(\text{ном})}' = 0,28; X_{*d(\text{ном})} = 1,9; T_{f0} = 6 \text{ с}; T_d'' = 0,115 \text{ с};$$

$$T_e = 0 - 0,3 \text{ с}; \frac{I_{f\text{н}}}{I_{f\text{ном}}} = 2; E_{*q\text{н}(\text{ном})} = 5,24; E_{*q0(\text{ном})}'' = 1,13.$$

Если параметры генератора, используемого в расчетной схеме, существенно отличаются от указанных выше параметров, расчетные значения ЭДС  $E_t$  и индуктивного сопротивления  $X_t$  такого генератора приближенно могут быть пересчитаны по формулам

$$E_t = E_{q\text{н}} - (E_{q\text{н}} - E_{q0}'') \sigma_E \quad (8.24)$$

и

$$X_t = X_d - (X_d - X_d'') \sigma_X, \quad (8.25)$$

где  $E_{q\text{н}}$ ,  $E_{q0}''$ ,  $X_d$ ,  $X_d''$  – соответствующие ЭДС и индуктивные сопротивления генератора, используемого в расчетной схеме, в относительных единицах;

$\sigma_E$  и  $\sigma_X$  – коэффициенты, значения которых определяются по дополнительным кривым, приведенным на рис. 8.8.

Как было отмечено выше, в зависимости от точки пересечения внешней характеристики синхронной машины для заданного момента времени от начала короткого замыкания с прямой  $U_{Gt} = X_{\text{вн}} I_{\text{пт}}$ , т.е. в зависимости от сопротивления внешней цепи до точки повреждения синхронная машина в заданный момент времени от начала короткого замыкания может работать или в режиме подъема возбуждения, или в режиме нормального напряжения. Режим подъема возбуждения имеет место, если  $X_{\text{вн}} \leq X_{\text{крт}}$ . При этом синхронная машина должна быть учтена в расчетной схеме замещения расчетными значениями ЭДС  $E_t$  и индуктивного сопротивления  $X_t$ . Если же  $X_{\text{вн}} \geq X_{\text{крт}}$ , то синхронная машина работает в режиме нормального напряжения и в расчетной схеме замещения должна быть учтена ЭДС  $E_t = U_{\text{ном}}$  и индуктивным сопротивлением  $X_t = 0$ , так как при номинальном напряжении на выводах генератора для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания достаточно знать только сопротивление внешней цепи до места повреждения.

Критическое сопротивление для заданного момента времени связано с расчетными значениями ЭДС  $E_t$  и сопротивления  $X_t$  простым соотношением:

$$X_{\text{крит}} = X_t \frac{U_{\text{ном}}}{E_t - U_{\text{ном}}} \quad (8.26)$$

или в относительных единицах при номинальных условиях генератора

$$X_{* \text{ крит}(\text{ном})} = X_{* t(\text{ном})} \frac{1}{I_{* t(\text{ном})} - 1}. \quad (8.27)$$

При расчетах в относительных единицах это сопротивление должно быть пересчитано к принятым базисным условиям.

В сложных схемах с несколькими генераторами их режимами работы в расчетный момент времени приходится задаваться и затем после расчета тока в месте короткого замыкания и определения токов во всех генераторах проверять правильность принятого для каждого генератора режима, сравнивая найденный ток генератора с критическим током для заданного момента времени. Последний определяется по формуле

$$I_{\text{крит}} = \frac{U_{\text{ном}}}{X_{\text{крит}}} = \frac{E_t - U_{\text{ном}}}{X_t} \quad (8.28)$$

или в относительных единицах при номинальных условиях генератора

$$I_{* \text{ крит}(\text{ном})} = \frac{E_{* t(\text{ном})} - 1}{X_{* t(\text{ном})}}. \quad (8.29)$$

В режиме подъема возбуждения ток генератора должен быть больше критического, а в режиме нормального напряжения ток генератора должен быть меньше критического (при расчетах в относительных единицах критический ток каждого генератора предварительно должен быть приведен к базисным условиям).

В том случае, когда для заданного генератора предварительно был выбран режим подъема возбуждения, о правильности выбранного режима можно судить и по напряжению на его выводах, полученному при расчетах: режим выбран верно, если это напряжение оказалось ниже номинального (меньше единицы при расчете в относительных единицах). Если у одного или нескольких генераторов оно оказывается больше номинального, необходимо изменить режим этого или этих генераторов (принять режим нормального напряжения) и учесть его (их) в схеме замещения ЭДС, равной номинальному напряжению, и сопротивлением, равным нулю. Затем следует повто-

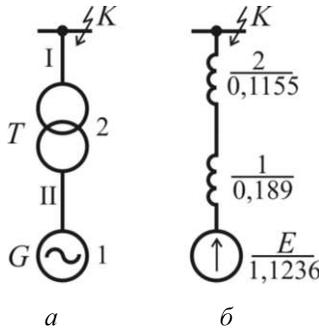
речь расчеты и повторно проверить правильность выбранных режимов всех генераторов.

Следует отметить, что кривые  $E_t = f(t)$  и  $X_t = f(t)$  получены при условии, что исходная расчетная схема содержит только один генератор. Поэтому их применение для расчета токов короткого замыкания в схемах с произвольным числом синхронных машин может быть сопряжено с дополнительной погрешностью. Однако во многих случаях применение метода спрямленных характеристик для расчета токов короткого замыкания в схемах с несколькими генераторами позволяет с достаточной для практики точностью определить не только ток в месте короткого замыкания, но и его распределение по отдельным ветвям расчетной схемы.

В тех случаях, когда исходная расчетная схема содержит нагрузки, то они должны быть введены в схему замещения в точках их действительного присоединения и учтены ЭДС  $E = 0$  и индуктивным сопротивлением  $X_{*CL(ном)} = 1, 2$ .

## 8.5. Примеры решения задач

*Задача 1.* Используя метод типовых кривых, определить значение периодической составляющей тока короткого замыкания через 0,2 с после момента возникновения трехфазного короткого замыкания в точке  $K$  исходной расчетной схемы (см. рис. 8.9, а).



**Рис.8.9.** Исходная расчетная схема (а) и схема замещения (б) к задаче 1:

1, 2 – порядковые номера элементов; I, II – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- генератор  $G$ :  $P_{ном} = 110$  МВт,  $\cos \varphi_{ном} = 0,8$ ,  $U_{ном} = 10,5$  кВ,  $X_{*d(ном)}'' = 0,189$ , до короткого замыкания генератор работал с номинальной нагрузкой, т.е.  $I_{*(0)(ном)} = 1$ ;

• трансформатор  $T$ :  $S_{\text{НОМ}} = 125 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 115/10,5 \text{ кВ}$ ;  
 $u_k = 10,5 \%$ .

*Решение.* Расчеты проведем в относительных единицах при следующих базисных условиях:  $S_6 = 137,5 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $U_6 = U_{\text{ср}}$ , т.е.  $U_{6I} = 115 \text{ кВ}$  и  $U_{6II} = 10,5 \text{ кВ}$ . Тогда базисный ток на стороне обмотки высшего напряжения

$$I_{6I} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6I}} = \frac{137,5}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,69 \text{ кА}.$$

Так как до короткого замыкания генератор работал с номинальной нагрузкой, его сверхпереходная ЭДС согласно формуле (5.34)

$$E_{*0(6)}'' = \sqrt{(1 + 0,189 \cdot 1 \cdot 0,6)^2 + (0,189 \cdot 1 \cdot 0,8)^2} \cdot \frac{10,5}{10,5} = 1,1236.$$

Сопротивления элементов схемы замещения (см. рис. 8.9,б) равны

$$X_{*1(6)}'' = X_{*d(\text{НОМ})}'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,189 \frac{137,5}{137,5} = 0,189;$$

$$X_{*2(6)}'' = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{137,5}{125} = 0,1155.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения относительно точки короткого замыкания

$$X_{* \text{эк}(6)}'' = X_{*1(6)}'' + X_{*2(6)}'' = 0,189 + 0,1155 = 0,3045.$$

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания

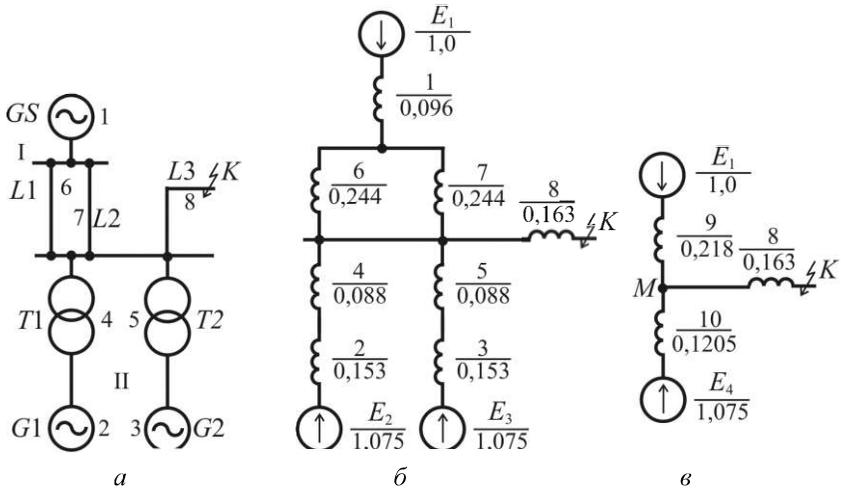
$$I_{* \text{п0}(6)}'' = \frac{E_{*0(6)}''}{X_{* \text{эк}(6)}''} = \frac{1,1236}{0,3045} = 3,69$$

или в относительных номинальных единицах

$$I_{* \text{п0}(\text{НОМ})}'' = I_{* \text{п0}(6)}'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 3,69 \frac{137,5}{137,5} = 3,69.$$

В соответствии с кривыми на рис. 8.2 при  $t = 0,2$  с коэффициент  $\gamma_{\text{п}} = 0,75$ , поэтому  $I_{* \text{п}t}'' = \gamma_{\text{п}} I_{* \text{п0}(6)}'' I_{6I} = 0,75 \cdot 3,69 \cdot 0,69 = 1,909 \text{ кА}$ .

**Задача 2.** Используя метод типовых кривых, определить значение периодической составляющей тока короткого замыкания через 0,4 с после момента возникновения трехфазного короткого замыкания в точке  $K$  исходной расчетной схемы (см. рис. 8.10,а).



**Рис. 8.10.** Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения (б, в) к задаче 2:  
 1 – 8 – порядковые номера элементов;  
 9, 10 – порядковые номера элементов преобразованной схемы;  
 I, II – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- электроэнергетическая система  $GS$ :  $S_{\text{ном}} = 2500 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $X_{*GS(\text{ном})} = 1,2$ ;
- генераторы  $G1$  и  $G2$ :  $P_{\text{ном}} = 200 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ,  $U_{\text{ном}} = 15,75 \text{ кВ}$ ;  $X_{*d(\text{ном})} = 0,18$ ; до короткого замыкания генераторы работали с 80% нагрузкой, т.е.  $I_{*(0)(\text{ном})} = 0,8$ ;
- трансформаторы  $T1$  и  $T2$ :  $S_{\text{ном}} = 250 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 230/15,75 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 11 \%$ ;
- линии электропередачи  $L1$  и  $L2$ :  $l = 150 \text{ км}$ ,  $X_{1\text{пор}} = 0,43 \text{ Ом/км}$ ;
- линия электропередачи  $L3$ :  $l = 100 \text{ км}$ ,  $X_{1\text{пор}} = 0,43 \text{ Ом/км}$ .

*Решение.* В качестве базисных единиц принимаем  $S_6 = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и  $U_{6I} = 230 \text{ кВ}$ . При этом

$$U_{6II} = \frac{U_{6I}}{n_T} = \frac{230}{230/15,75} = 15,75 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{GI}} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{\text{GI}}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,502 \text{ кА.}$$

ЭДС и сопротивления элементов, входящих в схему замещения (см. рис. 8.10,б), соответственно равны:

$$E_{*1(6)} = \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{GI}}} = \frac{230}{230} = 1,0;$$

$$E_{*2(6)} = E_{*3(6)} = \left( U_{(0)} + X_d'' I_{(0)} \sin \phi_{(0)} \right) \frac{U_{6\Pi}}{U_{\text{номII}}} = \\ = (1 + 0,18 \cdot 0,8 \cdot 0,522) \frac{15,75}{15,75} = 1,075;$$

$$X_{*1(6)} = 1,2 \frac{200}{2500} = 0,096;$$

$$X_{*2(6)} = X_{*3(6)} = 0,18 \frac{200}{200/0,85} = 0,153;$$

$$X_{*4(6)} = X_{*5(6)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{250} = 0,088;$$

$$X_{*6(6)} = X_{*7(6)} = 0,43 \cdot 150 \frac{200}{230^2} = 0,244;$$

$$X_{*8(6)} = 0,43 \cdot 100 \frac{200}{230^2} = 0,163.$$

Приводим схему замещения к виду, как показано на рис. 8.10,в:

$$E_{*4(6)} = E_{*2(6)} / E_{*3(6)} = 1,075;$$

$$X_{*9(6)} = 0,096 + \frac{0,244}{2} = 0,218;$$

$$X_{*10(6)} = \frac{0,088 + 0,153}{2} = 0,1205.$$

Эквивалентные ЭДС и сопротивление:

$$E_{* \text{ЭК}(6)} = \frac{1,0 \cdot 0,1205 + 1,075 \cdot 0,218}{0,1205 + 0,218} = 1,048;$$

$$X_{* \text{ЭК}(6)} = \frac{0,1205 \cdot 1,075}{0,1205 + 0,218} + 0,163 = 0,2406.$$

Действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент короткого замыкания в точке К

$$I_{*к0(б)} = \frac{E_{*эк(б)}}{X_{*эк(б)}} = \frac{1,048}{0,2406} = 4,356.$$

Напряжение в узле  $M$  (см. рис. 8.10,в)

$$U_{*M(б)} = 0,163 \cdot 4,356 = 0,71.$$

Составляющая тока короткого замыкания от генераторов, т.е. в вствии с сопротивлением  $X_{10}$

$$I_{*10(б)} = I_{*п0(б)} = \frac{1,075 - 0,71}{0,1205} = 3,03.$$

Находим

$$\frac{I_{п0}}{I_{к0}} = \frac{I_{*10(б)}}{I_{*к0(б)}} = \frac{3,03}{4,356} = 0,696.$$

Удаленность точки короткого замыкания от генераторов, характеризующееся значением величины

$$I_{*п0(ном)} = I_{*10(б)} \frac{S_б}{S_{ном}} = 3,03 \frac{200}{2 \cdot 200/0,85} = 1,288.$$

Поскольку  $I_{*п0(ном)} < 2$  то, периодическая составляющая тока в месте короткого замыкания практически не изменяется, т.е.

$$I_{к0,4} = I_{к0} = I_{*к0(б)} I_{бГ} = 4,356 \cdot 0,502 = 2,187 \text{ кА}.$$

При длине линии электропередачи  $L3$  25 км значения параметров составляют:

$$X_{*8(б)} = 0,43 \cdot 25 \frac{200}{230^2} = 0,0406;$$

$$X_{*эк(б)} = \frac{0,1205 \cdot 0,218}{0,1205 + 0,218} + 0,0406 = 0,1182;$$

$$I_{*к0(б)} = \frac{E_{*эк(б)}}{X_{*эк(б)}} = \frac{1,048}{0,1182} = 8,87;$$

$$U_{*M(б)} = 0,0406 \cdot 8,87 = 0,36;$$

$$I_{*10(б)} = I_{*п0(б)} = \frac{1,075 - 0,36}{0,1205} = 5,93;$$

$$\frac{I_{п0}}{I_{к0}} = \frac{I_{*10(б)}}{I_{*к0(б)}} = \frac{5,93}{8,87} = 0,669;$$

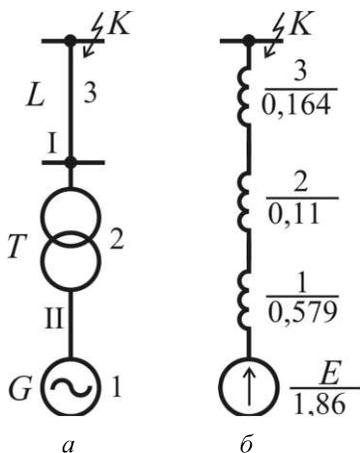
$$I_{*п0(ном)} = I_{*10(б)} \frac{S_{б}}{S_{ном}} = 5,93 \frac{200}{2 \cdot 200/0,85} = 2,52.$$

В этом случае необходимо воспользоваться кривыми на рис. 8.4 и учесть влияние энергосистемы с помощью кривых  $\gamma_k = f(\gamma_t)$ .

Для момента времени  $t = 0,4$  с и  $I_{*п0(ном)} = 2,52$  по кривым рис. 8.4,а находим  $\gamma_{пт} = 0,81$ , а затем с помощью рис. 8.4,б, исходя из найденного значения  $\gamma_{пт}$  и известного значения  $\frac{I_{п0}}{I_{к0}} = 0,669$ , находим  $\gamma_{кт} = 0,88$ . Таким образом искомое значение действующего значения периодической составляющей тока в месте короткого замыкания составляет

$$I_{п0,4} = \gamma_{кт} I_{*к0(б)} I_{б1} = 0,88 \cdot 8,87 \cdot 0,502 = 3,918 \text{ кА.}$$

*Задача 3.* Используя метод спрямленных характеристик, определить значение тока короткого замыкания через 1,5 с после момента возникновения трехфазного короткого замыкания в точке *K* исходной расчетной схемы (см. рис. 8.11,а).



**Рис.8.11. Исходная расчетная схема (а) и схема замещения (б) к задаче 3:**

1 – 3 – порядковые номера элементов; I, II – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- генератор  $G$ :  $P_{\text{ном}} = 220 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ,  $U_{\text{ном}} = 15,75 \text{ кВ}$ ;
  - трансформатор  $T$ :  $S_{\text{ном}} = 250 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 230/15,75 \text{ кВ}$ ;
- $u_k = 11 \%$ ;
- линия электропередачи  $L$ :  $l = 80 \text{ км}$ ,  $X_{\text{лпог}} = 0,435 \text{ Ом/км}$ .

*Решение.* В качестве базисных единиц принимаем  $S_{\text{б}} = 250 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и  $U_{\text{бл}} = 230 \text{ кВ}$ . При этом

$$U_{\text{бП}} = \frac{U_{\text{бл}}}{n_T} = \frac{230}{230/15,75} = 15,75 \text{ кВ};$$

$$I_{\text{бл}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{бл}}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,628 \text{ кА}.$$

Для генератора  $G$  по кривым рис. 8.8 для  $t = 1,5 \text{ с}$  находим  $E_{*t(\text{ном})} = 1,86$  и  $X_{*t(\text{ном})} = 0,6$ . ЭДС генератора и сопротивления элементов схемы замещения (см. рис. 8.11,б при принятых базисных условиях) составляют:

$$E_{*t(\text{б})} = E_{*t(\text{ном})} \frac{U_{(\text{ном})}}{U_{\text{бП}}} = 1,86 \frac{15,75}{15,75} = 1,86;$$

$$X_{*1(\text{б})} = X_{*t(\text{ном})} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} = 0,6 \frac{250}{220/0,85} = 0,579;$$

$$X_{*2(\text{б})} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{250}{250} = 0,11;$$

$$X_{*3(\text{б})} = X_{\text{лпог}} l \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{бл}}^2} = 0,435 \cdot 80 \cdot \frac{250}{230^2} = 0,164.$$

При этом сопротивление внешней (по отношению к генератору) цепи до точки короткого замыкания

$$X_{* \text{вн}(\text{б})} = X_{*2(\text{б})} + X_{*3(\text{б})} = 0,11 + 0,164 = 0,274.$$

По формуле (8.27) находим критическое сопротивление, отнесенное к номинальной мощности генератора:

$$X_{* \text{кр}t(\text{ном})} = X_{*t(\text{ном})} \frac{1}{E_{*t(\text{ном})} - 1} = 0,6 \frac{1}{1,86 - 1} = 0,698.$$

Чтобы сравнивать сопротивление внешней цепи с критическим, нужно последнее привести к базисным условиям:

$$X_{* \text{ крп}(\delta)} = X_{* \text{ крп}(\text{ном})} \frac{S_{\delta}}{S_{\text{ном}}} = 0,698 \frac{250}{220/0,85} = 0,674.$$

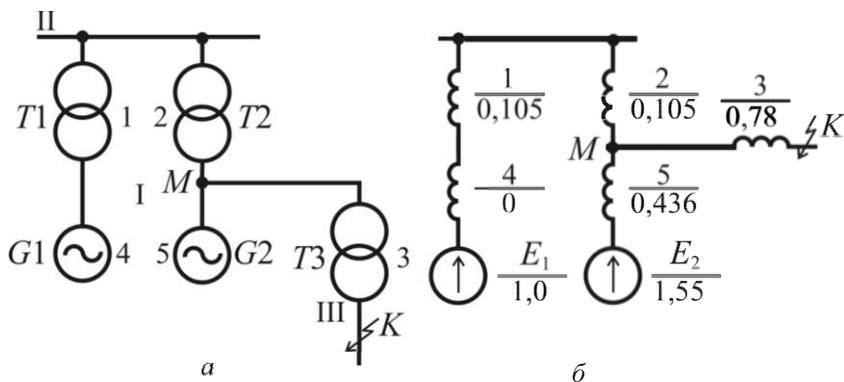
Поскольку  $X_{* \text{ вш}(\delta)} = 0,274 < X_{* \text{ крп}(\delta)} = 0,674$ , то в расчетный момент времени генератор будет работать в режиме подъема возбуждения, поэтому в расчетной схеме замещения его следует учесть следующими параметрами:  $E_{* \text{ I}(\delta)} = 1,86$  и  $X_{* \text{ I}(\delta)} = 0,579$ . При этом расчетный ток короткого замыкания

$$I_{* \text{ I}(\delta)} = \frac{E_{* \text{ I}(\delta)}}{X_{* \text{ I}(\delta)} + X_{* \text{ вш}(\delta)}} = \frac{1,86}{0,579 + 0,274} = 1,178$$

или в именованных единицах

$$I_t = I_{* \text{ I}(\delta)} I_{\delta \text{ I}} = 1,178 \cdot 0,628 = 0,74 \text{ кА.}$$

*Задача 4.* Используя метод спрямленных характеристик, определить значение тока короткого замыкания через 0,8 с после момента возникновения трехфазного короткого замыкания в точке *K* исходной расчетной схемы (см. рис. 8.12,а).



**Рис.8.12.** Исходная расчетная схема (а) и схема замещения (б) к задаче 4:  
1 – 5 – порядковые номера элементов; I, III – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- генераторы *G1* и *G2*:  $P_{\text{ном}} = 110 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ ,  $U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ}$ ;
- трансформаторы *T1* и *T2*:  $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 115/10,5 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10,5\%$ ;
- трансформатор *T3*:  $S_{\text{ном}} = 16 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 10,5/6,3 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10 \%$ .

*Решение.* В качестве базисных единиц принимаем  $S_0 = 125 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и  $U_0 = U_{\text{ср}}$ , т.е.  $U_{01} = 10,5 \text{ кВ}$ ,  $U_{011} = 115 \text{ кВ}$ ,  $U_{0111} = 6,3 \text{ кВ}$ . При этом

$$I_{0111} = \frac{S_0}{\sqrt{3}U_{0111}} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 11,46 \text{ кА}.$$

Предварительно для генераторов с помощью рис. 8.8 для  $t = 0,8 \text{ с}$  находим  $E_{*t(\text{ном})} = 1,55$  и  $X_{*t(\text{ном})} = 0,48$ . При этом критическое сопротивление

$$X_{* \text{кр}t(\text{ном})} = 0,48 \frac{1}{1,55 - 1} = 0,87.$$

Приведенные к базисным условиям ЭДС и сопротивления

$$E_{*t(0)} = E_{*t(\text{ном})} = 1,55;$$

$$X_{*t(0)} = 0,48 \frac{125}{110/0,8} = 0,436;$$

$$X_{* \text{кр}t(0)} = 0,87 \frac{125}{110/0,8} = 0,791$$

и критический ток

$$I_{* \text{кр}t(0)} = \frac{1}{X_{* \text{кр}t(0)}} = \frac{1}{0,791} = 1,264.$$

Сопротивления трансформаторов в схеме замещения (см. рис. 8.12,б)

$$X_{*1(0)} = X_{*2(0)} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_0}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,105;$$

$$X_{*3(0)} = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_0}{S_{\text{ном}}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{125}{16} = 0,78.$$

При оценке возможных режимов работы генераторов можно использовать простой способ.

1. Допустим, что генератор  $G1$  отключен. При этом по отношению к генератору  $G2$  сопротивление внешней цепи

$$X_{* \text{вн}(0)} = X_{*3(0)} = 0,78 < X_{* \text{кр}t(0)} = 0,791,$$

т.е. при отключенном генераторе  $G1$  генератор  $G2$  к моменту  $t = 0,8 \text{ с}$  работал бы в режиме подъема возбуждения. Влияние генератора  $G1$  приводит к некоторому повышению напряжения на выводах генератора  $G2$  и может оказаться, что это напряжение поднимется до номи-

нального. Таким образом, точно предсказать заранее режим работы генератора  $G2$  невозможно. Зададимся для него режимом подъема возбуждения, т.е. примем

$$E_{*2(\delta)} = E_{*t(\delta)} = 1,55 \text{ и } X_{*5(\delta)} = X_{*t(\delta)} = 0,436.$$

2. Допустим, что генератор  $G2$  отключен. При этом по отношению к генератору  $G1$  сопротивление внешней цепи

$$X_{*вн(\delta)} = X_{*1(\delta)} + X_{*2(\delta)} + X_{*3(\delta)} = 0,105 + 0,105 + 0,78 = 0,99 > X_{*кр1(\delta)} = 0,791,$$

т.е. при отключенном генераторе  $G2$  генератор  $G1$  к моменту  $t = 0,8$  с работал бы в режиме нормального напряжения. Влияние генератора  $G2$  способствует поддержанию этого режима. Таким образом, для генератора  $G1$  принимаем режим нормального напряжения и вводим его в схему замещения

$$E_{*1(\delta)} = U_{*ном(\delta)} = 1,0 \text{ и } X_{*4(\delta)} = 0.$$

При этом эквивалентная ЭДС и эквивалентное сопротивление схемы замещения будут равны:

$$E_{*эк(\delta)} = \frac{1,55 \cdot 0,21 + 1 \cdot 0,436}{0,21 + 0,436} = 1,179;$$

$$X_{*эк(\delta)} = \frac{0,21 \cdot 0,436}{0,21 + 0,436} + 0,78 = 0,9217.$$

Ток в месте короткого замыкания

$$I_{*кр(\delta)} = \frac{1,179}{0,9217} = 1,279$$

или в исходных единицах

$$I_{кр} = I_{*кр(\delta)} I_{бш} = 1,279 \cdot 11,46 = 14,66 \text{ кА.}$$

Проверим правильность выбранных режимов работы генераторов. Потенциал на выводах генератора  $G2$

$$U_{*M(\delta)} = X_{*3(\delta)} I_{*кр(\delta)} = 0,78 \cdot 1,279 = 0,9976 < 1,0,$$

т.е. режим генератора  $G2$  выбран верно.

Ток в генераторе  $G1$

$$I_{*G1(\delta)} = \frac{E_{*1(\delta)} - U_{*M(\delta)}}{X_{*1(\delta)} + X_{*2(\delta)}} = \frac{1 - 0,9976}{0,105 + 0,105} = 0,0114 < I_{*кр1(\delta)} = 1,264,$$

т.е. режим генератора  $G1$  также выбран верно.

## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

---

---

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН

---

---

### 9.1. 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 последовательно включенными в разные фазы элементами с неодинаковым сопротивлением, а также обрывами проводников одной или двух фаз.

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

- 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 и т.д.) 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 явнополюсных синхронных машин расчет дополнительно 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 выполняется условие: параметры всех фаз этой цепи одинаковы, а причиной нарушения симметрии является возникновение в одной или двух точках цепи поперечной или продольной несимметрии. При этом условии 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.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \Delta \dot{U}_2 &= \underline{Z}_2 \dot{I}_2; \\ \Delta \dot{U}_0 &= \underline{Z}_0 \dot{I}_0; \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

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 (9.1) 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 пря-

мой, 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, являясь 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;

- обратно-синхронное 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  $\dot{E}_0 = 0$ .

Кроме упомянутых 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.

## 9.2. Образование высших гармоник при несимметричных режимах синхронных машин

Синхронная машина не является, строго говоря, 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 корот-

козамкнутый контур. Циркулирующий по этому контуру переменный ток синхронной частоты  $f$  создаст пульсирующее магнитное поле. Последнее, как известно, можно представить как два поля, вращающихся с синхронной угловой скоростью  $\omega_{\text{синх}}$  в противоположных направлениях. Прямо вращающееся поле, т.е. поле, которое вращается в направлении прямого чередования фаз или, иначе, в направлении вращения ротора, по отношению к последнему оказывается неподвижным и таким образом трансформаторно связанным с магнитным полем, созданным током возбуждения. Обратное вращающееся поле, т.е. поле, которое вращается в направлении обратного чередования фаз, по отношению к ротору перемещается с двойной угловой скоростью  $2\omega_{\text{синх}}$  и индуцирует в обмотке возбуждения вторую гармоническую ЭДС. 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. Обратное вращающееся 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 обратного чередования фаз. Оно оказывается неподвижным относительно магнитного поля, вызвавшего в обмотке возбуждения ток двойной частоты, и частично компенсирует это поле. Прямо вращающееся поле по отношению к якорю движется с тройной угловой скоростью в направлении прямого чередования фаз 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 обратно вращающиеся 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 создаст неподвижное в пространстве магнитное поле, под действием которого в обмотке возбуждения, вращающейся относительно этого поля с синхронной угловой скоростью, наводится переменный ток синхронной ча-

стоты. Последний создаст 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 обратно вращающееся поле по отношению к якорю 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 обратно вращающегося 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 обсах осей 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 ДЕСЯТАЯ

---

---

# ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТОКАМ ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

---

---

### 10.1. Общие сведения

Параметры отдельных элементов электрических цепей электроэнергетических систем по отношению к токам разных последовательностей в зависимости от свойств и конструктивного исполнения 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.

У статических элементов электрических цепей, фазы которых не связаны между собой магнитными потоками взаимной индукции, сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей одинаковы. К таким элементам обычно относят токоограничивающие реакторы, так как у них магнитная связь между фазами незначительна.

У статических элементов, обладающих взаимной индуктивностью между фазами, при равенстве собственных индуктивностей отдельных фаз и взаимных индуктивностей между каждой парой фаз одинаковыми являются только параметры прямой и обратной последовательности. А индуктивные сопротивления нулевой последовательности фаз больше, чем прямой (обратной) последовательности. Это объясняется тем, что при токах нулевой последовательности ЭДС взаимной индукции 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.

У вращающихся электрических машин параметры разных последовательностей различны, так как различны физические процессы, имеющие место в таких машинах при системах напряжений и токов разных последовательностей. Это связано с особенностями конструктивного исполнения вращающихся электрических машин, а у синхронных машин и с наличием собственного вращающегося магнитного поля. Система токов прямой последовательности создаст 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.

## 10.2. 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. 9) к появлению в контурах ротора токов двойной частоты, а в обмотку якоря – ЭДС обратной последовательности основной частоты и ЭДС прямой последовательности тройной частоты. Влияние последней зависит от условий возникновения тока обратной последовательности в машине.

При определении индуктивного сопротивления обратной последовательности синхронной машины в отечественной и зарубеж-

ной литературе существует три подхода, дающих хотя и разные, но близкие результаты. Эти три подхода заключаются в следующем:

1) подведение к обмотке якоря машины синусоидального тока обратной последовательности  $I_2$  промышленной частоты от источника тока, т.е. при сопровитвлении внешней цепи (по отношению к якорю машины)  $X_{вн} = \infty$ ;

2) подведение к обмотке якоря машины синусоидального напряжения обратной последовательности  $U_2$  промышленной частоты от источника напряжения, т.е. при сопровитвлении внешней цепи (по отношению к якорю машины)  $X_{вн} = 0$ ;

3) появление токов обратной последовательности вследствие тех или иных причин в сети системы, обусловивших несимметрию токов в якоре машины при  $0 < X_{вн} < \infty$ .

В первом случае – при подведении к обмотке якоря синхронной машины синусоидального тока обратной последовательности от источника тока в этой обмотке наводится ЭДС прямой последовательности тройной частоты. Но тока тройной частоты в обмотке якоря эта ЭДС не вызывает, так как  $X_{вн} = \infty$ . При этом напряженис обратной последовательности  $\dot{U}_2$ , напряженис прямой последовательности тройной частоты  $\dot{U}_{1(3f)}$  и ток обратной последовательности  $\dot{I}_2$  связаны соотношенисм

$$\dot{U}_2 e^{-j\omega t} + \dot{U}_{1(3f)} e^{j3\omega t} = -j \dot{I}_2 X_2. \quad (10.1)$$

причем в моменты совпадения магнитного поля тока обратной последовательности с продольной и поперечной осями ротора слагаемые левой части формулы (10.1) направлены соответственно одинаково и взаимопротивоположно. Поэтому напряженис 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 напряженис обратной последовательности от  $U_{2q}$  – при совпадении магнитного поля тока обратной последовательности с продольной осью ротора, до  $U_{2d}$  – при совпадении указанного магнитного поля с поперечной осью ротора, причем эти значения связаны с подводимым к обмотке якоря током обратной последовательности соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{2q} &= -jX'_d \dot{I}_2; \\ \dot{U}_{2d} &= -jX_q \dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (10.2)$$

Обычно напряжение обратной последовательности определяют как среднее арифметическое из минимального и максимального значений, т.е.

$$\dot{U}_2 = -j \frac{(X'_d + X_q)}{2} \dot{I}_2. \quad (10.3)$$

поэтому сопротивление обратной последовательности синхронной машины при подведении к обмотке якоря синусоидального тока обратной последовательности от источника тока определяют как модуль отношения среднего арифметического значения напряжения обратной последовательности к току якоря

$$X_2 = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right| = \frac{X'_d + X_q}{2}. \quad (10.4)$$

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 ( $X_{вн} = 0$ ). 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

$$\dot{I}_2 e^{-\omega t} + \dot{I}_{1(3f)} e^{3\omega t} = \frac{\dot{U}_2}{jX_2}, \quad (10.5)$$

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 (10.5), 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 из-

меняется и ток обратной последовательности от  $I_{2d}$  – при совпадении магнитного поля тока обратной последовательности с продольной осью ротора, до  $I_{2q}$  – при совпадении указанного магнитного поля с поперечной осью ротора, причем указанные значения тока обратной последовательности связаны с подведенным к машине напряжением обратной последовательности соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{2d} &= -j \frac{\dot{U}_2}{X'_d}; \\ \dot{I}_{2q} &= -j \frac{\dot{U}_2}{X_q}. \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

поэтому среднее арифметическое значение тока обратной последовательности

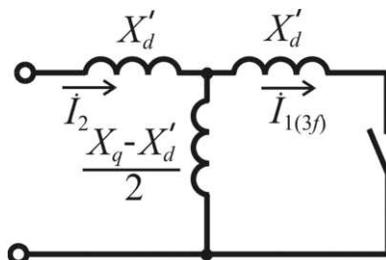
$$\dot{I}_2 = -j \frac{\dot{U}_2}{2} \left( \frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

и 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

$$X_2 = \left| \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right| = \frac{2}{\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q}} = \frac{2X'_d X_q}{X'_d + X_q}. \quad (10.7)$$

Выражению (10.7) соответствует эквивалентная схема, представленная на рис. 10.1. Значение тока левой ветви схемы с сопротивлением  $X'_d$  численно равно действующему значению тока обратной последовательности основной частоты, а значение тока правой ветви с сопротивлением  $X'_q$  – действующему значению тока прямой последовательности тройной частоты, но не отражает реальной частоты этого тока. Выражение (10.7) позволяет показать, что сопротивление обратной последовательности синхронной машины зависит от сопротивления внешней 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 явля-

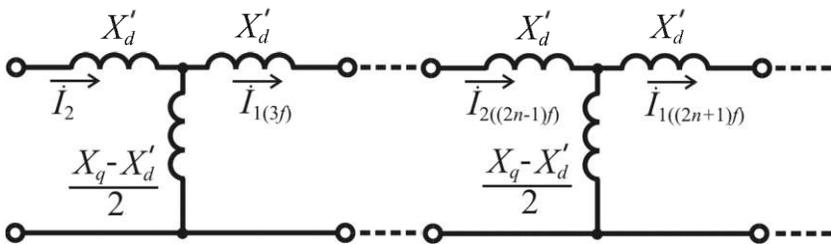
ется следствием циркуляции в обмотке якоря машины тока тройной частоты, амплитуда которого является функцией этого сопротивления. В пределе, при стремлении последнего к бесконечности ток тройной частоты оказывается подавленным и сопротивление обратной последовательности стремится к значению, определяемому выражением (10.4). Соответствующее сопротивление обратной последовательности можно получить и из схемы на рис. 10.1, разорвав в ней правую ветвь с сопротивлением  $X'_d$ .



**Рис. 10.1. 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  $0 < X_{\text{вн}} < \infty$ ) возникновение в этой обмотке тока прямой последовательности тройной частоты сопровождается появлением тока обратной последовательности той же частоты. В результате в контурах ротора возникают токи частоты  $4f$  и в обмотке якоря токи прямой последовательности частоты  $3f$  и соответственно токи обратной последовательности той же частоты и т.д. (см. гл. 9). Влияние всех нечетных гармонических составляющих тока якоря на сопротивление обратной последовательности синхронной машины в полной мере отражает бесконечная цепная схема замещения (рис. 10.2), 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

$$X_2 = \sqrt{X'_d X_q}. \quad (10.8)$$



**Рис. 10.2. 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 (10.4), (10.7) и (10.8) 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 (электрический)  $2\pi/3$  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

ности синхронной машины меньше сопротивления рассеяния якоря для токов прямой (обратной) последовательности и в зависимости от конструкции обмотки якоря колеблется в широких пределах.

### 10.3. Асинхронные электродвигатели

Если у асинхронного электродвигателя, ротор которого вращается со скольжением  $s = \frac{\omega_{\text{синх}} - \omega}{\omega}$  по отношению к магнитному полю от токов прямой последовательности, поменять порядок чередования фаз подводимого напряжения, поддерживая при этом прежнюю частоту вращения (с помощью постороннего привода), то возникшие в обмотке статора токи обратной последовательности создадут магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой в сторону, противоположную направлению вращения ротора. По отношению к этому полю скольжение ротора составляет  $s_2 = \frac{-\omega_{\text{синх}} - \omega}{-\omega_{\text{синх}}} = 2 - s$ ,

так как угловая скорость вращения ротора, выраженная через скольжение по отношению к полю прямой последовательности, составляет  $\omega = (1-s)\omega_{\text{синх}}$ . 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 полю от токов прямой последовательности  $s$  скольжением ротора относительно магнитного поля от токов обратной последовательности  $s_2 = 2 - s$  (рис. 10.3).

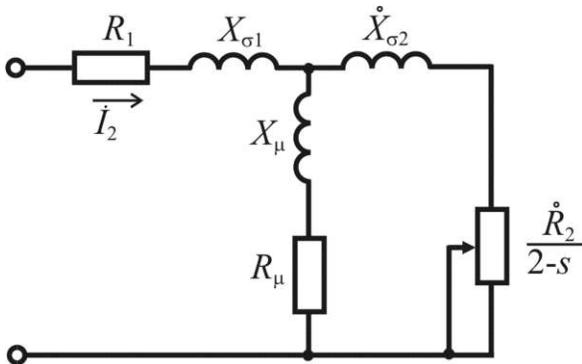


Рис. 10.3. Схема замещения, определяющая сопротивление обратной последовательности асинхронного электродвигателя

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 обратной последовательности в роторе  $f(2 - s)$ , которая значительно больше частоты токов прямой последовательности в роторе  $fs$ .

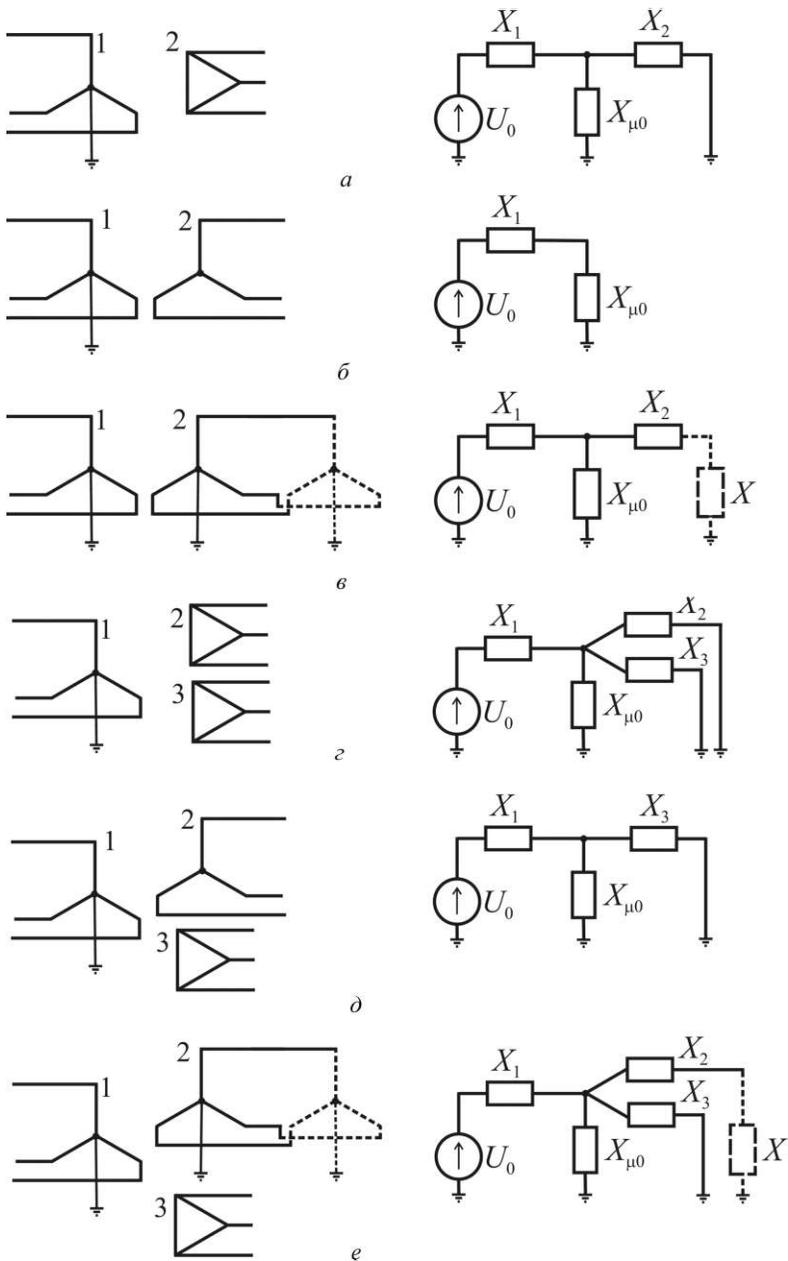
Нетрудно показать, что при изменении скольжения асинхронной машины от  $s_1 = 1$  до  $s_2 = 2 - s$  ее эквивалентное (входное) сопротивление изменяется незначительно. Поэтому сопротивление обратной последовательности асинхронной машины обычно принимают равным сопротивлению заторможенной машины, т.е.  $Z_2 \approx Z_K$ .

## 10.4. 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 исполнения 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. 10.4.



**Рис. 10.4.** Схемы соединения обмоток и схемы замещения по отношению к токам нулевой последовательности двухобмоточных (*a–в*) и трехобмоточных (*г–е*) трансформаторов

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  $Y_0/\Delta$  (рис. 10.4,а), то при появлении на выводах обмотки 1 напряжения нулевой последовательности по фазам обмотки 2, соединенной в треугольник, начинает циркулировать ток нулевой последовательности. Его значение таково, что обусловленное им падение напряжения в обмотке каждой фазы численно равно наводимой в ней ЭДС нулевой последовательности. Вследствие этого потенциалы линейных проводников оказываются равными нулю, и ток в эти проводники не попадет. 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. 10.4,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  $X_{\text{ц0}}$  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. 10.4,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  $X_{\text{ц0}}$  (см. правую часть рис. 10.4,б). Учитывая, что  $X_{\text{ц0}} \gg X_1$ , сопротивление нулевой последовательности трансформатора 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. 10.4,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. 10.4,в, на котором пунктирными линиями показана 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.  $X_0 = X_1 + X_{\text{ц0}}$ .

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. 10.4,з,д,е) 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 сопротивление рассеяния обмотки 3 (см. правые части рис. 10.4,з,д,е). 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. 10.4,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. 10.4,в).

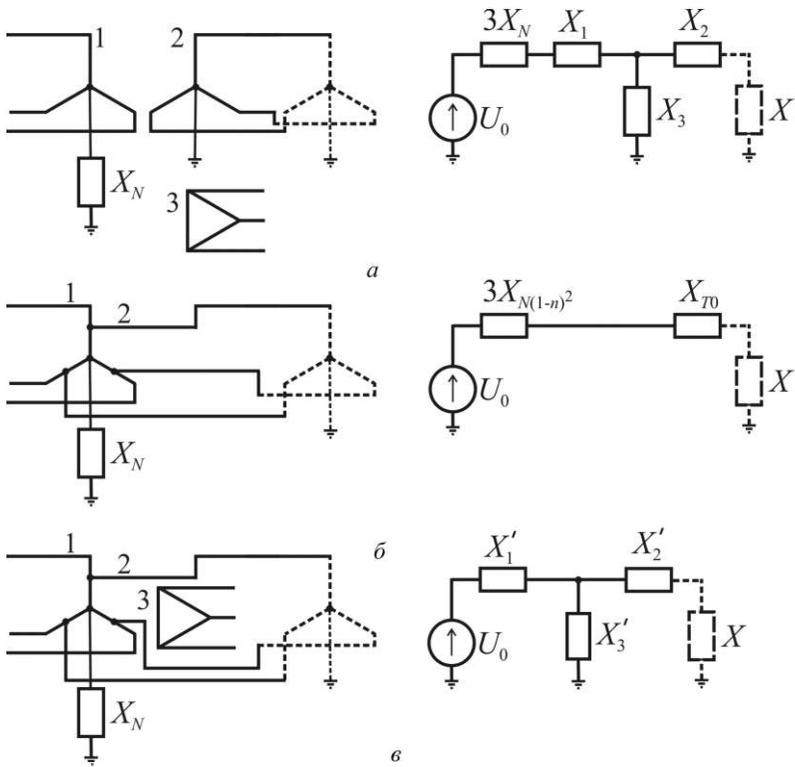
Иногда нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов заземляют не непосредственно, а через какой-либо элемент, например, резистор, реактор и т.д. Поскольку этот элемент является частью контура, по которому возможна циркуляция токов нулевой последовательности, то он должен быть учтен в схеме замещения нулевой последовательности.

При включении упомянутого элемента в нейтраль обмотки 1 трехобмоточного трансформатора (рис. 10.5,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. 10.5,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. 10.5,б,в). Поэтому при заземлении нейтрали автотрансформатора, например, через реактор, обладающий индуктивным сопротивлением  $X_N$ , сопротивление нулевой последовательности такого автотрансформатора с учетом реактора оказывается зависящим не только от сопротивлений  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_{10}$  и  $X_N$ , но и от номинальных напряжений обмоток 1 и 2, т.е.  $U_{1ном}$  и  $U_{2ном}$ . 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. 10.5,б, слева), составляет

$$X_{эк0} = X_{T0} + 3X_N (1 - n_T)^2, \quad (10.9)$$

где  $X_{T0}$  – сопротивление нулевой последовательности автотрансформатора при отсутствии в нейтрали реактора;  $n_T = U_{1ном}/U_{2ном}$ .



**Рис. 10.5.** 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:  
1 – 3 – обмотки трансформаторов

Эквивалентная схема замещения по отношению к токам нулевой последовательности трехобмоточного автотрансформатора, у которого третья обмотка соединена в треугольник, представляет собой трехлучевую звезду (рис. 10.5,в, правая часть). Сопротивления лучей этой звезды, приведенные к обмотке 1, составляют

$$\left. \begin{aligned} X'_1 &= X_1 + 3X_N(1 - n_T); \\ X'_2 &= X_2 + 3X_N(n_T - 1)n_T; \\ X'_3 &= X_3 + 3X_N n_T, \end{aligned} \right\} \quad (10.10)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – сопротивления лучей трехлучевой схемы замещения автотрансформатора (при отсутствии реактора в его нейтрали), приведенные к обмотке 1.

## 10.5. 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. 10.6,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. 10.6,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 индуктивное сопротивление провода, Ом/км, обусловленное внешним магнитным полем, определяется по формуле

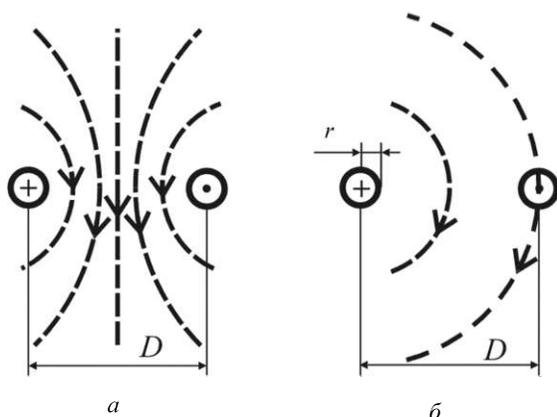


Рис. 10.6. Линии магнитного поля, создаваемого токами двух проводников (а) и током одного проводника (б) в пределах ширины петли

$$X_{\text{вн}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r}, \quad (10.11)$$

где  $f$  – частота переменного тока;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость пустоты;  $r$  – радиус поперечного сечения провода.

Определение индуктивного сопротивления провода от внутреннего поттокосцепления 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 выразим для погонного индуктивного сопротивления провода от внутреннего поттокосцепления, Ом/км, оказывается весьма простым:

$$X_{\text{вт}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{8\pi}. \quad (10.12)$$

Результирующее погонное индуктивное сопротивление провода определяется выражением

$$X = X_{\text{вн}} + X_{\text{вт}} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \right). \quad (10.13)$$

Обычно при расчетах индуктивного сопротивления нулевой последовательности воздушных линий электропередачи выражение (10.13) представляют в более простом виде:

$$X = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_{\text{эк}}}, \quad (10.14)$$

где  $r_{\text{эк}}$  – так называемый эквивалентный радиус поперечного сечения провода.

Связь между действительным и эквивалентным радиусами легко установить, приравняв правые части (10.13) и (10.14). 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 сталслюминиевых проводов  $r_{\text{эк}}/r \approx 0,95$ .

Физически переход от выражения (10.13) к (10.14) 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 (10.14) натуральный логарифм через десятичный и подставив в это выражение  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$  Гн/км, получим

$$X = 2\pi f \cdot 4,6 \cdot 10^{-4} \lg \frac{D}{r_{\text{ЭК}}} = 0,29 \cdot 10^{-2} f \lg \frac{D}{r_{\text{ЭК}}}. \quad (10.15)$$

При частоте  $f = 50$  Гц

$$X = 0,145 \lg \frac{D}{r_{\text{ЭК}}}, \quad (10.16)$$

а полное сопротивление провода

$$Z = R_{\text{п}} + j0,145 \lg \frac{D}{r_{\text{ЭК}}}, \quad (10.16a)$$

где  $R_{\text{п}}$  – активное сопротивление провода.

Найдем теперь выражение для индуктивного сопротивления контура провод – земля, т.е. контура, в котором в качестве второго провода используется земля. Оно позволит определить индуктивное сопротивление прямой (обратной) и нулевой последовательностей трехфазной воздушной линии электропередачи.

Линии магнитного поля, создаваемого токами в земле, имеют большую длину, вследствие чего индукция магнитного поля, магнитный поток и соответственно индуктивность земли незначительны. Поэтому обычно считают, что индуктивность контура провод – земля определяется лишь индуктивностью провода. Поскольку земля представляет собой проводник огромных размеров, а ток в земле является переменным, то его распределение в земле оказывается неравномерным. Наибольшая плотность тока оказывается на поверхности земли под проводом, а по мере удаления в стороны и углубления в землю плотность тока уменьшается. Если пренебречь токами в тех частях земли, где их плотность не превышает 5% плотности тока под проводом, то можно считать, что в проведении тока в земле участвует объем земли, заключенный в полуцилиндре, ось которого находится на поверхности земли под проводом. Радиус поперечного сечения полуцилиндра зависит от удельной проводимости земли. Последняя для сырой земли составляет  $\gamma \approx 1 \cdot 10^{-4}$  См/см, а для сухой земли  $\gamma \approx 1 \cdot 10^{-5}$  См/см. В первом случае радиус поперечного сечения полуцилиндра примерно равен 1,5 км, а во втором – еще больше.

Следует отметить, что аналитическое выражение для закона распределения тока в земле весьма сложно вследствие непостоянства

проводимости земли вдоль трассы воздушной линии и по мере удаления от центра полуцилиндра, конечных размеров земли и влияния краевого эффекта, т.е. особого распределения тока у мест его входа и выхода из земли. Для упрощения задачи обычно землю считают однородным проводником, имеющим бесконечные размеры, а влиянием краевого эффекта пренебрегают. При указанных допущениях выражение для индуктивного сопротивления провода воздушной линии, Ом/км, при возврате тока по земле и частоте этого тока  $f = 10 \div 100$  Гц имеет вид:

$$X_3 = 0,29 \cdot 10^{-2} f \cdot \lg \frac{6593}{r_{\text{ЭК}} \sqrt{f \gamma}}. \quad (10.17)$$

Это выражение можно представить как

$$X_3 = 0,29 \cdot 10^{-2} f \cdot \lg \frac{D_3}{r_{\text{ЭК}}}, \quad (10.18)$$

где  $D_3$  (в сантиметрах) составляет

$$D_3 = \frac{6593}{\sqrt{f \gamma}}. \quad (10.19)$$

Сравнивая формулы (10.15) и (10.18), легко увидеть, что они аналогичны, только в формулу (10.18) вместо расстояния между прямым и обратным проводами входит величина  $D_3$ , определяемая выражением (10.19).

Таким образом, индуктивное сопротивление провода 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. 10.7). Вследствие этого  $D_3$  называют глубиной залегания фиктивного обратного провода. При частоте тока 50 Гц и удельной проводимости земли  $1 \cdot 10^{-4}$  См/см значение  $D_3 \approx 935$  м.

Как видно из (10.17), индуктивное сопротивление  $X_3$  не зависит от высоты подвеса провода  $h$ . Это объясняется тем, что при изменении высоты подвеса провода остается неизменной сумма магнитных потоков, замыкающихся в воздухе и в земле.

При частоте тока 50 Гц формула (10.18) имеет вид:

$$X_3 = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ЭК}}}. \quad (10.20)$$

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

$$R_3 \approx \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (10.21)$$

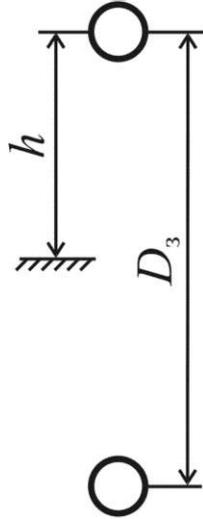


Рис. 10.7. Замена контура провод–земля двухпроводной линией

Из (10.21) видно, что сопротивление  $R_3$  практически не зависит от проводимости земли, поскольку с изменением проводимости земли изменяется степень неравномерности распределения тока в земле и, как следствие, изменяется объем земли, участвующий в проведении основной части тока. При частоте тока 50 Гц значение  $R_3 \approx 0,05$  Ом/км.

Полное сопротивление контура (линии) провод – земля, Ом/км, при частоте тока 50 Гц составляет

$$\underline{Z}_3 = R_{\Pi} + 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк}}}. \quad (10.22)$$

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. 10.8,а). Такая линия по создаваемому ей маг-

нитному полю и соответствующим индуктивным сопротивлениям эквивалентна двум линиям провод – земля (рис. 10.8,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. 10.8,б). Вследствие того, что  $D_3$  значительно больше  $D$ , расстояния от каждого из фиктивных обратных проводов  $I'$  и  $II'$  до каждого из действительных  $I$  и  $II$  практически одинаковы. Поэтому результирующее электромагнитное действие фиктивных обратных проводов на действительные равно нулю.

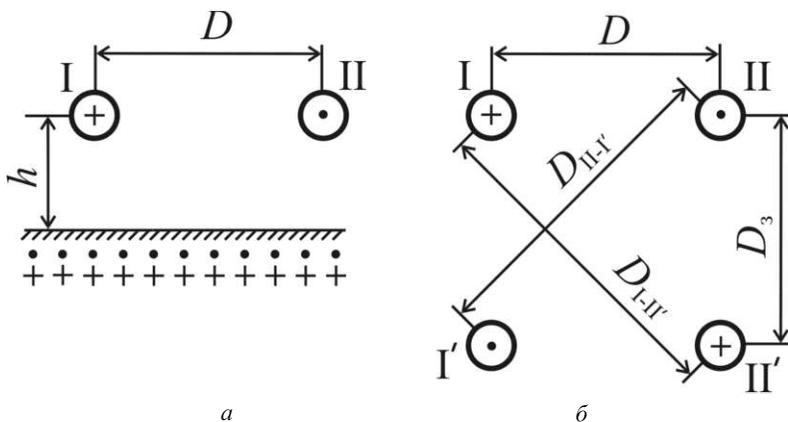


Рис. 10.8. Замена двухпроводной воздушной линии (а) двумя фиктивными двухпроводными линиями (б)

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 (10.22), и искомого сопротивления взаимной индукции  $\underline{Z}_M$  от соседней линии II-II'. Поскольку токи линий I-I' и II-II' численно равны и противоположны по знаку, то  $\underline{Z} = \underline{Z}_3 - \underline{Z}_M$ , откуда

$$\underline{Z}_M = \underline{Z}_3 - \underline{Z}. \quad (10.23)$$

Используя (10.22) и (10.16а), найдем

$$\underline{Z}_M = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D}. \quad (10.24)$$

Таким образом, сопротивление взаимоиндукции состоит из активного сопротивления земли и индуктивного сопротивления, соответствующего магнитному потоку взаимоиндукции между контурами. Наличие активной составляющей в сопротивлении взаимоиндукции объясняется сцеплением полного земного магнитного потока, обусловленного, например, током провода I с проводом II.

У трехфазной линии передачи 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. 10.9). Чтобы в этих условиях упростить учет взаимоиндукции проводников трехпроводных воздушных линий, вводят понятие среднего сопротивления взаимоиндукции любой пары проводников.

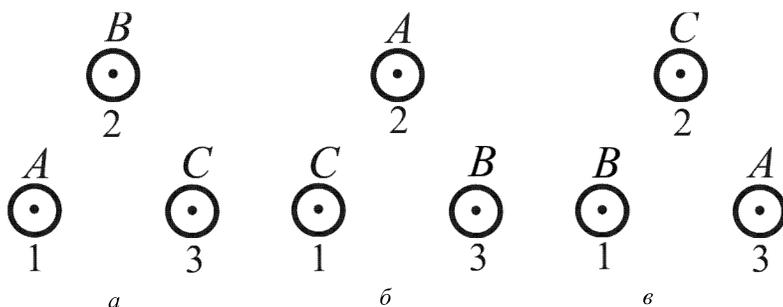


Рис. 10.9. Изменение положения проводов разных фаз при транспозиции

По аналогии с двухпроводной трехпроводную воздушную линию можно заменить тремя линиями провод – земля. Это допустимо не только в случае равенства нулю геометрической суммы фазных токов, но и в случае неравенства нулю этой суммы. В первом случае обратные токи в земле друг друга компенсируют, а во втором – геометрическая сумма этих токов определяет действительный обратный ток. Заменяя затем каждую линию провод – земля двухпроводной линией с расстоянием  $D_3$  между действительным и соответствующим фиктивным проводами, приходим к выводу, что трехпроводная линия эквивалентна трем двухпроводным линиям.

Среднее сопротивление взаимоиндукции любой пары проводов можно найти как среднее арифметическое из трех значений взаимоиндукции, определяемых тремя относительными положениями проводов рассматриваемых двух фаз. Поэтому в соответствии с рис. 10.9 и выражением (10.24) имеем

$$Z_{\text{м}} = \frac{1}{3} \left[ \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{12}} \right) + \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{23}} \right) + \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{31}} \right) \right] =$$

$$= \frac{1}{3} \left( 0,15 + j0,145 \lg \frac{D_3^3}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right) = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}}, \quad (10.25)$$

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

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}, \quad (10.26)$$

получим

$$\underline{Z}_{\text{м}} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}}. \quad (10.27)$$

Из (10.27) и (10.24) следует, 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.

## 10.6. 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 (10.22) и (10.27). 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:

$$\Delta \dot{U}_0 = \dot{I}_0 \underline{Z}_3 + \dot{I}_0 \underline{Z}_{\text{м}} + \dot{I}_0 \underline{Z}_{\text{м}} = \dot{I}_0 \left( \underline{Z}_3 + 2 \underline{Z}_{\text{м}} \right), \quad (10.28)$$

откуда

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_3 + 2 \underline{Z}_{\text{м}} \quad (10.29)$$

или

$$\begin{aligned} \underline{Z}_0 &= R_{\Pi} + 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк}}} + 2 \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} \right) = \\ &= R_{\Pi} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ср}}}, \end{aligned} \quad (10.30)$$

где  $r_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_{\text{эк}} D_{\text{ср}}^2}$  – средний геометрический радиус системы из трех проводов линии.

Из (10.28) 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  $\dot{I}_{A1} = 1$ ,  $\dot{I}_{B1} = a^2$  и  $\dot{I}_{C1} = a$  имеем

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \underline{Z}_3 \dot{I}_{A1} + \underline{Z}_M \dot{I}_{B1} + \underline{Z}_M \dot{I}_{C1} = \\ &= \underline{Z}_3 + a^2 \underline{Z}_M + a \underline{Z}_M = \underline{Z}_3 - \underline{Z}_M = \underline{Z}_1 \end{aligned} \quad (10.31)$$

или

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_{\Pi} + 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк}}} - 0,05 - j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} = \\ &= R_{\Pi} + j0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_{\text{эк}}}. \end{aligned} \quad (10.32)$$

Сравнивая это выражение с (10.16а), 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. Это объясняется тем, что если токи трехфазной линии представляют

собой симметричную систему прямой последовательности, то ток любого провода и геометрическая сумма токов двух других проводов равны по модулю и противоположны по направлению, т.е. два других провода трехфазной линии передачи эквивалентны обратному проводу двухпроводной линии.

Из (10.29) и (10.31) следует, что сопротивление нулевой последовательности трехфазной воздушной линии значительно больше сопротивления прямой последовательности, так как в отличие от магнитных потоков взаимоиנדукции, вызванных токами прямой последовательности, магнитные потоки взаимоиנדукции, обусловленные токами нулевой последовательности, по фазе совпадают с магнитными потоками самоиנדукции, увеличивая индуктивное сопротивление проводов. В приближенных расчетах отношение индуктивных составляющих сопротивлений нулевой и прямой последовательностей одноцепных трехфазных воздушных линий без заземленных молниезащитных тросов обычно принимают равным 3,5.

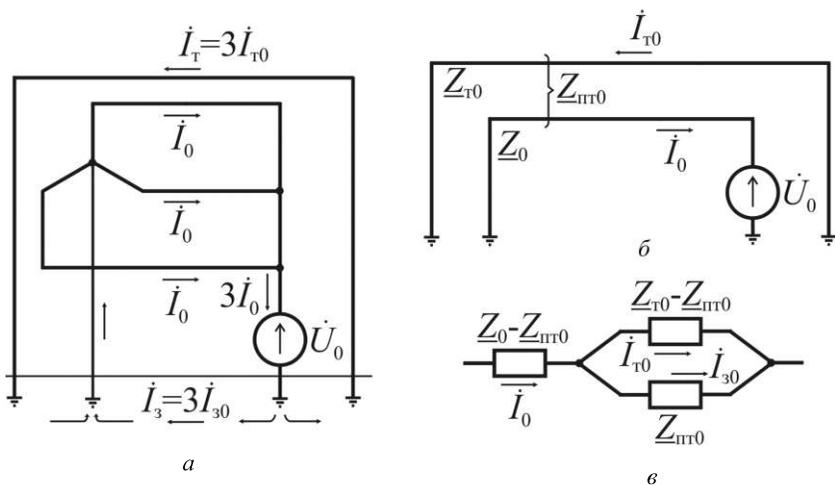
### **10.7. Сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной воздушной линии электропередачи с заземленными молниезащитными тросами**

На воздушных линиях электропередачи напряжением 110 кВ с металлическими и железобетонными опорами и выше в качестве средств молниезащиты применяют тросы, подвешивая их над проводами. В настоящее время тросы изолируют от опор и делят на отдельные участки. С одного конца каждого участка трос заземляют, а с другого оставляют искровой промежуток, который пробивается только при перенапряжениях. При таком выполнении тросы не влияют на сопротивление нулевой последовательности линии. Однако до недавнего времени молниезащитные тросы заземляли на каждой опоре, причем значительная часть линий имеет такое выполнение. 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. 10.10,а), т.е.  $\dot{I}_0 = \dot{I}_{30} + \dot{I}_{10}$ .

Но в месте замыкания на землю ток равен утроенному току нулевой последовательности. Поэтому токи в тросе и в земле составляют

соответственно  $\dot{I}_T = 3\dot{I}_{10}$  и  $\dot{I}_3 = 3\dot{I}_{30}$ .



**Рис. 10.10. Одноцепная воздушная линия с заземленным тросом:**  
*а* – исходная схема; *б* – однолинейная схема с электромагнитной связью;  
*в* – схема замещения нулевой последовательности

Трос можно рассматривать как провод независимой однопроводной линии с возвратом тока по земле. Поэтому его сопротивление согласно (10.22)

$$\underline{Z}_{\text{т}} = R_{\text{т}} + j0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк т}}}, \quad (10.33)$$

где  $R_{\text{т}}$  – активное сопротивление троса;  $r_{\text{эк т}}$  – эквивалентный радиус троса.

При токе в тросе  $\dot{I}_{\text{т}} = 3 \dot{I}_{\text{т}0}$  падение напряжения на участке длиной 1 км составляет

$$\Delta \dot{U}_{\text{т}0} = 3 \dot{I}_{\text{т}0} \underline{Z}_{\text{т}} = \dot{I}_{\text{т}0} (3 \underline{Z}_{\text{т}}), \quad (10.34)$$

поэтому сопротивление нулевой последовательности троса

$$\underline{Z}_{\text{т}0} = 3 \underline{Z}_{\text{т}} = 3R_{\text{т}} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{r_{\text{эк т}}}. \quad (10.35)$$

Сопротивление взаимной индукции между проводом любой фазы и тросом, учитывая транспозицию проводов линии, можно определить как среднее арифметическое из сопротивлений взаимной индукции, получаемых при различных положениях провода этой фазы относительно троса, т.е.

$$\underline{Z}_{\text{п-т}} = \frac{1}{3} \left( \underline{Z}_{1\text{т}} + \underline{Z}_{2\text{т}} + \underline{Z}_{3\text{т}} \right).$$

С учетом (10.24)

$$\underline{Z}_{\text{п-т}} = \frac{1}{3} \left( 0,15 + j3 \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{1\text{т}} D_{2\text{т}} D_{3\text{т}}}} \right) = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{п-т}}}, \quad (10.36)$$

где  $D_{\text{п-т}} = \sqrt[3]{D_{1\text{т}} D_{2\text{т}} D_{3\text{т}}}$  – среднее геометрическое расстояние между проводами линии и тросом.

Падение напряжения в тросе от токов нулевой последовательности проводов линии

$$\Delta \dot{U}_{\text{т}0} = \underline{Z}_{\text{п-т}} \dot{I}_0 + \underline{Z}_{\text{п-т}} \dot{I}_0 + \underline{Z}_{\text{п-т}} \dot{I}_0 = (3 \underline{Z}_{\text{п-т}}) \dot{I}_0, \quad (10.37)$$

поэтому сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности между проводами линии и тросом

$$\underline{Z}_{\text{п-т}0} = 3 \underline{Z}_{\text{п-т}} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{\text{п-т}}}. \quad (10.38)$$

Чтобы определить эквивалентное сопротивление нулевой последовательности линии с учетом заземленного троса, необходимо от схемы с электромагнитной связью (рис. 10.10,б) перейти к схеме замещения. В соответствии с рис. 10.10,б падение напряжения в проводе (на единицу длины)

$$\Delta \dot{U}_0 = \underline{Z}_0 \dot{I}_0 - \underline{Z}_{\text{п-т}0} \dot{I}_{\text{т}0}, \quad (10.39)$$

а разность потенциалов между двумя любыми точками вдоль троса, у которого концы заземлены, равна нулю

$$\underline{Z}_{\text{т}0} \dot{I}_{\text{т}0} - \underline{Z}_{\text{п-т}0} \dot{I}_0 = 0. \quad (10.40)$$

Из (10.40) следует

$$\dot{I}_{\text{т}0} = \frac{\underline{Z}_{\text{п-т}0}}{\underline{Z}_{\text{т}0}} \dot{I}_0. \quad (10.41)$$

Подставив это выражение в (10.39), получим

$$\Delta \dot{U}_0 = \left( \underline{Z}_0 - \frac{\underline{Z}_{\text{п-т}0}^2}{\underline{Z}_{\text{т}0}} \right) \dot{I}_0,$$

откуда искомое сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи с учетом заземленного троса

$$\underline{Z}_0^{(\tau)} = \underline{Z}_0 - \frac{\underline{Z}_{\text{п-т0}}^2}{\underline{Z}_{\text{т0}}}, \quad (10.42)$$

где  $(\tau)$  в верхнем индексе означает учет заземленного троса.

Это выражение показывает, что заземленные тросы снижают сопротивление нулевой последовательности воздушных линий электропередачи. Если в (10.42)  $\underline{Z}_0$  и  $\underline{Z}_{\text{т0}}$  представить соответственно

как  $\left(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_{\text{п-т0}}\right) + \underline{Z}_{\text{п-т0}}$  и  $\left(\underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}}\right) + \underline{Z}_{\text{п-т0}}$ , то после некоторых преобразований это выражение принимает вид:

$$\underline{Z}_0^{(\tau)} = \underline{Z}_0 - \underline{Z}_{\text{п-т0}} + \frac{\left(\underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}}\right) \underline{Z}_{\text{п-т0}}}{\left(\underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}}\right) + \underline{Z}_{\text{п-т0}}}. \quad (10.43)$$

Полученному выражению соответствует схема замещения, представленная на рис. 10.10,в. Ветвь с сопротивлением  $\underline{Z}_{\text{п-т0}}$  отделяет часть тока нулевой последовательности, замыкающегося по земле, а ветвь с сопротивлением  $\underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}}$  — часть тока, замыкающегося по тросу. Сопротивления  $\underline{Z}_0 - \underline{Z}_{\text{п-т0}}$  и  $\underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}}$  представляют собой суммы активных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния соответственно провода и троса, поэтому их условно называют полными сопротивлениями рассеяния нулевой последовательности провода и троса. Эти сопротивления составляют

$$\underline{Z}_{\sigma 0} = \underline{Z}_0 - \underline{Z}_{\text{п-т0}} = R_{\text{п}} + j0,4351g \frac{D_{\text{п-т}}}{r_{\text{ср}}}; \quad (10.44)$$

$$\underline{Z}_{\sigma \text{т0}} = \underline{Z}_{\text{т0}} - \underline{Z}_{\text{п-т0}} = 3R_{\text{т}} + j0,4351g \frac{D_{\text{п-т}}}{r_{\text{жт}}}. \quad (10.45)$$

Из схемы замещения линии с тросом (рис. 10.10,в) и выражения (10.45) видно, что уменьшение сопротивления нулевой последовательности воздушной линии электропередачи, обусловленное заземленным тросом, тем значительнее, чем меньше активное сопротивление троса и 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 индуктивных составляющих сопротивлений нулевой и прямой последовательностей: отношения для линий со стальными тросами, заземленными на каждой опоре,  $X_0/X_1 = 3$ , а с тросами, выполненными из хорошо проводящих материалов,  $X_0/X_1 = 2$ .

Если воздушная линия имеет два заземленных троса, то расчет сопротивления нулевой последовательности линии аналогичен расчету при одном тросе. Только систему из двух тросов заменяют одним эквивалентным тросом, имеющим вдвое меньшее активное сопротивление и средний геометрический радиус

$$r_{\text{ср т}} = \sqrt{r_{\text{эк т}} D_{\text{т}}},$$

где  $D_{\text{т}}$  – расстояние между тросами.

При этом формула (10.35) принимает вид:

$$\underline{Z}_{\text{т0}} = \frac{3}{2} R_{\text{т}} + j0,435 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ср т}}}, \quad (10.46)$$

где  $R_{\text{т}}$  – активное сопротивление одного троса.

Увеличение радиуса от эквивалентного  $r_{\text{эк т}}$  до среднего геометрического  $r_{\text{ср т}}$  и соответственно меньшее значение индуктивной составляющей сопротивления нулевой последовательности системы из двух тросов по сравнению с ее значением при одном тросе объясняется тем, что в случае двух тросов магнитный поток, созданный током одного из тросов, не полностью сцеплен с другим тросом. Таким образом, как активная, так и индуктивная составляющие сопротивления нулевой последовательности системы из нескольких тросов меньше, чем единственного троса.

Формула (10.38) применима и для определения сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности между проводами линии и системой из двух тросов, только в этом случае под  $D_{\text{п-т}}$  следует понимать среднее геометрическое расстояние между системой проводов линии и системой из двух тросов, которое определяют по формуле

$$D_{\text{п-т}} = \sqrt[6]{D_{1\text{т1}} D_{2\text{т1}} D_{3\text{т1}} D_{1\text{т2}} D_{2\text{т2}} D_{3\text{т2}}}, \quad (10.47)$$

где  $D_{1\text{т1}}$  – расстояние между первым проводом и первым тросом,  $D_{2\text{т1}}$  – расстояние между вторым проводом и первым тросом и т.д.

Найденные по (10.38) и (10.46) значения  $\underline{Z}_{\text{п-т0}}$  и  $\underline{Z}_{\text{т0}}$  позволяют, используя (10.42), определить сопротивление нулевой последовательности линии с учетом влияния системы из двух тросов. Поскольку активная и индуктивная составляющие сопротивления нулевой последовательности системы из двух тросов меньше, чем од-

ного троса, то при наличии двух тросов увеличивается доля тока нулевой последовательности, возвращающегося по тросу, и уменьшается доля тока, возвращающегося по земле, вследствие чего уменьшается результирующее сопротивление нулевой последовательности воздушной линии.

## 10.8. 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 взаимоиנדукции между цепями. Влияние взаимоиנדукции 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 взаимоиנדукции параллельной цепи не превышает 10%.

Среднее сопротивление взаимоиנדукции между двумя проводами одноименной фазы разных цепей, учитывая транспозицию проводов обеих цепей, можно определить как среднее арифметическое из девяти значений сопротивления взаимоиנדукции, определяемых возможными относительными положениями проводов рассматриваемой фазы разных цепей. Поэтому в соответствии с (10.24)

$$\begin{aligned} Z_{1-II} &= \frac{1}{9} \left[ \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{11'}} \right) + \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{12'}} \right) + \dots \right] = \\ &= 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{1-II}}, \end{aligned} \quad (10.48)$$

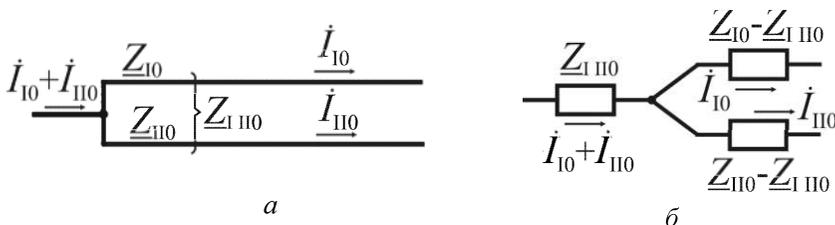
где  $D_{1-II} = \sqrt[9]{D_{11'} D_{12'} D_{13'} D_{21'} D_{22'} D_{23'} D_{31'} D_{32'} D_{33'}}$  – среднее геометрическое расстояние между цепями I и II.

Сопротивление взаимоиנדукции 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, равных 1 А, поэтому

$$\underline{Z}_{I-II0} = 3\underline{Z}_{I-II} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{D_{I-II}}. \quad (10.49)$$

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. 10.11,а) и имеют неодинаковые сопротивления нулевой последовательности  $\underline{Z}_{I0}$  и  $\underline{Z}_{II0}$ . Эти сопротивления определяются по формуле (10.30), а сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности  $\underline{Z}_{I-II0}$  — по формуле (10.49).



**Рис. 10.11. 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

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= \underline{Z}_{I0} \dot{I}_{I0} + \underline{Z}_{I-II0} \dot{I}_{II0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= \underline{Z}_{II0} \dot{I}_{II0} + \underline{Z}_{I-II0} \dot{I}_{I0}. \end{aligned} \right\} \quad (10.50)$$

Эти выражения можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= \underline{Z}_{I-II0} (\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0}) + (\underline{Z}_{I0} - \underline{Z}_{I-II0}) \dot{I}_{I0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= \underline{Z}_{I-II0} (\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0}) + (\underline{Z}_{II0} - \underline{Z}_{I-II0}) \dot{I}_{II0}. \end{aligned} \right\} \quad (10.51)$$

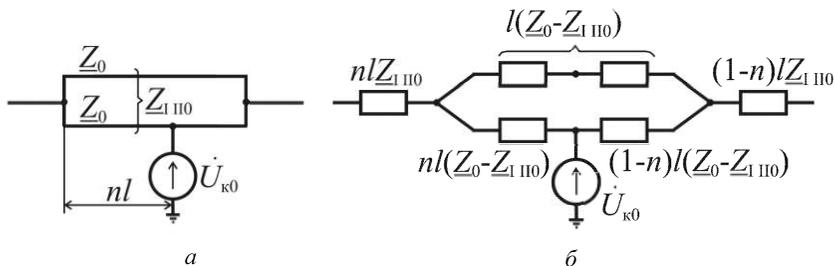
Полученным выражениям соответствует эквивалентная схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии, представленная на рис. 10.11,б. Сопротивления  $\underline{Z}_{I0} - \underline{Z}_{I-II0}$  и

$\underline{Z}_{\text{II}0} - \underline{Z}_{\text{I-III}0}$  обусловлены магнитными потоками, созданными соответственно токами  $\dot{I}_{\text{I}0}$  и  $\dot{I}_{\text{II}0}$  и сцепленными только с проводами своей цепи. Таким образом, эти магнитные потоки являются потоками рассеяния нулевой последовательности каждой из цепей по отношению к другой. С другой стороны, в сопротивления  $\underline{Z}_{\text{I}0} - \underline{Z}_{\text{I-III}0}$  и  $\underline{Z}_{\text{II}0} - \underline{Z}_{\text{I-III}0}$  входят активные сопротивления проводов каждой из цепей, так как в соответствии с (10.30) и (10.49)

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{\text{I}0} - \underline{Z}_{\text{I-III}0} &= R_{\text{нI}} + j0,435lg \frac{D_{\text{I-II}}}{r_{\text{срI}}}; \\ \underline{Z}_{\text{II}0} - \underline{Z}_{\text{I-III}0} &= R_{\text{нII}} + j0,435lg \frac{D_{\text{I-II}}}{r_{\text{срII}}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.52)$$

Поэтому эти сопротивления обычно называют полными сопротивлениями рассеяния нулевой последовательности цепей I и II.

Если цепи I и II идентичны, т.е.  $\underline{Z}_{\text{I}0} = \underline{Z}_{\text{II}0} = \underline{Z}_0$  и соединены между собой на обоих концах, а расчетная точка короткого замыкания находится на одной из цепей (рис. 10.12,а), то участки этой двухцепной линии, находящиеся с разных сторон от точки короткого замыкания, можно представить схемами замещения, аналогичными схеме на рис. 10.11,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. 10.12,б, где  $n$  – относительная длина части линии, находящейся слева от точки короткого замыкания.



**Рис. 10.12. Двухцепная воздушная линия при коротком замыкании на одной из ее цепей:**  
 а – однолинейная схема с электромагнитной связью;  
 б – схема замещения нулевой последовательности

А в тех случаях, когда короткое замыкание происходит вне линии, результирующее сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии (т.е. сопротивление проводов одноименной фазы двух параллельных цепей) равно:

$$\underline{Z}''_0 = \underline{Z}_{I-II0} + 0,5 \left( \underline{Z}_0 - \underline{Z}_{I-II0} \right) = 0,5 \left( \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{I-II0} \right)$$

и сопротивление нулевой последовательности одной цепи с учетом влияния другой

$$\underline{Z}'_0 = \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{I-II0}. \quad (10.53)$$

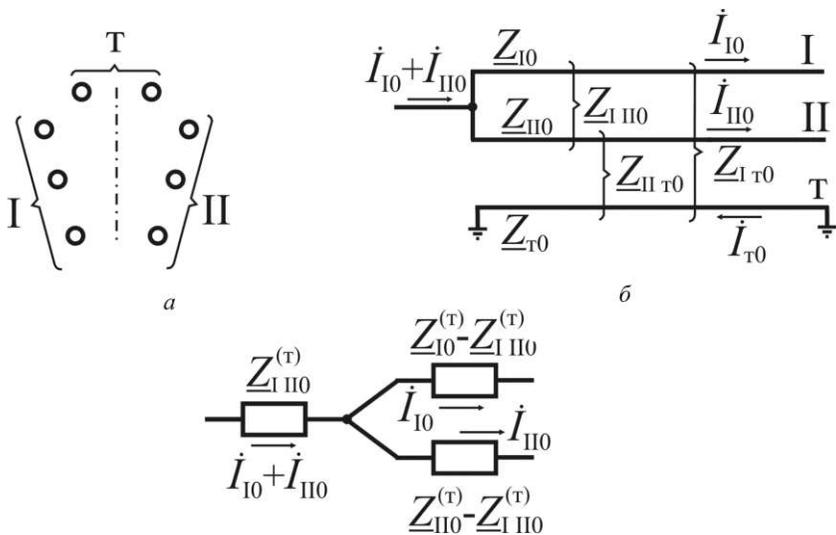
В приближенных расчетах несимметричных режимов отношение индуктивных составляющих сопротивлений нулевой и прямой последовательностей двухцепных линий без заземленных тросов обычно принимают равным  $X_0/X_1 = 5,5$ .

## 10.9. 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. 10.13,а). Используя полученные выше формулы, можно определить сопротивления нулевой последовательности отдельных систем, т.е.  $\underline{Z}_{I0}$ ,  $\underline{Z}_{II0}$  и  $\underline{Z}_{T0}$ , а также сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности между проводами каждой пары систем, т.е.  $\underline{Z}_{I-II0}$ ,  $\underline{Z}_{I-T0}$  и  $\underline{Z}_{II-T0}$ .

При показанных на рис. 10.13,б положительных направлениях токов нулевой последовательности в проводах разных цепей и тросах имеем

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= \underline{Z}_{I0} \dot{I}_{I0} + \underline{Z}_{I-II0} \dot{I}_{II0} - \underline{Z}_{I-T0} \dot{I}_{T0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= \underline{Z}_{II0} \dot{I}_{II0} + \underline{Z}_{I-II0} \dot{I}_{I0} - \underline{Z}_{II-T0} \dot{I}_{T0}; \\ 0 &= \underline{Z}_{T0} \dot{I}_{T0} - \underline{Z}_{I-T0} \dot{I}_{I0} - \underline{Z}_{II-T0} \dot{I}_{II0}. \end{aligned} \right\} \quad (10.54)$$



**Рис. 10.13. Двухцепная воздушная линия с заземленными тросами:**

*a* – 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  $\dot{I}_{T0}$ , то получим

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I0} &= \underline{Z}_{I0}^{(r)} \dot{I}_{I0} + \underline{Z}_{I-II0}^{(r)} \dot{I}_{II0}; \\ \Delta \dot{U}_{II0} &= \underline{Z}_{II0}^{(r)} \dot{I}_{II0} + \underline{Z}_{I-II0}^{(r)} \dot{I}_{I0}, \end{aligned} \right\} \quad (10.55)$$

где  $\underline{Z}_{I0}^{(r)} = \underline{Z}_{I0} - \frac{Z_{I-T0}^2}{Z_{T0}}$  – сопротивление нулевой последовательности

цепи I с учетом влияния системы тросов;

$\underline{Z}_{II0}^{(r)} = \underline{Z}_{II0} - \frac{Z_{II-T0}^2}{Z_{T0}}$  – сопротивление нулевой последовательности

цепи II с учетом влияния системы тросов;

$$\underline{Z}_{I-II0}^{(r)} = \underline{Z}_{I-II0} - \frac{\underline{Z}_{I-r0} \underline{Z}_{II-r0}}{\underline{Z}_{r0}} - \text{сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности одной цепи от другой с учетом влияния системы тросов.}$$

Уравнения (10.55) аналогичны уравнениям (10.50) для двухцепной линии без тросов. Поэтому схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии с тросами (рис. 10.13,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, т.е.  $\underline{Z}_{I0} = \underline{Z}_{II0} = \underline{Z}_0$  и  $\underline{Z}_{I-r0} = \underline{Z}_{II-r0} = \underline{Z}_{p-r0}$ , причем эти цепи соединены между собой по обоим концам линии, а короткое замыкание происходит вне линии, то результирующее сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии с тросами составляет

Если обе цепи одинаковы, т.е.  $\underline{Z}_{I0} = \underline{Z}_{II0} = \underline{Z}_0$  и

$\underline{Z}_{I-r0} = \underline{Z}_{II-r0} = \underline{Z}_{p-r0}$ , причем эти цепи соединены между собой по обоим концам линии, а короткое замыкание происходит вне линии, то результирующее сопротивление нулевой последовательности двухцепной линии с тросами составляет

$$\underline{Z}'_0{}^{(r)} = \underline{Z}_{I-II0}^{(r)} + 0,5 \left( \underline{Z}'_0{}^{(r)} - \underline{Z}_{I-II0}^{(r)} \right) = 0,5 \left( \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{I-II0} - 2 \frac{\underline{Z}_{p-r0}^2}{\underline{Z}_{r0}} \right) \quad (10.56)$$

и сопротивление нулевой последовательности каждой из цепей такой линии

$$\underline{Z}'_0{}^{(r)} = \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{I-II0} - 2 \frac{\underline{Z}_{p-r0}^2}{\underline{Z}_{r0}}. \quad (10.57)$$

В приближенных расчетах отношение индуктивных составляющих 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  $X_0/X_1 \approx 3$ .

## 10.10. 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 (10.30). При этом средний геометрический радиус системы из трех жил кабеля определяют по формуле

$$r_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_{\text{жк}} d^2}, \quad (10.58)$$

где  $r_{\text{жк}}$  – 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 (10.38), сопротивление взаимоиנדукции нулевой последовательности между жилами и оболочкой кабеля

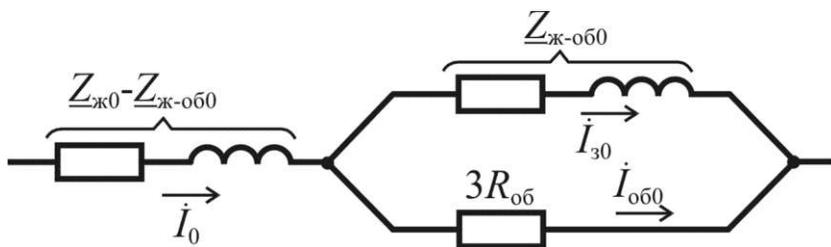
$$Z_{\text{ж-об}0} = 0,15 + j0,435 \lg \frac{2D_{\text{ж-об}}}{r_{\text{вт}} + r_{\text{вн}}}. \quad (10.59)$$

В отличие от троса воздушной линии оболочка кабеля охватывает его жилы. При этом магнитный поток, создаваемый токами оболочки, целиком является потоком взаимоиנדукции. Поэтому индуктивная составляющая сопротивления самоиндукции нулевой последовательности оболочки и индуктивная составляющая сопротивления взаимоиנדукции 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 соотношением 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 эквивалентная схема замещения нулевой последовательности кабеля, представленная на рис. 10.14. Она отличается от схемы замещения нулевой последовательности воздушной линии с заземленным тросом лишь тем, что ветвь, соответствующая оболочке, не содержит индуктивного сопротивления (поскольку оболочка кабеля не имеет рассеяния). Сопротивление ветви, соответствующей жиле кабеля, составляет

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{ж}0} - \underline{Z}_{\text{ж-об}0} &= R_{\text{ж}} + jX_{\sigma 0} = R_{\text{ж}} + j0,435 \lg \frac{D_3}{r_{\text{ср}}} - \\ - j0,435 \lg \frac{2D_3}{r_{\text{вт}} + r_{\text{вш}}} &= R_{\text{ж}} + j0,435 \lg \frac{r_{\text{вт}} + r_{\text{вш}}}{2r_{\text{ср}}}. \end{aligned} \quad (10.60)$$



**Рис. 10.14.** Схема замещения нулевой последовательности трехжильного кабеля

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 ОДИННАДЦАТАЯ

---

---

# СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРЯМОЙ, ОБРАТНОЙ И НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

---

---

### 11.1. Общие замечания

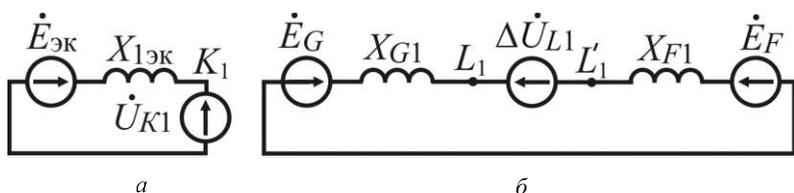
Для расчета различных несимметричных режимов с использованием метода симметричных составляющих предварительно по исходной расчетной схеме должны быть составлены в общем случае схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Необходимость этих схем определяется тем, что ток прямой последовательности, 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 в соответствии с п. 2.3 составляют или в именованных единицах с приведением параметров всех элементов исходной расчетной схемы к основной ступени напряжения, или в относительных единицах при предварительно выбранных базисных единицах.

### 11.2. 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 вводят 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 короткого замыкания 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. 11.1,а, на котором изображена схема замещения прямой последовательности в преобразованном виде).

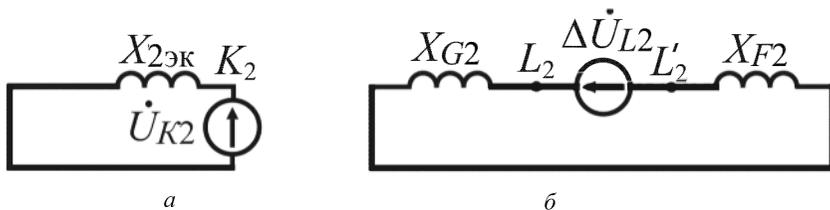


**Рис. 11.1. Схемы замещения прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании (а) и при продольной несимметрии (б)**

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. 11.1,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 противо-ЭДС, 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 в п. 9.1, условно можно принять равными нулю и учитывать их в виде взятых с обратным знаком падений напряжения от тока обратной последовательности в сопротивлении обратной последовательности соответствующего источника энергии, которое считают неизменным и не зависящим от вида несимметрии и продолжительности переходного процесса. Принятое ранее допущение о том, что ЭДС обратной (нулевой) последовательности синхронной машины при несимметричном повреждении равно нулю равносильно допущению, что ток обратной (нулевой) последовательности при таком повреждении является следствием возникшего в месте повреждения напряжения обратно (нулевой) последовательности. Поэтому в схему замещения обратной последовательности при несимметричном коротком замыкании вводят напряжение обратной последовательности в месте короткого замыкания  $\dot{U}_{K2}$  (см. рис. 11.2,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. 11.2,б). Аналогично в схему замещения нулевой последовательности при несимметричном коротком замыкании вводят напряжение  $\dot{U}_{K0}$ , а в схему замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии вводят  $\Delta\dot{U}_{L0}$ .



**Рис. 11.2.** 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 схе-

мы замещения обратной последовательности, как и других ее точек, как показано в гл. 12 – 14, 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. 11.1,б и 11.2,б), между которыми имеется разность потенциалов соответственно  $\Delta\dot{U}_{L1}$  и  $\Delta\dot{U}_{L2}$ .

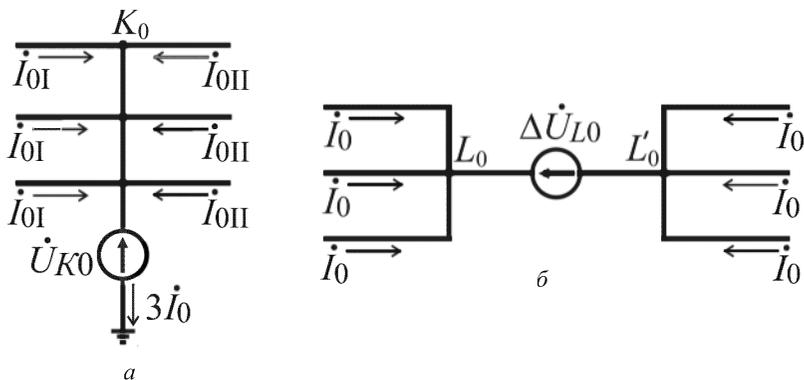
За положительное направление токов прямой и обратной последовательностей при несимметричном коротком замыкании принимают направление от начала к концу схемы замещения, а при продольной несимметрии за положительное направление токов обычно принимают направление от той части схемы прямой последовательности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

### 11.3. 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 (см. п. 10.4). Поэтому методика составления схемы замещения нулевой последовательности имеет свои особенности и иногда оказывается довольно сложной.

*Схему 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 переключкой и землей включен источник напряжения  $\dot{U}_{K0}$  (см. рис. 11.3,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) включен источник напряжения  $\Delta\dot{U}_{L0}$  (см. рис. 11.3,б).



**Рис. 11.3. Концы схем замещения нулевой последовательности при несимметричном коротком замыкании (а) и при продольной несимметрии (б)**

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 схему соединения обмоток имеющихся трансформаторов и автотрансформаторов, определяют возможные замкнутые контуры для 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.

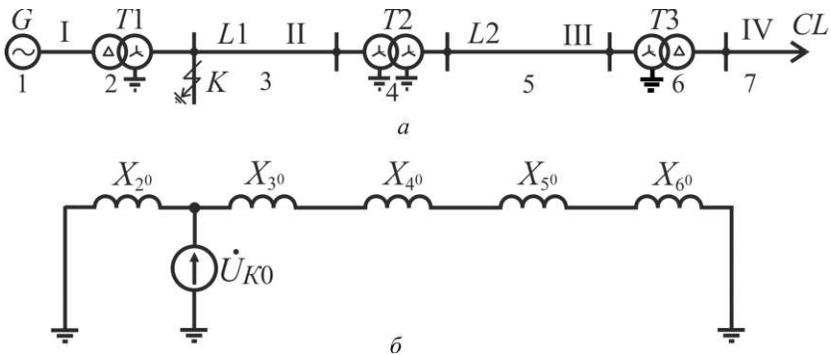
За начало схемы нулевой последовательности принимают соединенные между собой точки, в которых напряжение нулевой последовательности равно нулю (однако если при продольной несимметрии отсутствует возможность циркуляции тока нулевой последо-

вательности по земле, понятие о начале схемы нулевой последовательности теряет смысл).

При несимметричном коротком замыкании (однофазном или двухфазном 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. 11.4,а приведена простейшая исходная расчетная схема (на ней римскими цифрами обозначены разные ступени напряжения, а арабскими – порядковые номера элементов этой схемы) и ее схема замещения нулевой последовательности при коротком замыкании на землю в точке  $K$  (см. рис. 11.4,б, на котором цифровые индексы у сопротивлений соответствуют номерам элементов исходной расчетной схемы). Как видно из рис. 11.4,б, в схему замещения нулевой последовательности со стороны генератора входит 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. 11.4.** Исходная расчетная схема (а) и схема замещения нулевой последовательности при коротком замыкании на землю в точке  $K$  (б):  
1–7 – порядковые номера элементов; I, IV – ступени напряжения

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  $X_{0\text{эж}} = X_{20}$ .

В случае продольной несимметрии, исходя из схемы включения источника напряжения  $\Delta \dot{U}_{L0}$ , представленной на рис. 11.3,б, легко убедиться, что 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 примера на рис. 11.5,а приведена исходная расчетная схема, а на рис. 11.5,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

$$X_{0\text{эж}} = X_{20} + X_{30} + X_{40} + X_{50} // X_{60}.$$

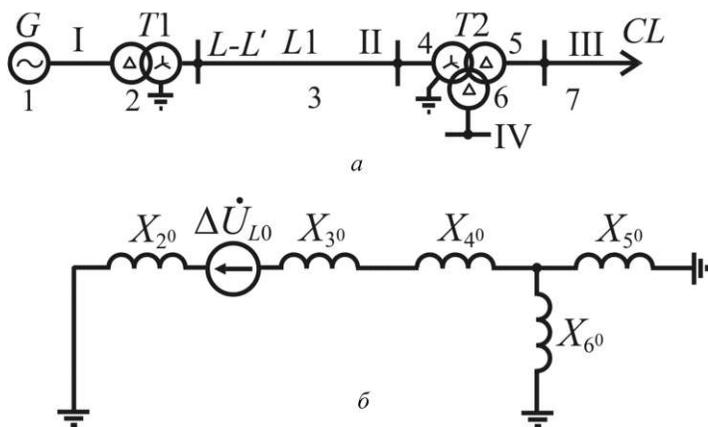


Рис. 11.5. Исходная расчетная схема (а) и схема замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии между точками  $L$  и  $L'$  (б)

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

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

В п. 11.2 и п. 11.3 уже отмечалось, что схемы замещения одноименной последовательности при поперечной и продольной несимметриях неодинаковы. Чтобы более полно выявить их отличия и неидентичность способов их преобразований рассмотрим конкретную расчетную схему, представленную на рис. 11.6,а, и допустим, что как расчетная точка несимметричного короткого замыкания  $K$ , так и расчетные точки  $L$  и  $L'$ , между которыми возникает продольная несимметрия, находятся в начале линии электропередачи  $LL$ .

В случае несимметричного короткого замыкания в точке  $K$  схема замещения прямой последовательности имеет вид, показанный на рис. 11.6,б. Для упрощения схемы сопротивления последовательно соединенных элементов обозначены так:  $X_{11} + X_{21} = X_{81}$ ;  $X_{41} + X_{31} = X_{91}$ ;

$X_{61} + X_{71} = X_{101}$ . Суммарное сопротивление всех элементов, входящих в схему замещения и расположенных справа от точки  $K$ , составляет  $X_{111} = X_{91} + X_{31} // X_{101}$ . Поэтому эквивалентное сопротивление прямой последовательности относительно точки  $K$  равно  $X_{1эк} = X_{81} // X_{111}$  и эквивалентная ЭДС

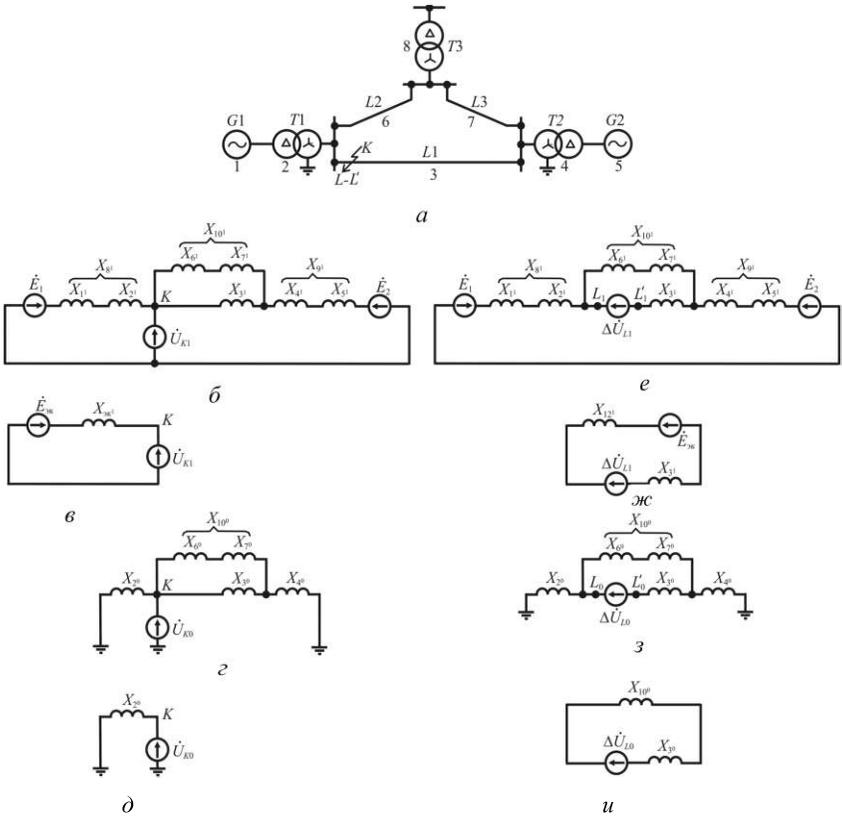
$E_{эк} = (E_1 X_{111} + E_2 X_{31}) / (X_{111} + X_{81})$ . Полученная схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 11.6,в.

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 они находятся за обмотками трансформаторов, соединенных в треугольник), а также трансформатора с незаземленной нейтралью (см. рис. 11.6,г) и легко преобразуется относительно  $U_{K0}$ . При этом

$$X_{0эк} = X_{20} // (X_{100} // X_{30} + X_{40}).$$

Если разземлить нейтраль трансформатора  $T2$ , то схема замещения будет содержать только трансформатор  $T1$ , т.е. эквивалентное сопротивление нулевой последовательности  $X_{0\text{ЭК}} = X_{2^0}$ , как показано на рис. 11.6,д.



**Рис. 11.6.** Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения прямой и нулевой последовательностей при поперечной (б – д) и продольной несимметриях (е – и): 1–10 – порядковые номера элементов

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  $L$  и  $L'$ , т.е. последовательно с линией электропередачи  $L3$ , имеющей сопротивление  $X_{31}$  (см. рис. 11.6,е). Вследствие этого схема замещения должна преобразоваться

зываются относительно  $\dot{U}_{L1}$ . Очевидно, элементы, имеющие сопротивления  $X_{1^1}, X_{2^1}, X_{3^1}, X_{4^1}, X_4$  и  $X_{5^1}$ , оказываются включенными последовательно, а ЭДС  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  направлены встречно (предполагается, что при коротком замыкании они совпадают по фазе), т.е.  $X_{8^1} + X_{9^1} = X_{11^1}$  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  $X_{10}$ . 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. 11.6,ж). Искомое эквивалентное сопротивление прямой последовательности равно  $X_{1_{\text{ж}}} = X_{3^1} + X_{12^1}$  (сравни с  $X_{1_{\text{эк}}}$  при несимметричном коротком замыкании).

Схема замещения обратной последовательности по своей структуре отличается от схемы, приведенной на рис. 11.6,е, лишь тем, что не содержит ЭДС источников энергии, поэтому преобразуется в эквивалентную схему относительно  $\dot{U}_{L2}$  подобным образом.

Схема замещения нулевой последовательности при продольной несимметрии представлена на рис. 11.6,з. Она отличается от аналогичной схемы замещения при поперечной несимметрии местом включения источника напряжения  $\dot{U}_{L0}$ , поэтому преобразуется иначе (относительно точек  $L_0 - I_0'$ ). 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  $L1$  и  $L2$ . Таким образом  $X_{12^0} = X_{10^0} // X_{11^0}$  и эквивалентное сопротивление нулевой последовательности равно  $X_{0_{\text{эк}}} = X_{3^0} + X_{12^0}$ .

Если разземлить нейтраль трансформатора  $T2$ , то «возврат» тока нулевой последовательности по земле оказывается невозможным и он будет циркулировать только по воздушным линиям электропередачи  $L1 - L2 - L3$ , т.е. эквивалентное сопротивление нулевой последовательности относительно места продольной несимметрии составит  $X_{0_{\text{эк}}} = X_{3^0} + X_{10^0}$  (см. рис. 11.6,и).

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

---

---

# НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ

---

---

### 12.1. Исходные положения

В трехфазных установках вероятность возникновения трехфазных коротких замыканий составляет несколько процентов. Значительно чаще происходят несимметричные короткие замыкания, причем в некоторых случаях токи несимметричных коротких замыканий существенно превышают токи трехфазного короткого замыкания. Поэтому при проверке электрических аппаратов и проводников на их стойкость при коротких замыканиях, а также при настройке устройств релейной защиты и автоматики часто приходится определять и токи несимметричных коротких замыканий, расчет которых имеет свои особенности.

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 принятого ранее допущения о том, 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 справедливы следующие уравнения:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{1\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}; \quad (12.1)$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA2}; \quad (12.2)$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - jX_{0\text{эк}} \dot{I}_{K0}, \quad (12.3)$$

где  $\dot{U}_{KA1}$ ,  $\dot{U}_{KA2}$  и  $\dot{U}_{K0}$  – соответственно напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы  $A$  в месте короткого замыкания;

$X_{1\text{эк}}$ ,  $X_{2\text{эк}}$  и  $X_{0\text{эк}}$  – эквивалентные сопротивления соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$\dot{E}_{\text{эк}}$  – эквивалентная ЭДС;

$\dot{I}_{KA1}$ ,  $\dot{I}_{KA2}$  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. 12.1). Токи воображаемого ответвления при коротком замыкании на нем и являются искомыми токами 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 искомым токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания.

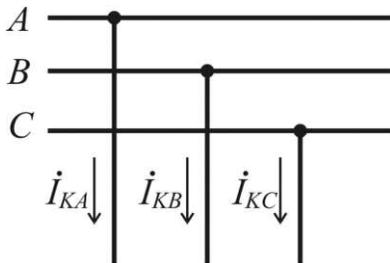


Рис. 12.1. Фиктивное ответвление в месте короткого замыкания

## 12.2. Двухфазное короткое замыкание

При двухфазном коротком замыкании (см. рис. 12.2) граничные условия таковы:

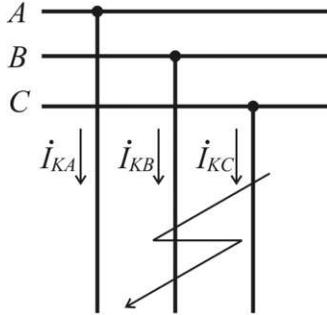


Рис. 12.2. Двухфазное короткое замыкание

1) ток неповрежденной (особой) фазы (фазы  $A$ ) равен нулю

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (12.4)$$

2) сумма токов поврежденных фаз в месте короткого замыкания равна нулю

$$\dot{I}_{KB} + \dot{I}_{KC} = 0; \quad (12.5)$$

3) напряжения поврежденных фаз в месте короткого замыкания одинаковы

$$\dot{U}_{KB} = \dot{U}_{KC}. \quad (12.6)$$

Как известно

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

но, учитывая (12.4) и (12.5), получаем:

$$\dot{I}_{K0} = 0. \quad (12.7)$$

Условие (12.4) можно представить так:

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

откуда следует, что

$$\dot{I}_{KA1} = -\dot{I}_{KA2}. \quad (12.8)$$

Выразим условие (12.6) через симметричные составляющие 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:

$$a = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{j-120} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким образом

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

или

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2}. \quad (12.9)$$

Последнее равенство позволяет приравнять правые части уравнений (12.1) и (12.2):

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

Учитывая (12.8), получим следующее выражение для тока прямой последовательности особой фазы при двухфазном коротком замыкании:

$$\dot{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}})}. \quad (12.10)$$

Зная ток  $\dot{I}_{KA1}$  и учитывая (12.8) и (12.9), из уравнения (12.2) легко найти напряжения прямой и обратной последовательностей фазы  $A$  в месте короткого замыкания:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.9a)$$

Таким образом напряжение неповрежденной фазы в месте короткого замыкания

$$\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} = 2jX_{2\text{ЭК}} \dot{I}_{KA1}, \quad (12.11)$$

а напряжения поврежденных фаз

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KB} &= a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} = (a^2 + a) \dot{U}_{KA1} = -\dot{U}_{KA1} = \\ &= -0,5 \dot{U}_{KA} = -jX_{2\text{эк}} \dot{I}_{KA1} \end{aligned} \quad (12.12)$$

и

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KC} &= a \dot{U}_{KA1} + a^2 \dot{U}_{KA2} = (a + a^2) \dot{U}_{KA1} = -\dot{U}_{KA1} = \\ &= -0,5 \dot{U}_{KA} = -jX_{2\text{эк}} \dot{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (12.13)$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания, выраженные через ток прямой последовательности особой фазы, в соответствии с (12.8)

$$\dot{I}_{KB} = a^2 \dot{I}_{KA1} + a \dot{I}_{KA2} = (a^2 - a) \dot{I}_{KA1} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{KA1} \quad (12.14)$$

и

$$\dot{I}_{KC} = a \dot{I}_{KA1} + a^2 \dot{I}_{KA2} = (a - a^2) \dot{I}_{KA1} = j\sqrt{3} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.15)$$

Выражения (12.9) и (12.8) позволяют построить векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного короткого замыкания. Такие диаграммы представлены на рис. 12.3.

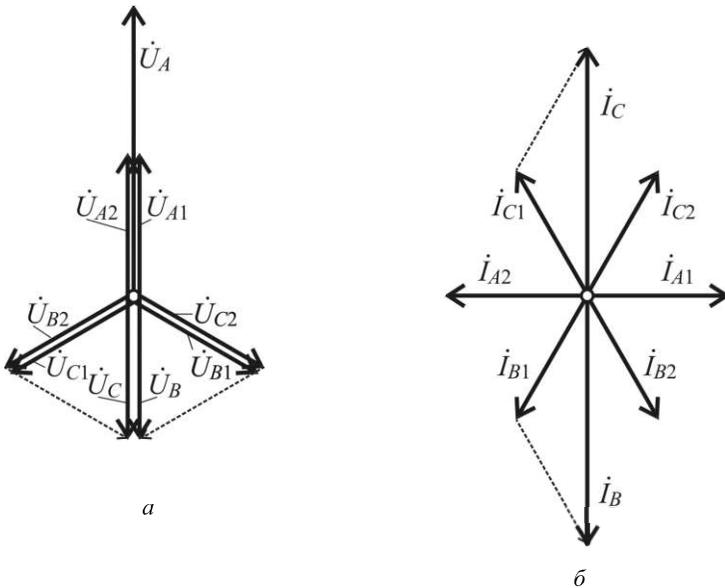


Рис. 12.3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном коротком замыкании

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. 12.4.

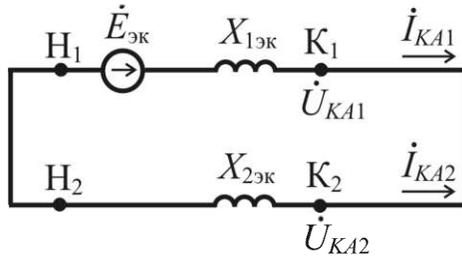


Рис. 12.4. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании

### 12.3. Однофазное короткое замыкание

При однофазном коротком замыкании (см. рис. 12.5) граничные условия таковы:

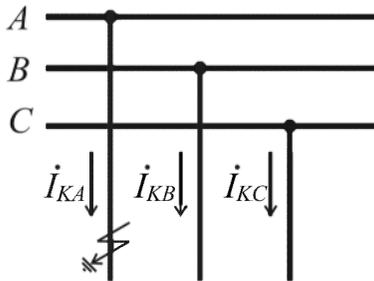


Рис. 12.5. Однофазное короткое замыкание

1) напряжение поврежденной фазы в месте короткого замыкания равно нулю

$$\dot{U}_{KA} = 0; \quad (12.16)$$

2) ток неповрежденной фазы  $B$  в месте короткого замыкания равен нулю

$$\dot{I}_{KB} = 0; \quad (12.17)$$

3) ток неповрежденной фазы  $C$  в месте короткого замыкания равен нулю

$$\dot{I}_{KC} = 0. \quad (12.18)$$

Условие (12.16), выраженное через симметричные составляющие напряжения особой фазы, имеет вид:

$$\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0. \quad (12.19)$$

Используя известные формулы для определения симметричных составляющих тока фазы  $A$  по полным токам разных фаз и учитывая (12.17) и (12.18), найдем:

$$\dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{KA}. \quad (12.20)$$

В соответствии с (12.19) при однофазном коротком замыкании сумма правых частей уравнений (12.1) – (12.3) равна нулю, т.е.

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

Если учесть (12.20), то получим:

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

откуда ток прямой последовательности поврежденной фазы

$$\dot{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})}. \quad (12.21)$$

Полный ток поврежденной фазы в соответствии с (12.20) составляет

$$\dot{I}_{KA} = 3 \dot{I}_{KA1}. \quad (12.22)$$

Напряжения обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания определяют по формулам (12.2) и (12.3), а напряжение прямой последовательности, учитывая (12.19) и (12.20), равно

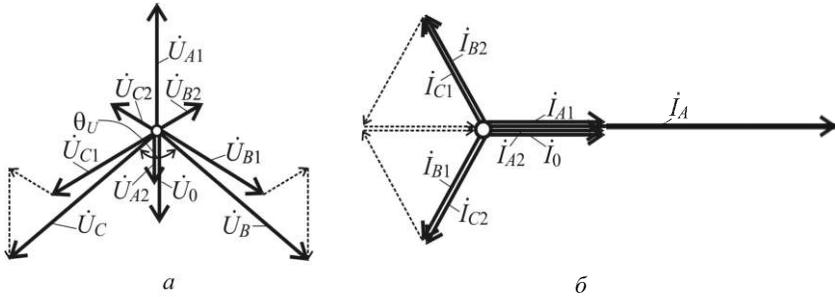
$$\dot{U}_{KA1} = -\left(\dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0}\right) = j(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}) \dot{I}_{KA1}. \quad (12.23)$$

Напряжения неповрежденных фаз в месте короткого замыкания в соответствии с (12.23), (12.2), (12.3) и (12.20) составляют

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KB} &= a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = j \left[ (a^2 - a) X_{2\text{эк}} + (a^2 - 1) X_{0\text{эк}} \right] \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left[ \sqrt{3} X_{2\text{эк}} + j(a^2 - 1) X_{0\text{эк}} \right] \dot{I}_{KA1}; \end{aligned} \quad (12.24)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KC} &= a \dot{U}_{KA1} + a^2 \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = j \left[ (a - a^2) X_{2\text{эк}} + (a - 1) X_{0\text{эк}} \right] \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left[ -\sqrt{3} X_{2\text{эк}} + j(a - 1) X_{0\text{эк}} \right] \dot{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (12.25)$$

Выражения (12.23), (12.2) и (12.3) с учетом (12.20) позволяют построить векторные диаграммы напряжений и токов при однофазном коротком замыкании. Такие диаграммы представлены на рис. 12.6.

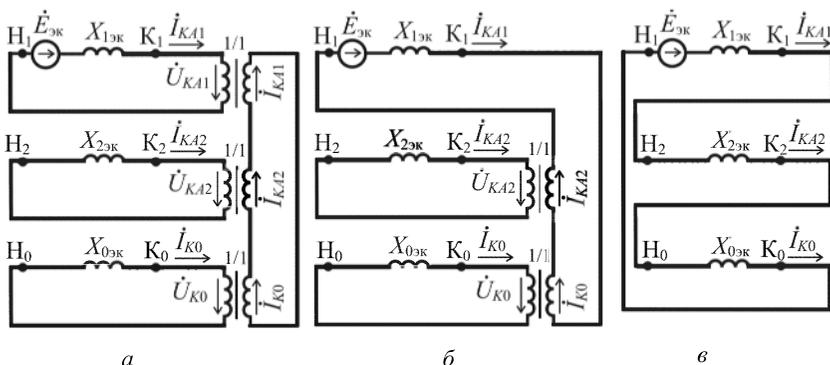


**Рис. 12.6. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при однофазном коротком замыкании**

Угол  $\theta_U$  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  $\theta_U$  увеличивается, приближаясь к  $\pi$ .

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. 12.7,а. Здесь между

схемами замещения отдельных последовательностей введена специальная связывающая часть, которая образована путем последовательного соединения вторичных обмоток идеальных трансформаторов. Нетрудно убедиться, что в связывающей части выполняются как условие (12.20), так и условие (12.19), а потенциалы всех точек схем замещения обратной и нулевой последовательностей остаются неизменными.



**Рис. 12.7. Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании:**

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

Часто отказываются от идеального трансформатора, подключенного к схеме замещения прямой последовательности (см. рис. 12.7,*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  $-\dot{U}_{K0}$  (при этом потенциал в точке  $K_0$  оказывается равным нулю и эту точку можно соединить с началом схемы замещения прямой последовательности), а всех точек схема замещения обратной последовательности – на  $-\dot{U}_{K2} - \dot{U}_{K0}$  (при этом конец схемы замещения обратной последовательности и начало схемы замещения нулевой последовательности будут иметь одинаковый потенциал и могут быть соединены между собой, а начало схемы замещения обратной последовательности и конец схемы замещения прямой последовательности на основании соотношения (12.23) также могут быть соединены между

собой). Полученная таким образом комплексная схема замещения представлена на рис. 12.7,в. Очевидно, напряжения обратной и нулевой последовательностей в такой комплексной схеме замещения могут быть определены только относительно нулевых точек (начал) схем замещения соответствующих последовательностей.

## 12.4. Двухфазное короткое замыкание на землю

При двухфазном коротком замыкании на землю (см. рис. 12.8) граничные условия таковы:

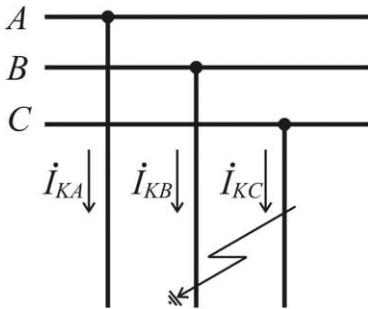


Рис. 12.8. Двухфазное короткое замыкание на землю

- 1) ток неповрежденной (особой) фазы (фазы  $A$ ) равен нулю

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (12.26)$$

- 2) напряжение поврежденной фазы  $B$  в месте короткого замыкания равно нулю

$$\dot{U}_{KB} = 0; \quad (12.27)$$

- 3) напряжение поврежденной фазы  $C$  в месте короткого замыкания равно нулю

$$\dot{U}_{KC} = 0. \quad (12.28)$$

Условие (12.26), выраженное через симметричные составляющие тока особой фазы, имеет вид:

$$\dot{I}_{KA1} + \dot{I}_{KA2} + \dot{I}_{K0} = 0. \quad (12.29)$$

Применение формул для определения симметричных составляющих напряжения фазы  $A$ , исходя из полных напряжений всех фаз и условий (12.27) и (12.28), дает:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \dot{U}_{K0} = \frac{1}{3} \dot{U}_{KA}. \quad (12.30)$$

В соответствии с полученным соотношением приравняем правые части уравнений (12.2) и (12.3):

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

откуда

$$\dot{I}_{K0} = \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA2}. \quad (12.31)$$

Подставив это выражение в (12.29), найдем:

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

откуда

$$\dot{I}_{KA2} = -\frac{\dot{I}_{KA1}}{1 + \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{0\text{ЭК}}}} = -\frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.32)$$

Подстановка этого выражения в (12.31) дает:

$$\dot{I}_{K0} = -\frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.33)$$

Если в соответствии с (12.30) приравнять правые части уравнений (12.1) и (12.2) и исключить из полученного выражения ток  $\dot{I}_{KA2}$ , используя с этой целью (12.32), 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 короткого замыкания

$$\dot{I}_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j \left( X_{1\text{ЭК}} + \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right)}. \quad (12.34)$$

Определив по формуле (12.34) ток прямой последовательности особой фазы  $\dot{I}_{KA1}$  в месте короткого замыкания, легко найти токи

обратной и нулевой последовательностей этой же фазы, используя формулы (12.32) и (12.33).

Напряжение прямой последовательности фазы  $A$  в точке короткого замыкания можно определить по формуле (12.1). Однако чаще используют другую формулу, которая получается путем исключения из (12.1) эквивалентной ЭДС  $\dot{E}_{\text{ЭК}}$  с помощью выражения (12.34):

$$\dot{U}_{KA1} = j \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.35)$$

С учетом (12.30), напряжение на неповрежденной фазе составляет

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

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания, выраженные через ток прямой последовательности особой фазы, определяют по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KB} &= a^2 \dot{I}_{KA1} - a \frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} - \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left( a^2 - \frac{X_{2\text{ЭК}} + aX_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right) \dot{I}_{KA1}; \end{aligned} \quad (12.36)$$

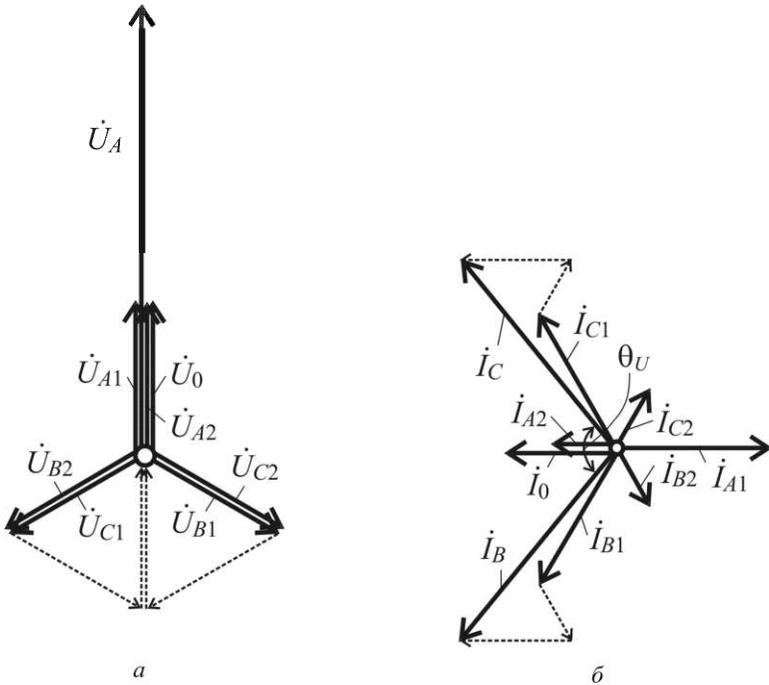
$$\begin{aligned} \dot{I}_{KC} &= a \dot{I}_{KA1} - a^2 \frac{X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} - \frac{X_{2\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \dot{I}_{KA1} = \\ &= \left( a - \frac{X_{2\text{ЭК}} + a^2 X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}} \right) \dot{I}_{KA1}. \end{aligned} \quad (12.37)$$

Хотя комплексы в (12.36) и (12.37), заключенные в скобки, и различны, однако их модули одинаковы и составляют:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{ЭК}} X_{0\text{ЭК}}}{(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}, \quad (12.38)$$

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 приведены на рис. 12.9.



**Рис. 12.9. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) при двухфазном коротком замыкании на землю**

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

При двухфазном коротком замыкании на землю эквивалентными оказываются не только начала схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, как точки нулевого потенциала, но и, как следует из соотношения (12.30), концы этих схем. Это позволяет соединить между собой начала схем замещения отдельных последовательностей (как точки нулевого потенциала), так и их концы (как эквипотенциальные точки), образуя комплексную схему замещения. Последняя представлена на рис. 12.10. Таким образом комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю не требует использования идеальных трансформаторов и справедлива как для напряжений, так и для токов, так как здесь выполняются и соотношения (12.30), и соотношения (12.29), (12.32), (12.33).

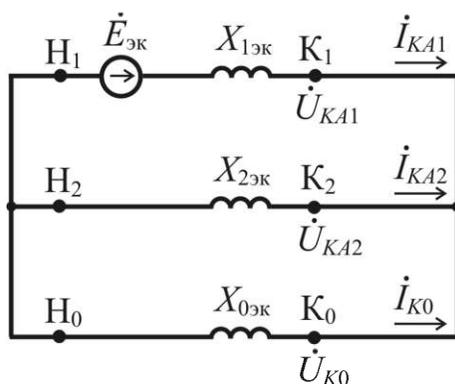


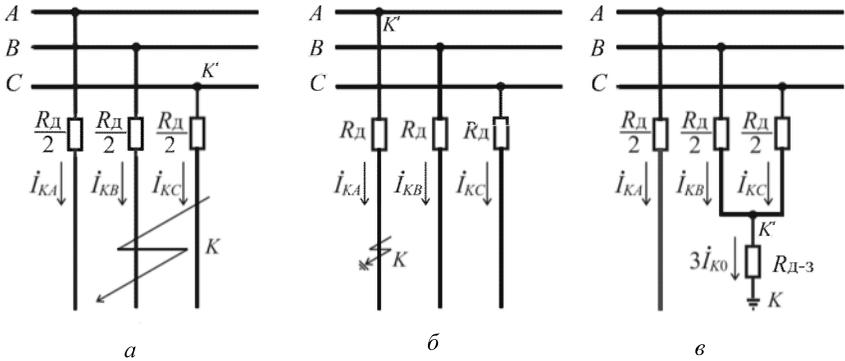
Рис. 12.10. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю

## 12.5. Влияние и учет переходного сопротивления в месте короткого замыкания

При анализе различных несимметричных коротких замыканий предполагалось, что все они являются «металлическими», т.е. при соединении фаз между собой или с землей не возникает промежуточных элементов, обладающих сопротивлением. Между тем обычно в месте короткого замыкания возникает электрическая дуга, обладающая сопротивлением. Некоторое сопротивление имеют и другие элементы, которые встречаются на пути тока короткого замыкания. Для упрощения будем считать, что возникшее при несимметричном коротком замыкании переходное сопротивление в основном определяется сопротивлением электрической дуги, которое в первом приближении можно считать активным.

Чтобы не нарушать симметрию исходной расчетной схемы, электрическую дугу при несимметричных коротких замыканиях разных видов обычно учитывают по-разному, приводя несимметричный участок цепи к эквивалентному симметричному. Так двухфазное короткое замыкание через электрическую дугу с сопротивлением  $R_d$  можно рассматривать как двухфазное «металлическое» короткое замыкание на ответвлении с одинаковым сопротивлением его фаз, равным  $R_d/2$  (см. рис. 12.11,а); при этом ток неповрежденной фазы остается равным нулю, поэтому введение в фазу  $A$  сопротивления  $R_d/2$  не меняет граничных условий рассматриваемого короткого замыкания. Однофазное короткое замыкание через электрическую дугу можно рассматривать как однофазное «металлическое» короткое замыкание на ответвлении с одинаковым сопротивлением его фаз, равным  $R_d$  (см. рис. 12.11,б); в этом случае токи неповрежденных фаз остаются

равными нулю, т.е. введение в эти фазы сопротивлений  $R_d$  не меняет граничных условий однофазного короткого замыкания. В случае, когда при двухфазном коротком замыкании на землю учитывают как сопротивление электрической дуги, возникающей между фазами, так и сопротивление дуги между местом повреждения и землей, то обычно сопротивление электрической дуги между фазами  $R_d$  делят пополам и между этими частями и землей включают сопротивление электрической дуги  $R_{д-з}$  (см. рис. 12.11,б). При этом в фазу  $A$  также включают сопротивление  $R_d/2$ , которое не меняет граничных условий.



**Рис. 12.11. Принципиальные схемы при несимметричных коротких замыканиях через электрическую дугу:**  
 а – двухфазное короткое замыкание; б – однофазное короткое замыкание;  
 в – двухфазное короткое замыкание на землю

Если все основные элементы расчетной схемы, как и ранее, учитывать только их индуктивным сопротивлением, то в соответствии со схемой на рис. 12.11,а и по аналогии с (12.10) выражение для тока прямой последовательности особой фазы при двухфазном коротком замыкании с учетом электрической дуги имеет вид:

$$\dot{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{ЭК}}{\left(\frac{R_d}{2} + jX_{1ЭК}\right) + \left(\frac{R_d}{2} + jX_{2ЭК}\right)} = \frac{\dot{E}_{ЭК}}{R_d + j(X_{1ЭК} + X_{2ЭК})}. \quad (12.39)$$

Симметричные составляющие напряжения в точке  $K$  (см. рис. 12.11,а)

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{KA2} = \left(\frac{R_d}{2} + jX_{2ЭК}\right) \dot{I}_{KA1}, \quad (12.40)$$

а симметричные составляющие напряжения за сопротивлением дуги (в точке  $K'$ ), учитывая (12.8), составляют

$$\dot{U}_{K'A1} = \dot{U}_{KA1} + \frac{R_d}{2} \dot{I}_{KA1} = (R_d + jX_{2\text{эк}}) \dot{I}_{KA1} \quad (12.41)$$

и

$$\dot{U}_{K'A2} = \dot{U}_{KA2} + \frac{R_d}{2} \dot{I}_{KA2} = \dot{U}_{KA2} - \frac{R_d}{2} \dot{I}_{KA1} = jX_{2\text{эк}} \dot{I}_{KA1}. \quad (12.42)$$

При однофазном коротком замыкании граничные условия, записанные для точки  $K$  (см. рис. 12.12, б), совпадают с граничными условиями (12.16) – (12.18), поэтому справедливы соотношения (12.19) и (12.20). Но сопротивление каждой последовательности увеличилось на  $R_d$ , поэтому ток прямой последовательности определяется по формуле

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KA1}^{(1)} &= \frac{\dot{E}_{\text{эк}}}{(R_d + jX_{1\text{эк}}) + (R_d + jX_{2\text{эк}}) + (R_d + jX_{0\text{эк}})} = \\ &= \frac{\dot{E}_{\text{эк}}}{3R_d + j(X_{1\text{эк}} + X_{2\text{эк}} + X_{0\text{эк}})}, \end{aligned} \quad (12.43)$$

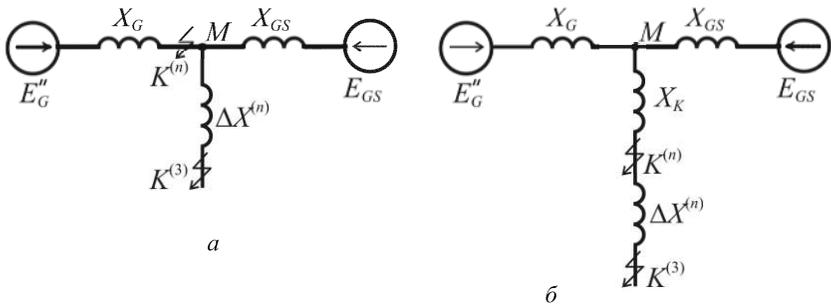
а симметричные составляющие напряжения в точке  $K$

$$\dot{U}_{KA1} = [(R_d + jX_{2\text{эк}}) + (R_d + jX_{0\text{эк}})] \dot{I}_{KA1} = \quad (12.44)$$

$$= [2R_d + j(X_{2\text{эк}} + X_{0\text{эк}})] \dot{I}_{KA1};$$

$$\dot{U}_{KA2} = -(R_d + jX_{2\text{эк}}) \dot{I}_{KA2}; \quad (12.45)$$

$$\dot{U}_{K0} = -(R_d + jX_{0\text{эк}}) \dot{I}_{K0}. \quad (12.46)$$



**Рис. 12.12. Расчетные схемы для определения начального значения тока прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании:**

*a* – при радиальной схеме связи генератора и энергосистемы;

*б* – при коротком замыкании на ответвлении

При двухфазном коротком замыкании на землю для точки  $K'$  (см. рис. 12.11,б) сохраняются граничное условие (12.26) и соотношение (12.29), но напряжения поврежденных фаз не равны нулю:

$$\dot{U}_{K'B} = \dot{U}_{K'C} = 3R_{д-з} \dot{I}_{K'0}. \quad (12.47)$$

поэтому

$$\dot{U}_{K'A1} = \dot{U}_{K'A2} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{K'A} - \dot{U}_{K'B} \right), \quad (12.48)$$

а  $\dot{U}_{K'0}$  с учетом (12.47) равно

$$\dot{U}_{K'0} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{K'A} + \dot{U}_{K'B} + \dot{U}_{K'C} \right) = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{K'A} - \dot{U}_{K'B} \right) + 3R_{д-з} \dot{I}_{K'0}. \quad (12.49)$$

Таким образом, симметричные составляющие напряжения в точке  $K'$  связаны соотношением:

$$\dot{U}_{K'A1} = \dot{U}_{K'A2} = \dot{U}_{K'0} - 3R_{д-з} \dot{I}_{K'0}. \quad (12.50)$$

Выражения (12.1) – (12.3) справедливы не только в цепях, не имеющих активных сопротивлений, но и при наличии последних, поэтому симметричные составляющие напряжений для точки  $K'$  можно представить так:

$$\dot{U}_{K'A1} = \dot{E}_{эк} - \left( \frac{R_{д}}{2} + jX_{1эк} \right) \dot{I}_{K'A1}; \quad (12.51)$$

$$\dot{U}_{K'A2} = - \left( \frac{R_{д}}{2} + jX_{2эк} \right) \dot{I}_{K'A2}; \quad (12.52)$$

$$\dot{U}_{K'0} = - \left( \frac{R_{д}}{2} + jX_{0эк} \right) \dot{I}_{K'0}. \quad (12.53)$$

Подставив (12.52) и (12.53) в (12.50), получим:

$$\left( \frac{R_{д}}{2} + jX_{2эк} \right) \dot{I}_{K'A2} = \left( \frac{R_{д}}{2} + 3R_{д-з} + jX_{0эк} \right) \dot{I}_{K'0}. \quad (12.54)$$

Из (12.51), (12.52) и (12.54) следует, что с учетом переходных сопротивлений эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно равны:

$$Z_{1эк} = \frac{R_{д}}{2} + jX_{1эк}; \quad (12.55)$$

$$Z_{2эк} = \frac{R_{д}}{2} + jX_{2эк}; \quad (12.56)$$

$$\underline{Z}_{0\varepsilon\kappa} = \frac{R_{\Delta}}{2} + 3R_{\Delta-3} + jX_{0\varepsilon\kappa}. \quad (12.57)$$

Очевидно, выражение (12.29) можно представить и так:

$$\dot{I}_{K'A1} + \dot{I}_{K'A2} + \dot{I}_{K'0} = 0.$$

Если из (12.54) с помощью последнего выражения сначала исключить ток  $\dot{I}_{K'0}$ , а затем ток  $\dot{I}_{K'A2}$ , то получим:

$$\dot{I}_{K'A2} = -\frac{\underline{Z}_{0\varepsilon\kappa}}{\underline{Z}_{2\varepsilon\kappa} + \underline{Z}_{0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{K'A1} = -\frac{\frac{R_{\Delta}}{2} + 3R_{\Delta-3} + jX_{0\varepsilon\kappa}}{R_{\Delta} + 3R_{\Delta-3} + j(X_{2\varepsilon\kappa} + X_{0\varepsilon\kappa})} \dot{I}_{K'A1}; \quad (12.58)$$

$$\dot{I}_{K'0} = -\frac{\underline{Z}_{2\varepsilon\kappa}}{\underline{Z}_{2\varepsilon\kappa} + \underline{Z}_{0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{K'A1} = -\frac{\frac{R_{\Delta}}{2} + jX_{2\varepsilon\kappa}}{R_{\Delta} + 3R_{\Delta-3} + j(X_{2\varepsilon\kappa} + X_{0\varepsilon\kappa})} \dot{I}_{K'A1}. \quad (12.59)$$

Теперь в соответствии с (12.50) приравняем правые части (12.51) и (12.52) и с помощью (12.58) исключим из полученного выражения ток обратной последовательности  $\dot{I}_{K'A2}$ . В результате получим выражение для тока прямой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{K'A1}^{(1,1)} &= \frac{\dot{E}_{\varepsilon\kappa}}{\underline{Z}_{2\varepsilon\kappa} + \underline{Z}_{0\varepsilon\kappa} - \frac{\underline{Z}_{1\varepsilon\kappa} \underline{Z}_{0\varepsilon\kappa}}{\underline{Z}_{2\varepsilon\kappa} + \underline{Z}_{0\varepsilon\kappa}}} = \\ &= \frac{\dot{E}_{\varepsilon\kappa}}{\frac{R_{\Delta}}{2} + jX_{1\varepsilon\kappa} + \frac{\left(\frac{R_{\Delta}}{2} + jX_{2\varepsilon\kappa}\right) \left(\frac{R_{\Delta}}{2} + 3R_{\Delta-3} + jX_{0\varepsilon\kappa}\right)}{R_{\Delta} + 3R_{\Delta-3} + j(X_{2\varepsilon\kappa} + X_{0\varepsilon\kappa})}}. \end{aligned} \quad (12.60)$$

Поскольку токи прямой и обратной последовательностей в  $R_{\Delta-3}$  отсутствуют, то напряжения прямой (обратной) последовательности в точках  $K$  и  $K'$  одинаковы, а напряжения нулевой последовательности отличаются:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{K'0} = \dot{U}_{K0} - 3R_{\Delta-3} \dot{I}_{K'0} &= -\left(\frac{R_{\Delta}}{2} + jX_{0\varepsilon\kappa}\right) \dot{I}_{K'0} - 3R_{\Delta-3} \dot{I}_{K'0} = \\ &= -\left(\frac{R_{\Delta}}{2} + 3R_{\Delta-3} + jX_{0\varepsilon\kappa}\right) \dot{I}_{K'0}. \end{aligned} \quad (12.61)$$

## 12.6. 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. 12.1.

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 (12.10), (12.21) и (12.34). 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:

$$\dot{I}_{K\Delta 1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + \Delta X^{(n)})}, \quad (12.62)$$

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

Таблица 12.1

**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 зсм.по
Ток $\dot{I}_{K\Delta 1}$	$\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}})}$	$\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})}$	$\frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j[X_{1\text{ЭК}} + X_{2\text{ЭК}}X_{0\text{ЭК}}/(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})]}$

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

Выражения для определения сопротивления  $\Delta X^{(n)}$  при несимметричных коротких замыканиях разных видов приведены в табл. 12.2.

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

Вид короткого замыкания	Выражения для $\Delta X^{(n)}$	Выражения для $m^{(n)}$
Двухфазное	$X_{2\text{ЭК}}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	$X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}$	3
Двухфазное на землю	$\frac{X_{2\text{ЭК}} \cdot X_{0\text{ЭК}}}{X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\text{ЭК}} \cdot X_{0\text{ЭК}}}{(X_{2\text{ЭК}} + X_{0\text{ЭК}})^2}}$

Формула (12.62) 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 новую точку точкой трехфазного короткого замыкания. Таким образом *ток прямой последовательности при любом несимметричном коротком замыкании можно определить как ток эквивалентного трехфазного короткого замыкания в точке, удаленной от 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. 12.1, при любом несимметричном коротком замыкании модуль тока поврежденной фазы и найденный ток прямой последовательности связаны простым соотношением, которое в обобщенном виде можно представить так:

$$\left| \dot{I}_K^{(n)} \right| = m^{(n)} \left| \dot{I}_{K1} \right|, \quad (12.63)$$

где  $m^{(n)}$  – коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания; его значения при двухфазном и однофазном коротком замыкании и формула для его определения при двухфазном коротком замыкании на землю приведены в табл. 12.2.

Важной величиной при расчете несимметричных коротких замыканий является напряжение прямой последовательности в точке короткого замыкания. Его можно определить по формуле (12.1). Однако удобнее использовать выражение

$$U_{K41}^{(n)} = j\Delta X^{(n)} \dot{I}_{K41}^{(n)}, \quad (12.64)$$

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.

### **12.7. Расчет переходных процессов 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 заданного несимметричного короткого замыкания необходимо составить схемы замещения обратной и нулевой (при расчете токов однофазного и двухфазного короткого замыкания на землю) последовательностей, преобразовать эти схемы относительно точки короткого замыкания, определить эквивалентные сопротивления  $X_{2\text{ЭК}}$  и  $X_{0\text{ЭК}}$  и найти  $\Delta X^{(n)}$ .

## Расчет с использованием расчетных формул

Если 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 (6.32). 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:

$$I_{1пт} = \frac{E_{gp}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} + \left( \frac{E'_{g(0)}}{X'_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} - \frac{E_{gp}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} \leq \frac{U_{ном}}{X_{вщ} + \Delta X^{(n)}}, \quad (12.65)$$

где

$$T_d^{(n)} = T_{f0} \frac{X'_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}}{X_d + X_{вщ} + \Delta X^{(n)}} = T'_f. \quad (12.66)$$

Как видно из (12.65), 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  $U_{ном}$  равного единице.

Определив ток прямой последовательности по формуле (12.65), 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 (7.35), которая в соответствии с правилом эквивалентности тока прямой последовательности принимает вид:

$$\begin{aligned}
I_{\text{лив}} = & \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} + \left( \frac{E'_{q0}}{X'_{d\pi} + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} - \right. \\
& \left. - \frac{E_{q(0)}}{X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \left( \frac{E''_{q0}}{X''_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} - \right. \\
& \left. - \frac{E'_{q0}}{X'_{d\pi} + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} \right) e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \left( \frac{E_{q\pi} - E_{q(0)}}{X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}} \right) \times \\
& \times \left( 1 - \frac{T_d^{(n)} - T_{\sigma 1d}}{T_d^{(n)} - T_d^{n(n)}} e^{-\frac{t}{T_d^{(n)}}} + \frac{T_d^{n(n)} - T_{\sigma 1d}}{T_d^{(n)} - T_d^{n(n)}} e^{-\frac{t}{T_d^{n(n)}}} \right) \leq \frac{U_{\text{пом}}}{X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}},
\end{aligned} \tag{12.67}$$

где

$$T_d^{(n)} \approx T_f^{(n)} + T_{1d}^{(n)}; \tag{12.68}$$

$$T_d^{n(n)} \approx \sigma^{(n)} \frac{T_f^{(n)} T_{1d}^{(n)}}{T_f^{(n)} + T_{1d}^{(n)}}; \tag{12.69}$$

$$X'_{d\pi} \approx X_d \frac{T_f^{(n)} + T_{1d}^{(n)}}{T_{f0} + T_{1d0}}, \tag{12.70}$$

причем

$$T_f^{(n)} = \frac{X_f^{(n)}}{\omega R_f} = \frac{X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}}}{\omega R_f}, \tag{12.71}$$

$$T_{1d}^{(n)} = \frac{X_{1d}^{(n)}}{\omega R_{1d}} = \frac{X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)}}}{\omega R_{1d}}, \tag{12.72}$$

$$\sigma^{(n)} = 1 - \frac{\left( X_d - X_{ad} + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)} \right)^2 X_{ad}^2}{\left[ X_f \left( X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)} \right) - X_{ad}^2 \right] \times \left[ X_{1d} \left( X_d + X_{\text{внш}} + \Delta X^{(n)} \right) - X_{ad}^2 \right]}. \tag{12.73}$$

Порядок определения параметров схемы замещения синхронной машины дан в прил. 1.

## 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  $X_{*1\text{эк}}^{(n)}$ ,

$X_{*2\text{эк}}^{(n)}$  и  $X_{*0\text{эк}}^{(n)}$ ;

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

$$I_{* \text{н0}(\text{б})} = \frac{E_{*}^{(n)}}{X_{*1\text{эк}}^{(n)} + \Delta X_{*}^{(n)}};$$

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

$$I_{* \text{н0}(\text{ном})} = I_{* \text{н0}(\text{б})} \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{б}}}; \quad (12.74)$$

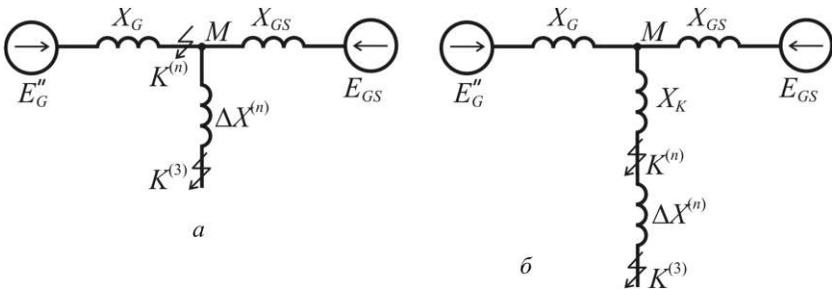
5) если найденный ток  $I_{* \text{н0}(\text{ном})} \geq 2$ , то подбирают соответствующую типовую кривую и для заданного момента времени определяют коэффициент  $\gamma_{1t}$ ;

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

$$I_{\text{пр}} = m^{(n)} \gamma_{1l} I_{* \text{лп0}(\text{б})} I_{\text{б}}. \quad (12.75)$$

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 определении тока  $I_{* \text{лп0}(\text{ном})}$ , 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 системой делить эту схему на две независимые части при несимметричном коротком замыкании в какой-либо промежуточной точке, 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. 12.12,а). Если же несимметричное короткое замыкание происходит на ответвлении с сопротивлением  $X_K$ , которое в схеме замещения прямой последовательности образует отдельную ветвь (см. рис. 12.12,б), то точка эквивалентного трехфазного короткого замыкания оказывается еще более удаленной от генератора.



**Рис. 12.12. Расчетные схемы для определения начального значения тока прямой последовательности при несимметричном коротком замыкании:**

а – при радиальной схеме связи генератора и энергосистемы;

б – при коротком замыкании на ответвлении

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;

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  $X_{*2\text{ЭК}(\delta)}$  и  $X_{*0\text{ЭК}(\delta)}$ ;

3) в зависимости от вида несимметричного короткого замыкания определяют дополнительное сопротивление  $\Delta X_{*}^{(n)}$  и составляют схему, подобную представленной на рис. 12.12,а или рис. 12.12,б;

4) определяют эквивалентную ЭДС  $E_{*\text{ЭК}(\delta)}$  и эквивалентное сопротивление прямой последовательности  $X_{*1\text{ЭК}(\delta)}$ ;

5) находят начальное значение тока прямой последовательности в месте короткого замыкания

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

и начальное значение тока прямой последовательности в ветви генератора

$$I_{*1\text{Г}(\delta)} = \frac{E_{*\text{Г}(\delta)} - \left( X_{*\text{К}(\delta)} + \Delta X_{*}^{(n)} \right) I_{*1\text{ЭК}(\delta)}}{X_{*\text{Г}(\delta)}};$$

6) по формуле (12.74) определяют начальное значение тока прямой последовательности генератора (генераторов), отнесенное к его (их) полной номинальной мощности и номинальному напряжению  $I_{*1\text{Г}0(\text{ном})}$ , а также определяют отношение  $I_{*1\text{Г}0(\delta)} / I_{*1\text{ЭК}(\delta)}$ ;

7) если  $I_{*1\text{Г}0(\text{ном})} \geq 2$  и  $I_{*1\text{Г}0(\delta)} / I_{*1\text{ЭК}(\delta)} \geq 0,5$ , то подбирают соответствующую типовую кривую и для заданного момента времени

определяют коэффициент  $\gamma_{1t}$ , а затем по найденному отношению  $I_{*1k0(\delta)} / I_{*1k0(\delta)}$  подбирают соответствующую кривую зависимости  $\gamma_{kt} = f(\gamma_t)$  и, зная  $\gamma_{1t}$ , находят коэффициент  $\gamma_{1kt}$ ;

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

$$I_{kt} = m^{(n)} \gamma_{1kt} I_{*k0(\delta)} I_{\delta}. \quad (12.76)$$

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

### *Расчет с использованием метода спрямленных характеристик*

Если исходная расчетная схема содержит только один генератор, то расчет тока в поврежденной фазе (поврежденных фазах) в заданный момент времени при любом несимметричном коротком замыкании с использованием метода спрямленных характеристик и применением системы относительных единиц производят в следующей последовательности:

1) составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определяют параметры их элементов, кроме ЭДС и сопротивления генератора;

2) находят эквивалентные сопротивления  $X_{*2эк(\delta)}$  и  $X_{*0эк(\delta)}$ , дополнительное сопротивление  $\Delta X_{*(\delta)}^{(n)}$  и внешнее по отношению к генератору сопротивление в схеме прямой последовательности  $X_{*1вн(\delta)}$ ;

3) для заданного момента времени по характеристикам  $E_t = f(t)$  и  $X_t = \varphi(t)$  находят ЭДС  $E_{*t(ном)}$  и  $X_{*t(ном)}$  и определяют критическое сопротивление

$$X_{*крт(ном)} = X_{*t(ном)} \frac{1}{E_{*t(ном)} - 1};$$

4) приводят сопротивление генератора  $X_{*t(ном)}$  и критическое сопротивление  $X_{*крт(ном)}$  к выбранным базисным условиям, т.е. находят  $X_{*t(\delta)}$  и  $X_{*крт(\delta)}$ ;

5) сравнивают  $X_{*1вн(\delta)} + \Delta X_{*(\delta)}^{(n)}$  с  $X_{*крт(\delta)}$ ;

если  $X_{* \text{вн}(\delta)} + \Delta X_{* (\delta)}^{(n)} < X_{* \text{кр}(\delta)}$ , то генератор в расчетный момент времени работает в режиме подъема возбуждения и в схему замещения прямой последовательности его вводят расчетной ЭДС  $E_{* t(\delta)}$  и расчетным сопротивлением для заданного момента времени  $X_{* t(\delta)}$ ;

если же  $X_{* \text{вн}(\delta)} + \Delta X_{* (\delta)}^{(n)} > X_{* \text{кр}(\delta)}$ , то генератор в расчетный момент времени работает в режиме нормального напряжения и в схему замещения прямой последовательности его вводят ЭДС  $E_{* t(\delta)} = 1$  и  $X_{* t(\delta)} = 0$ ;

б) определяют искомый ток поврежденной фазы (поврежденных фаз) в расчетный момент времени

$$I_{\text{пт}} = m^{(n)} \frac{E_{* t(\delta)}}{X_{* t(\delta)} + X_{* \text{вн}(\delta)} + \Delta X_{* (\delta)}^{(n)}} I_{\delta}. \quad (12.77)$$

При сложной исходной расчетной схеме, содержащей разнотипные и разноудаленные от места несимметричного короткого замыкания генераторы, порядок расчета тока поврежденной фазы (поврежденных фаз) в заданный момент времени с использованием метода спрямленных характеристик другой:

1) исходя из заданного расчетного момента времени по кривым  $E_i = f(t)$  и  $X_i = \varphi(t)$  определяют расчетные ЭДС  $E_{* t(\text{ном})}$  и сопротивление  $X_{* t(\text{ном})}$  и для каждого генератора приводят их к базисным условиям, т.е. находят  $E_{* t(\delta)}$  и  $X_{* t(\delta)}$ ;

2) находят критический ток каждого генератора

$$I_{* \text{кр}(\delta)} = \frac{E_{* t(\delta)} - 1}{X_{* t(\delta)}};$$

3) составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей и определяют параметры их элементов (без учета ЭДС и сопротивления прямой последовательности генераторов);

4) находят эквивалентные сопротивления  $X_{* 2\text{эк}(\delta)}$  и  $X_{* 0\text{эк}(\delta)}$ , а также дополнительное сопротивление  $\Delta X_{* (\delta)}^{(n)}$ ;

5) исходя из найденного дополнительного сопротивления  $\Delta X_{* (\delta)}^{(n)}$  и удаленности точки короткого замыкания от генераторов в

схеме прямой последовательности оценивают возможные режимы работы генераторов в расчетный момент времени и в зависимости от выбранных режимов вводят генераторы в схему замещения прямой последовательности или найденными в п.1 ЭДС  $E_{*i(б)}$  и сопротивлени-

ем  $X_{*i(б)}$  или  $E_{*i(б)}=1$  и  $X_{*i(б)}=0$ ;

6) преобразуют полученную схему замещения прямой последовательности и определяют эквивалентные ЭДС  $E_{*1ЭК(б)}$  и сопротивление  $X_{*1ЭК(б)}$ ;

7) определяют ток прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$I_{*1пт(б)} = \frac{E_{*1ЭК(б)}}{X_{*1ЭК(б)} + \Delta X_{*1(б)}^{(n)}};$$

8) находят токораспределение в схеме прямой последовательности и сравнивают полученные токи прямой последовательности генераторов с критическими; ток прямой последовательности каждого генератора, для которого был выбран режим подъема возбуждения, должен быть больше критического, найденного в п.2, а каждого генератора, для которого выбран режим нормального напряжения, должен быть меньше критического. Если для какого-либо генератора соответствующее условие не выполняется, то необходимо поменять его режим, т.е. ввести этот генератор в схему замещения прямой последовательности ЭДС и сопротивлением, соответствующим другому режиму, повторить расчет и повторно выполнить проверку правильности выбранных режимов всех генераторов;

9) определить искомый ток поврежденной фазы (поврежденных фаз) в заданный момент времени

$$I_{пт} = m^{(n)} I_{*1пт(б)} I_{б}.$$

## **12.8. 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 элементарно, так как токи в таких схемах распределяются обратно-пропорционально сопротивлениям 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 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. 12.13 представлены эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы 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. 12.13,а, на котором занимаемая трансформатором зона обозначена римскими цифрами I-II). При построении эпюр предполагалось, что обмотка высшего напряжения трансформатора соединена в звезду с заземленной нейтралью, а обмотка низшего напряжения – в треугольник, поэтому напряжение нулевой последовательности со стороны синхронного генератора отсутствует.

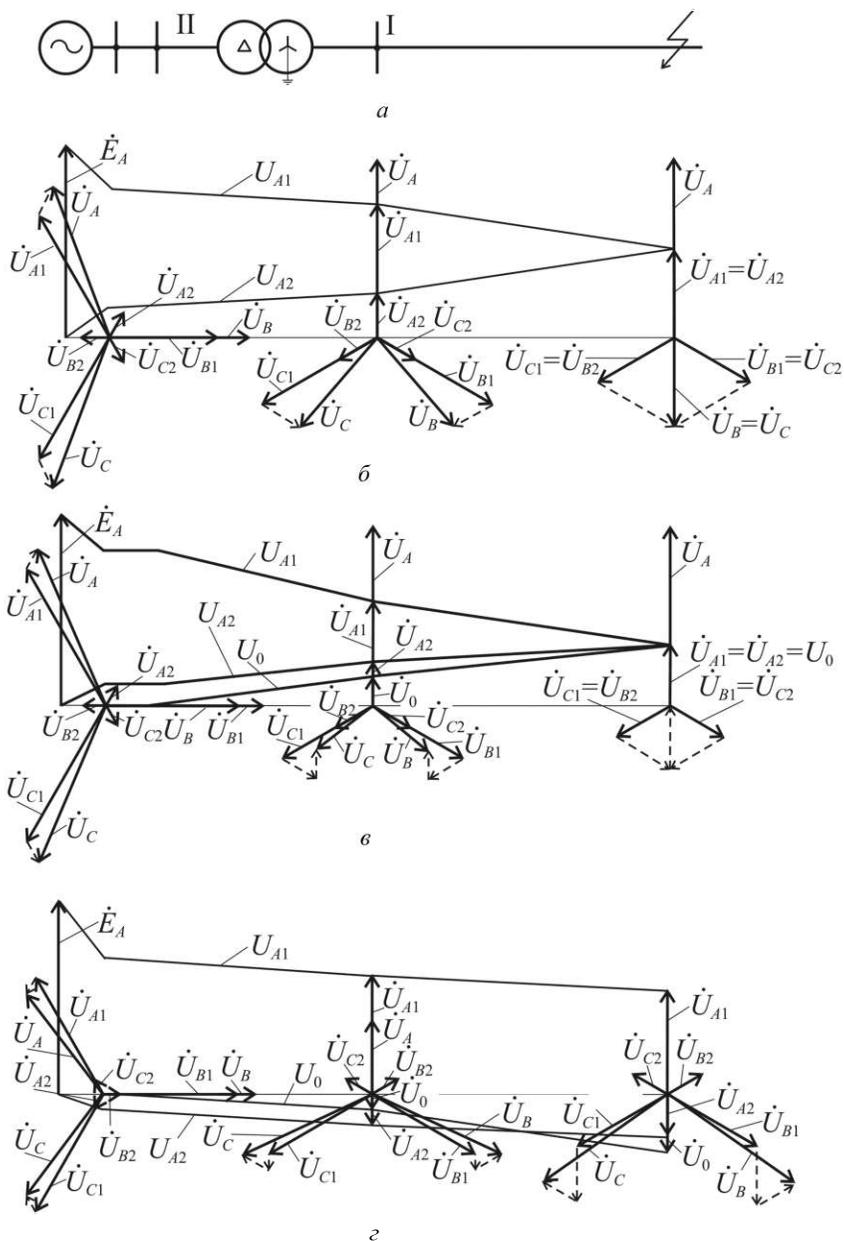


Рис. 12.13. Исходная схема (а) и эпюры распределения симметричных составляющих напряжений особой фазы при двухфазном (б), двухфазном на землю (в) и однофазном (г) коротких замыканий

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. 12.13,б), что их сумма, равная результирующему напряжению на неповрежденной фазе линии электропередачи, остается неизменной. А при двухфазном коротком замыкании на землю (см. рис. 12.13,в) неизменной вдоль линии электропередачи остается сумма напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При однофазном коротком замыкании (см. рис. 12.13,г) падения напряжения прямой и обратной последовательностей в линии электропередачи (и трансформаторе) по модулю одинаковы, а 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 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. 12.13,б-г векторные диаграммы напряжений на выводах генератора построены применительно к трансформатору с группой соединения обмоток  $Y_0/\Delta-11$ .

## 12.9. 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

$$K^{(n/3)} = \frac{I_K^{(n)}}{I_K^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \cdot \frac{X_{1\text{эк}}}{X_{1\text{эк}} + \Delta X^{(n)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \frac{1}{1 + \frac{\Delta X^{(n)}}{X_{1\text{эк}}}}, \quad (12.78)$$

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. 12.2.

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  $X_{\text{вн}}$  – внешнее сопротивление до расчетной точки короткого замыкания. По мере увеличения внешнего сопротивления отношение  $X_{2\text{эк}}/X_{1\text{эк}}$  стремится к единице и  $K^{(2/3)} \approx \sqrt{3}/2$ . В установившемся режиме КЗ  $X_{1\text{эк}} > X_{2\text{эк}}$  и разница между ними минимальна при удаленном коротком замыкании и максимальна при повреждении на выводах синхронной машины, так как в этом случае  $X_{1\text{эк}} = X_d$ , 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 трансформаторами, на термическую стойкость при коротком замыкании.

На основании сказанного можно сделать следующий вывод: в зависимости от удаленности расчетной точки КЗ и расчетной продолжительности КЗ  $K^{(2/3)}$  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 (12.78) 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 за-

мыкание на землю переходит в двухфазное короткое замыкание, при этом  $m^{(1,1)} = m^{(2)} = \sqrt{3}$  и  $\Delta X^{(1,1)} = X_{2эк} \approx X_{1эк}$  и  $K^{(1,1/3)} = K^{(2/3)} = \sqrt{3}/2$ .

## 12.10. Примеры решения задач

*Задача 1.* Определить значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в точке  $K$  исходной расчетной схемы, представленной на рис. 12.14,а.

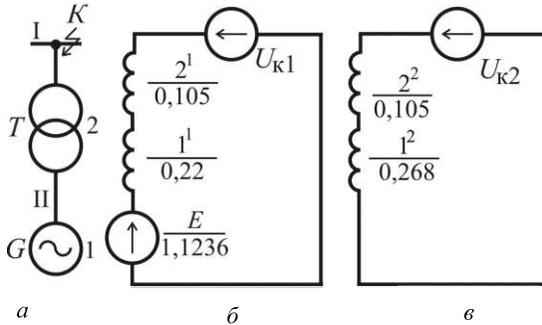


Рис. 12.14. Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б) и обратной (в) последовательностей к задаче 1:

1, 2 – порядковые номера элементов; I, II – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- генератор  $G$ :  $P_{ном} = 110$  МВт;  $U_{ном} = 10,5$  кВ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,8$ ;  $X_{*d(ном)} = 0,189$ ;  $X_{*2(ном)} = 0,23$ ; до короткого замыкания генератор работал с номинальной нагрузкой;

- трансформатор  $T$ :  $S_{ном} = 160$  МВ·А;  $n_T = 115/10,5$  кВ;  $u_K = 10,5$  %;

*Решение.* В качестве базисных единиц выбираем  $S_б = 160$  МВ·А,  $U_б = U_{ср}$ , т.е.  $U_{б1} = 115$  кВ и  $U_{б1} = 10,5$  кВ.

Тогда

$$I_{б1} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{б1}} = \frac{160}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,803 \text{ кА.}$$

Эквивалентные схемы замещения прямой и обратной последовательностей приведены на рис. 12.14,б и 12.14,в. При выбранных базисных единицах сопротивления прямой и обратной последовательностей элементов схемы замещения составляют:

$$X_{*1^{(б)}} = 0,189 \cdot \frac{160}{110} = 0,22; \quad X_{*1^{(в)}} = 0,23 \cdot \frac{160}{110} = 0,268;$$

$$X_{*2^1(6)} = X_{*2^2(6)} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{160} = 0,105.$$

Сверхпереходная ЭДС генератора, имея в виду, что до короткого замыкания последний работал с номинальной нагрузкой, т.е.  $I_{*(0)(ном)} = 1$ , согласно формуле (5.34), равна

$$E_{*(ном)}'' = \sqrt{(1 + 0,186 \cdot 1 \cdot 0,6)^2 + (0,186 \cdot 1 \cdot 0,8)^2} = 1,1236$$

или в относительных базисных единицах

$$E_{*(6)}'' = E_{*(ном)}'' \frac{U_{ном}}{U_6} = 1,1236 \frac{10,5}{10,5} = 1,1236.$$

Эквивалентные сопротивления прямой и обратной последовательностей составляют

$$X_{*1э(6)} = X_{*1^1(6)} + X_{*2^1(6)} = 0,22 + 0,105 = 0,325;$$

$$X_{*2э(6)} = X_{*1^2(6)} + X_{*2^2(6)} = 0,268 + 0,105 = 0,373,$$

поэтому ток прямой последовательности в месте короткого замыкания согласно формуле (12.10)

$$I_{*к1(6)} = \frac{E_{*(6)}''}{X_{*1э(6)} + X_{*2э(6)}} = \frac{1,1236}{0,325 + 0,373} = 1,6097$$

и полный ток в именованных единицах

$$I_k = \sqrt{3} I_{*к1(6)} I_{(6I)} = \sqrt{3} \cdot 1,6097 \cdot 0,803 = 2,2388 \text{ кА.}$$

*Задача 2.* Определить ток в неповрежденной фазе трансформатора  $T1$  (рис. 12.15,а), т.е. уравнительный ток между трансформатором  $T1$  и автотрансформатором  $AT$  при двухфазном коротком замыкании в точке  $K$ . Известно, что до короткого замыкания генератор  $G1$  работал с номинальной нагрузкой, а генератор  $G2$  – в режиме холостого хода с номинальным напряжением.

*Исходные данные:*

• генераторы  $G1$  и  $G2$ :  $P_{ном} = 200$  МВт;  $U_{ном} = 15,75$  кВ;  $\cos \varphi_{ном} = 0,85$ ;  $X_{*d(ном)}'' = 0,18$ ;  $X_{*2(ном)} = 0,22$ ;

• трансформатор  $T1$ :  $S_{ном} = 250$  МВ·А;  $n_T = 230/15,75$  кВ;  $u_k = 11$  %;

• трансформатор  $T2$ :  $S_{ном} = 250$  МВ·А;  $n_T = 115/15,75$  кВ;  $u_k = 10,5$  %;

• автотрансформатор  $AT$ :  $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 230/155 \text{ кВ}$ ;  
 $u_{\text{кВ-С}} = 11 \%$ .

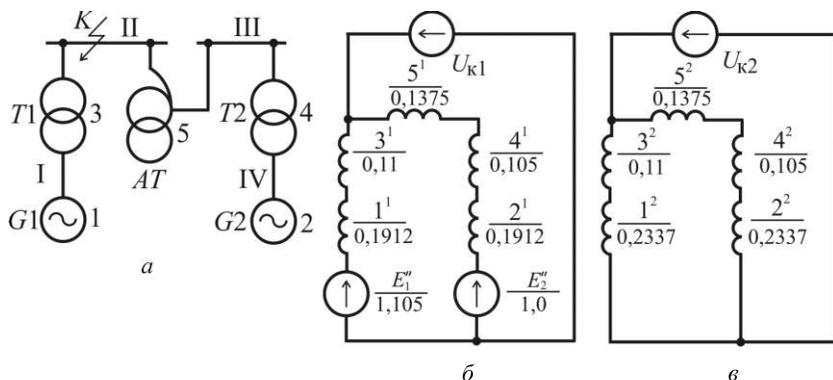


Рис. 12.15. Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б) и обратной (в) последовательностей к задаче 2:

1 – 5 – порядковые номера элементов; I, IV – ступени напряжения

*Решение.* В качестве базисных единиц выбираем  $S_6 = 250 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_6 = U_{\text{ср}}$ , т.е.  $U_{6\text{I}} = 15,75 \text{ кВ}$  и  $U_{6\text{III}} = 230 \text{ кВ}$ ,  $U_{6\text{III}} = 115 \text{ кВ}$ ,  $U_{6\text{IV}} = 15,75 \text{ кВ}$ . Тогда

$$I_{6\text{III}} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6\text{III}}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,6276 \text{ кА}.$$

Эквивалентные схемы замещения прямой и обратной последовательностей приведены на рис. 12.15,б и 12.15,в. В схеме замещения автотрансформатор представлен одним индуктивным сопротивлением, так как к его обмотке низшего напряжения не подключена нагрузка. При выбранных базисных единицах сопротивления прямой и обратной последовательностей элементов схемы замещения составляют:

$$X_{* 1^1(6)} = X_{* 2^1(6)} = 0,18 \cdot \frac{250}{200} = 0,1912;$$

$$X_{* 1^2(6)} = X_{* 2^2(6)} = 0,22 \cdot \frac{250}{200} = 0,2337;$$

$$X_{* 3^1(6)} = X_{* 3^2(6)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{250}{250} = 0,11;$$

$$X_{*4}^{1(6)} = X_{*4}^{2(6)} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{250}{250} = 0,105;$$

$$X_{*5}^{1(6)} = X_{*5}^{2(6)} = \frac{11}{100} \cdot \frac{250}{200} = 0,1375.$$

Сверхпереходная ЭДС генератора  $G1$ , имея в виду, что до короткого замыкания последний работал с номинальной нагрузкой, т.е.  $I_{*(0)(ном)} = 1$ , равна

$$E_{*1}'' = \sqrt{(1 + 0,18 \cdot 1 \cdot 0,5268)^2 + (0,18 \cdot 1 \cdot 0,85)^2} \frac{15,75}{15,75} = 1,105.$$

Сверхпереходная ЭДС генератора  $G2$ , имея в виду, что до короткого замыкания последний работал на холостом ходу с номинальным напряжением, равна

$$E_{*2}'' = 1,0.$$

Суммарные сопротивления прямой и обратной последовательностей блока  $G1-T1$ :

$$X_{*6}^{1(6)} = X_{*1}^{1(6)} + X_{*3}^{1(6)} = 0,1912 + 0,11 = 0,3012;$$

$$X_{*6}^{2(6)} = X_{*1}^{2(6)} + X_{*3}^{2(6)} = 0,2337 + 0,11 = 0,3437.$$

Суммарные сопротивления прямой и обратной последовательностей блока  $G2-T2$  и  $AT$ :

$$X_{*7}^{1(6)} = X_{*2}^{1(6)} + X_{*4}^{1(6)} + X_{*5}^{1(6)} = 0,1912 + 0,105 + 0,1375 = 0,4337;$$

$$X_{*7}^{2(6)} = X_{*2}^{2(6)} + X_{*4}^{2(6)} + X_{*5}^{2(6)} = 0,2337 + 0,105 + 0,1375 = 0,4762.$$

Эквивалентные сопротивления прямой и обратной последовательностей составляют

$$X_{*1эк(6)} = X_{*6}^{1(6)} // X_{*7}^{1(6)} = \frac{0,3012 \cdot 0,4337}{0,3012 + 0,4337} = 0,1777;$$

$$X_{*2эк(6)} = X_{*6}^{2(6)} // X_{*7}^{2(6)} = \frac{0,3437 \cdot 0,4762}{0,3437 + 0,4762} = 0,1996,$$

а эквивалентная ЭДС

$$E_{*эк(6)}'' = \frac{E_{*1}'' X_{*7}^{1(6)} + E_{*2}'' X_{*6}^{1(6)}}{X_{*7}^{1(6)} + X_{*6}^{1(6)}} = \frac{1,105 \cdot 0,4337 + 1 \cdot 0,3012}{0,4337 + 0,3012} = 1,0619.$$

При этом ток прямой последовательности в месте короткого замыкания согласно формуле (12.10)

$$I_{* \text{к1}(\bar{6})} = \frac{E_{* \text{эк}(\bar{6})}''}{X_{* 1\text{эк}(\bar{6})} + X_{* 2\text{эк}(\bar{6})}} = \frac{1,0619}{0,1777 + 0,1996} = 2,8145$$

и напряжение прямой последовательности

$$\dot{U}_{* \text{к1}(\bar{6})} = X_{* 2\text{эк}(\bar{6})} I_{* \text{к1}(\bar{6})} = 2,8145 \cdot 0,1996 = 0,5617.$$

Из схемы замещения (рис. 12.15,б) следует, что ток прямой последовательности в трансформаторе Т1:

$$I_{* 1(\bar{6})} = \frac{E_{* 1(\bar{6})}'' - \dot{U}_{* \text{к1}(\bar{6})}}{X_{* 6^1(\bar{6})}} = \frac{1,105 - 0,5617}{0,3012} = 1,8038,$$

а ток обратной последовательности в том же трансформаторе из схемы замещения обратной последовательности (рис. 12.15,в) с учетом (12.8):

$$I_{* 2(\bar{6})} = I_{* \text{к2}(\bar{6})} \frac{X_{* 7^2(\bar{6})}}{X_{* 6^2(\bar{6})} + X_{* 7^2(\bar{6})}} = -2,8145 \frac{0,4762}{0,3437 + 0,4762} = -1,6348,$$

поэтому суммарный ток в трансформаторе Т1:

$$I_{* 3(\bar{6})} = I_{* 1(\bar{6})} + I_{* 2(\bar{6})} = 1,8038 - 1,6348 = 0,1692$$

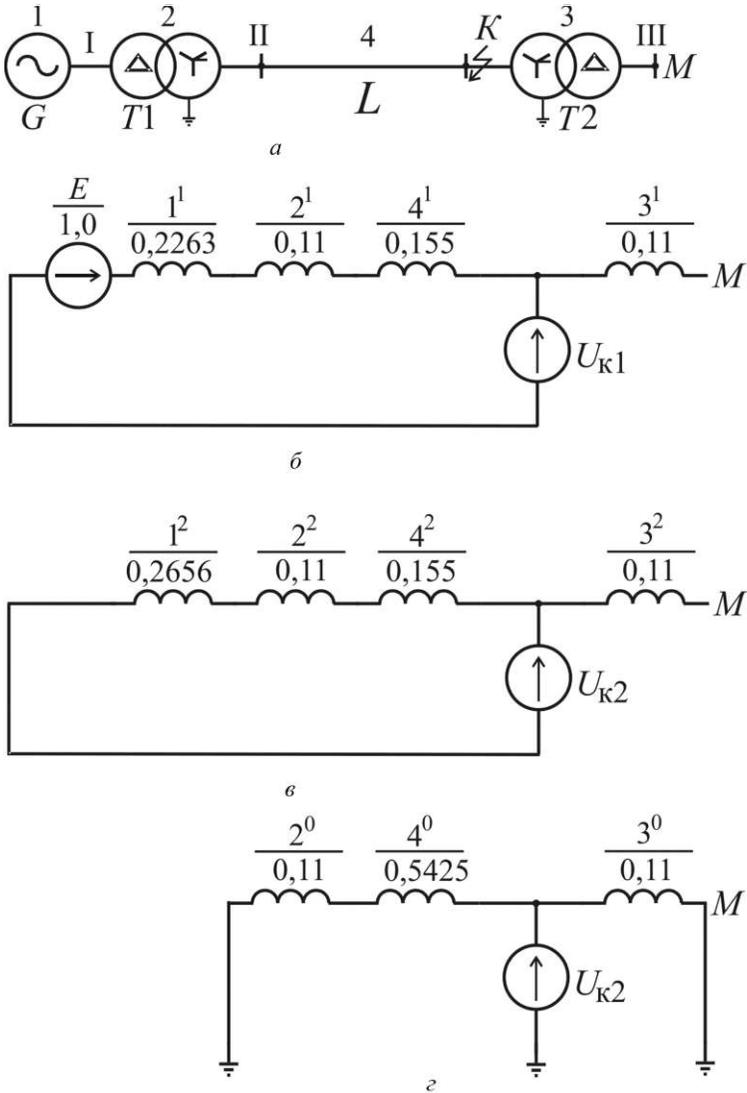
или в именованных единицах

$$I_{\text{к}} = I_{* 3(\bar{6})} I_{\text{БП}} = 0,1692 \cdot 0,6276 = 0,106 \text{ кА}.$$

Очевидно, что ток в обмотке высшего напряжения автотрансформатора должен отличаться от полученного тока только знаком, в чем легко убедиться, определив токи прямой и обратной последовательностей АТ и сложив их с учетом знаков.

**Задача 3.** Блок, состоящий из генератора  $G$  и повышающего трансформатора Т1, связан линией электропередачи  $L$  с подстанцией, на которой установлен трансформатор Т2 (рис. 12.16,а). Определить симметричные составляющие тока генератора и напряжения на стороне обмотки низшего напряжения трансформатора Т2 и построить соответствующие векторные диаграммы токов в генераторе и напряжений за трансформатором Т2 (т.е. со стороны его обмотки низшего

напряжения) в начальный момент двухфазного, однофазного и двухфазного на землю коротких замыканий в точке  $K$  исходной расчетной схемы. До короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением.



**Рис. 12.16. Исходная расчетная схема (а) и схемы замещения прямой (б), обратной (в) и нулевой последовательностей к задаче 3:**  
1 – 4 – порядковые номера элементов; I, III – ступени напряжения

*Исходные данные:*

- генератор  $G$ :  $P_{\text{ном}} = 160 \text{ МВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 18 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;  
 $X_{*1(\text{ном})} = 0,213$ ;  $X_{*2(\text{ном})} = 0,25$ ;
- трансформатор  $T1$ :  $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВ·А}$ ;  $n_T = 230/18 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 11 \%$ ;  
 схема соединения обмоток  $Y_0/\Delta-11$ ;
- трансформатор  $T2$ :  $S_{\text{ном}} = 200 \text{ МВ·А}$ ;  $n_T = 230/10,5 \text{ кВ}$ ;  
 $u_k = 11 \%$ ; схема соединения обмоток  $Y_0/\Delta-11$ ;
- линия электропередачи  $L$ :  $l = 100 \text{ км}$ ,  $X_{\text{линейн}} = 0,41 \text{ Ом/км}$ ,  
 $X_0/X_1 = 3,5$ .

*Решение.* В качестве базисных единиц выбираем:  $S_б = 200 \text{ М·ВА}$ ,  
 $U_б = U_{\text{ср}}$ , т.е.  $U_{б1} = 18 \text{ кВ}$ ,  $U_{бII} = 230 \text{ кВ}$ ,  $U_{бIII} = 10,5 \text{ кВ}$ .

Тогда

$$I_{бI} = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{бI}} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 18} = 6,415 \text{ кА}.$$

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, соответствующие исходной расчетной схеме, приведены на рис. 12.16, б, в, г (в случае двухфазного короткого замыкания для решения поставленной задачи схема замещения нулевой последовательности не нужна). Поскольку трансформатор  $T2$  не нагружен, то в схемы замещения прямой и обратной последовательностей он не входит (в соответствующие схемы замещения его сопротивление введено лишь для того, чтобы показать, что напряжения прямой и обратной последовательностей со стороны обмотки низшего напряжения в относительных единицах численно равны соответствующим напряжениям в месте короткого замыкания).

При выбранных базисных единицах сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов схем замещения составляют:

$$X_{*1(\text{б})} = 0,213 \cdot \frac{200}{160} = 0,2263;$$

$$X_{*1^2(\text{б})} = 0,25 \cdot \frac{200}{160} = 0,2656;$$

$$X_{*2^1(\text{б})} = X_{*3^1(\text{б})} = X_{*2^2(\text{б})} = X_{*3^2(\text{б})} = X_{*2^0(\text{б})} = X_{*3^0(\text{б})} = \frac{11}{100} \cdot \frac{200}{200} = 0,11;$$

$$X_{*4^1(\text{б})} = X_{*4^2(\text{б})} = 0,41 \cdot 100 \cdot \frac{200}{230^2} = 0,155;$$

$$X_{*4^{(6)}}^u = 3,5 X_{*4^{(6)}}^1 = 3,5 \cdot 0,155 = 0,5425.$$

Сверхпереходная ЭДС генератора, имея в виду, что до короткого замыкания последний работал на холостом ходу с номинальным напряжением, равна

$$E_{*}''(6) = 1,0.$$

Эквивалентные сопротивления схем замещения разных последовательностей составляют:

$$X_{*1^{эк(6)}} = X_{*1^{(6)}} + X_{*2^{(6)}} + X_{*4^{(6)}} = 0,2263 + 0,11 + 0,155 = 0,4913;$$

$$X_{*2^{эк(6)}} = X_{*1^{(6)}} + X_{*2^{(6)}} + X_{*4^{(6)}} = 0,2656 + 0,11 + 0,155 = 0,5306;$$

$$X_{*0^{эк(6)}} = \left( X_{*2^{(6)}} + X_{*4^{(6)}} \right) // X_{*3^{(6)}} = (0,11 + 0,5425) // 0,11 = 0,0941.$$

При *двухфазном коротком замыкании* токи прямой и обратной последовательностей в месте короткого замыкания согласно формулам (12.8) и (12.10):

$$I_{*к1(6)} = -I_{*к2(6)} = \frac{E_{*}''(6)}{X_{*1^{эк(6)}} + X_{*2^{эк(6)}}} = \frac{1}{0,4913 + 0,5306} = 0,9785.$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей согласно схемам замещения (см. рис. 15.16, б и в) и с учетом (12.9):

$$U_{*к1(6)} = U_{*к2(6)} = E_{*}''(6) - I_{*к1(6)} X_{*1^{эк(6)}} = 1 - 0,9785 \cdot 0,4913 = 0,5192.$$

Эти же напряжения можно определить используя формулы (12.64) и (12.9)

$$U_{*к1(6)} = U_{*к2(6)} = I_{*к1(6)} \Delta X_{*}^{(2)} = 0,9785 \cdot 0,5306 = 0,5192,$$

где  $\Delta X_{*}^{(2)} = X_{*2^{эк(6)}}.$

Как видно из схем замещения, при заданных условиях (трансформатор  $T2$  не нагружен) относительные значения токов прямой (обратной) последовательности в ветви генератора и в месте короткого замыкания равны. Также равны относительные значения напряжений прямой (обратной) последовательности за трансформатором  $T2$  (точка  $M$ ) и в месте короткого замыкания.

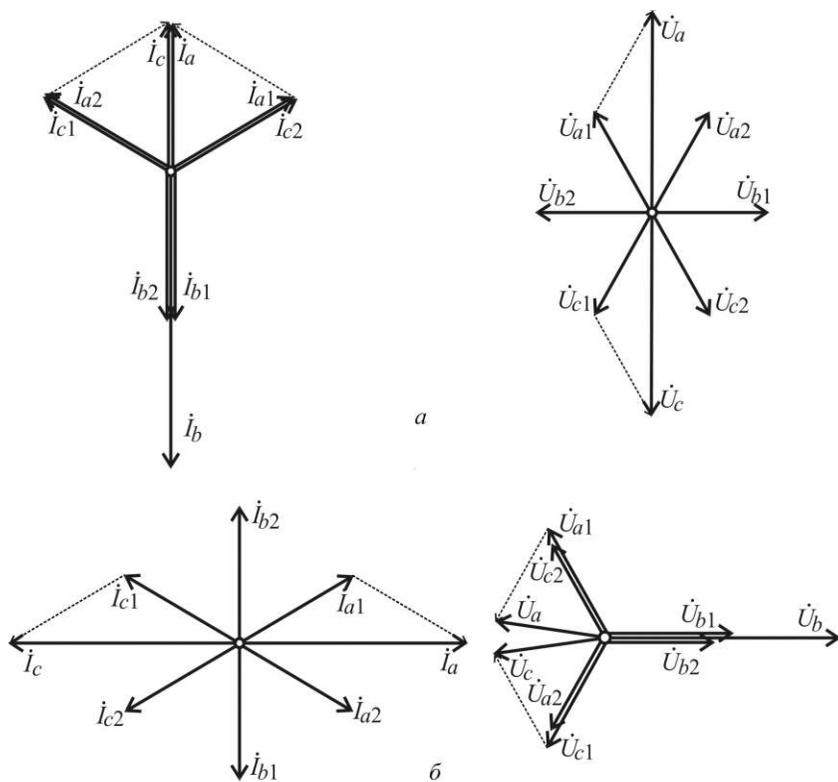
Поэтому в именованных единицах для соответствующей ступени напряжения:

$$|I_{a1}| = \left| I_{* \kappa 1(6)} I_{61} \right| = 0,9785 \cdot 6,415 = 6,277 \text{ кА};$$

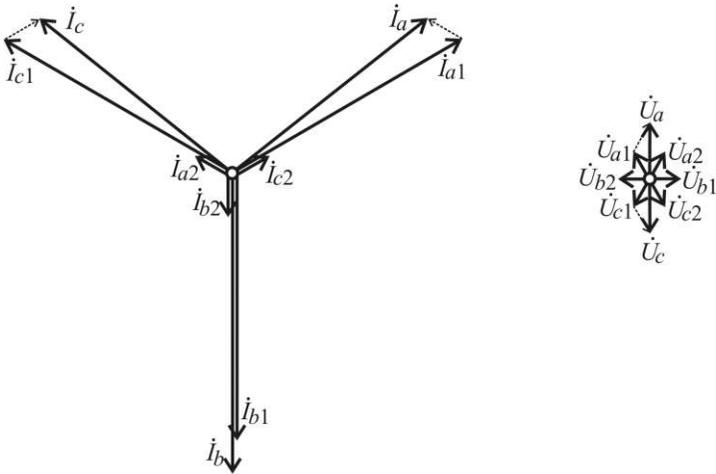
$$|U_{Ma1}| = |U_{Ma2}| = \left| U_{* \kappa 1(6)} U_{6\text{III}\Phi} \right| = 0,5192 \cdot 10,5 / \sqrt{3} = 3,147 \text{ кВ},$$

где  $U_{6\text{III}\Phi}$  – базисное фазное напряжение ступени напряжения III.

С учетом групп соединения трансформаторов  $T1$  и  $T2$  векторные диаграммы токов генератора и напряжений за трансформатором  $T2$  при коротком замыкании в конце линии  $L$  имеют вид, показанный на рис. 12.17,а.



**Рис.12.17.** Векторные диаграммы токов генератора и напряжений в точке  $M$  расчетной схемы (см. рис. 12.16,а) при двухфазном (а), однофазном (б) и двухфазном на землю (в) коротком замыкании (к задаче 3)



в

Окончание рис. 12.17

При *однофазном коротком замыкании* токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания согласно формулам (12.20) и (12.21):

$$\begin{aligned}
 I_{*k1(б)} &= I_{*k2(б)} = I_{*k0(б)} = \frac{E''_{*}(б)}{X_{*1эк(б)} + X_{*2эк(б)} + X_{*0эк(б)}} = \\
 &= \frac{1}{0,4913 + 0,5306 + 0,0941} = 0,896.
 \end{aligned}$$

Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей согласно формулам (12.64), (12.2) и (12.3):

$$U_{*k1(б)} = I_{*k1(б)} \Delta X_{*}^{(1)} = 0,896(0,5306 + 0,0941) = 0,5597,$$

где  $\Delta X_{*}^{(1)} = X_{*2эк(б)} + X_{*0эк(б)}$ ;

$$U_{*k2(б)} = -I_{*k2(б)} X_{*2эк(б)} = -0,896 \cdot 0,5306 = -0,4754;$$

$$U_{*k0(б)} = -I_{*k0(б)} X_{*0эк(б)} = -0,896 \cdot 0,0941 = -0,0843.$$

Что касается относительных значений токов и напряжений прямой (обратной) последовательностей в точках, где требуется построить векторные диаграммы, то изложенное при рассмотрении

случая двухфазного короткого замыкания остается справедливым и в данном случае. Кроме того ток нулевой последовательности генератора и напряжение нулевой последовательности за трансформатором  $T2$  равны нулю (так как оба трансформатора имеют схему соединения обмоток  $Y_n/\Delta-11$ ).

Поэтому в именованных единицах для соответствующей ступени напряжения:

$$|I_{a1}| = \left| I_{*k1(6)} I_{6I} \right| = 0,896 \cdot 6,415 = 5,7478 \text{ кА};$$

$$|U_{Ma1}| = \left| U_{*k1(6)} U_{6III\Phi} \right| = 0,5597 \cdot 10,5 / \sqrt{3} = 3,3931 \text{ кВ};$$

$$|U_{Ma2}| = \left| U_{*k2(6)} U_{6III\Phi} \right| = 0,4754 \cdot 10,5 / \sqrt{3} = 2,882 \text{ кВ}.$$

где  $U_{6III\Phi}$  – базисное фазное напряжение ступени напряжения III.

С учетом групп соединения трансформаторов  $T1$  и  $T2$  векторные диаграммы токов генератора и напряжений за трансформатором  $T2$  имеют вид показанный на рис. 12.17,б.

В случае *двухфазного короткого замыкания на землю* токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания согласно формулам (12.34), (12.32) и (12.33):

$$I_{*k1(6)} = \frac{E_*''(6)}{X_{*1\text{эк}(6)} + X_{*2\text{эк}(6)} // X_{*0\text{эк}(6)}} = \frac{1}{0,4913 + \frac{0,5306 \cdot 0,0941}{0,5306 + 0,0941}} = 1,7506;$$

$$I_{*k2(6)} = -I_{*k1(6)} \frac{X_{*0\text{эк}(6)}}{X_{*2\text{эк}(6)} + X_{*0\text{эк}(6)}} = -1,7506 \frac{0,0941}{0,5306 + 0,0941} = -0,2637;$$

$$I_{*k0(6)} = -I_{*k1(6)} \frac{X_{*2\text{эк}(6)}}{X_{*2\text{эк}(6)} + X_{*0\text{эк}(6)}} = -1,7506 \frac{0,5306}{0,5306 + 0,0941} = -1,4869.$$

Напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей согласно формуле (12.64) с учетом (12.30):

$$U_{*k1(6)} = U_{*k2(6)} = U_{*k0(6)} = I_{*k1(6)} \Delta X_*^{(1,1)} = 1,7506 \frac{0,5306 \cdot 0,0941}{0,5306 + 0,0941} = 0,14,$$

где  $\Delta X_*^{(1,1)} = X_{*2\text{эк}(6)} // X_{*0\text{эк}(6)}$ .

Что касается относительных значений токов и напряжений прямой (обратной) последовательностей в точках, где требуется построить векторные диаграммы, то изложенное при рассмотрении случая однофазного короткого замыкания остается справедливым и в данном случае.

Поэтому в именованных единицах для соответствующей степени напряжения:

$$|I_{a1}| = \left| I_{* \kappa 1(6)} I_{6I} \right| = 1,7506 \cdot 6,415 = 11,23 \text{ кА};$$

$$|I_{a2}| = \left| I_{* \kappa 2(6)} I_{6I} \right| = 0,2637 \cdot 6,415 = 1,6916 \text{ кА};$$

$$|U_{Ma1}| = |U_{Ma2}| = \left| U_{* \kappa 1(6)} U_{6III\Phi} \right| = 0,14 \cdot 10,5 / \sqrt{3} = 0,8487 \text{ кВ},$$

где  $U_{6III\Phi}$  – базисное фазное напряжение ступени напряжения III.

С учетом групп соединения трансформаторов  $T1$  и  $T2$  векторные диаграммы токов генератора и напряжений за трансформатором  $T2$  имеют вид показанный на рис. 12.17,в.

## ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

---

---

# РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

---

---

### 13.1. Общие замечания

В отличие от несимметричных коротких замыканий, которые быстро отключаются под действием релейной защиты, несимметричные режимы, вызванные продольной несимметрией, могут быть продолжительными (например, при обрыве провода воздушной линии электропередачи), что 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 обратно вращающегося 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. У некоторых контактов сопротивление может оказаться большим, чем остальных, поэтому энергия 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  $Y_0/\Delta-11$ , 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 ее магнитной и электрической несимметрии. 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 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. 13.1), причем индуктивные сопротивления всех элементов этой схемы известны, а их активные сопротивления незначительны и не учитываются;
- 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.

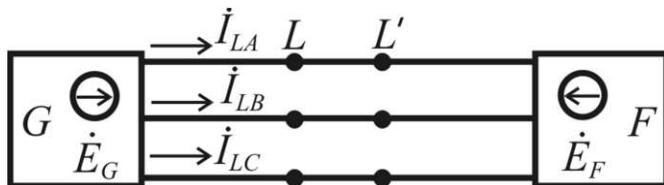


Рис. 13.1. Исходная расчетная схема

Как было показано ранее (см. гл. 9), все ЭДС самоиндукции, наводимые в цепи якоря синхронной машины магнитными полями, обусловленными токами прямой, обратной и нулевой последовательностей, целесообразно учитывать в виде взятых с обратным знаком падений напряжения от этих токов в соответствующих сопротивлениях, что позволяет ЭДС обратной и нулевой последовательностей принимать равными нулю. При этом симметричные составляющие падений напряжения в месте несимметрии связаны с симметричными составляющими токов соотношениями (они справедливы как для особой, так и для любой другой фазы)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{L1\text{ЭК}} \dot{I}_{LA1}; \quad (13.1)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = 0 - jX_{L2\text{ЭК}} \dot{I}_{LA2}; \quad (13.2)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA0} = 0 - jX_{L0\text{ЭК}} \dot{I}_{LA0}, \quad (13.3)$$

где  $X_{L1\text{ЭК}}$ ,  $X_{L2\text{ЭК}}$ ,  $X_{L0\text{ЭК}}$  – результирующие эквивалентные сопротивления 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.

## 13.2. Обрыв одной фазы

При обрыве одной фазы граничные условия (см. рис. 13.2) таковы:

1) ток оборванной (особой) фазы (фазы *A*) равен нулю

$$\dot{I}_{LA} = 0; \quad (13.4)$$

2) падение напряжения между точками *L* и *L'* проводника фазы *B* равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0; \quad (13.5)$$

3) падение напряжения между точками *L* и *L'* проводника фазы *C* равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (13.6)$$

Условие (13.4), выраженное через симметричные составляющие тока особой фазы, имеет вид:

$$\dot{I}_{LA} = \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = 0. \quad (13.7)$$

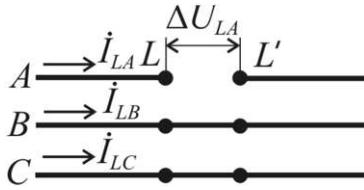


Рис. 13.2. Обрыв одной фазы

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 (13.5) и (13.6),

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

Аналогичные расчеты для  $\Delta \dot{U}_{LA2}$  и  $\Delta \dot{U}_{LA0}$  дают:

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

и

$$\Delta \dot{U}_{LA0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}.$$

Таким образом

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{LA0} = \frac{1}{3} \Delta \dot{U}_{LA}. \quad (13.8)$$

В соответствии с (13.8) можно приравнять правые части уравнений (13.2) и (13.3):

$$X_{L2\text{эк}} \dot{I}_{LA2} = X_{L0\text{эк}} \dot{I}_{LA0},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA0} = \frac{X_{L2\text{эк}}}{X_{L0\text{эк}}} \dot{I}_{LA2}. \quad (13.9)$$

Подстановка этого выражения в (13.7) дает:

$$\dot{I}_{LA1} + \left( 1 + \frac{X_{L2\text{эк}}}{X_{L0\text{эк}}} \right) \dot{I}_{LA2} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\dot{I}_{LA1}}{\left(1 + \frac{X_{L2\varepsilon\kappa}}{X_{L0\varepsilon\kappa}}\right)} = -\frac{X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.10)$$

Если подставить последнее выражение в (13.7), то получим:

$$\dot{I}_{LA0} = -\frac{X_{L2\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.11)$$

Чтобы получить искомое расчетное выражение для тока прямой последовательности  $\dot{I}_{LA1}$ , следует в соответствии с (13.8) приравнять правые части уравнений (13.1) и (13.2) и в полученном равенстве ток  $\dot{I}_{LA2}$  выразить через  $\dot{I}_{LA1}$ , используя выражение (13.10). При этом

$$\dot{E}_{\varepsilon\kappa} - jX_{L1\varepsilon\kappa} \dot{I}_{LA1} = j\frac{X_{L2\varepsilon\kappa}X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}} \dot{I}_{LA1},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\varepsilon\kappa}}{j\left(X_{L1\varepsilon\kappa} + \frac{X_{L2\varepsilon\kappa}X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}}\right)}, \quad (13.12)$$

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 дополнительное сопротивление  $\Delta X_L^{(1)}$ , равное параллельно соединенным эквивалентным сопротивлениям схем обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва, т.е.

$$\Delta X_L^{(1)} = \frac{X_{L2\varepsilon\kappa}X_{L0\varepsilon\kappa}}{X_{L2\varepsilon\kappa} + X_{L0\varepsilon\kappa}}. \quad (13.13)$$

А токи обратной и нулевой последовательностей особой фазы, как видно из (13.10) и (13.11), направлены в противоположном направлении и в сумме с  $\dot{I}_{LA1}$  дают нуль.

Векторная диаграмма токов при обрыве одной фазы представлена на рис. 13.3.

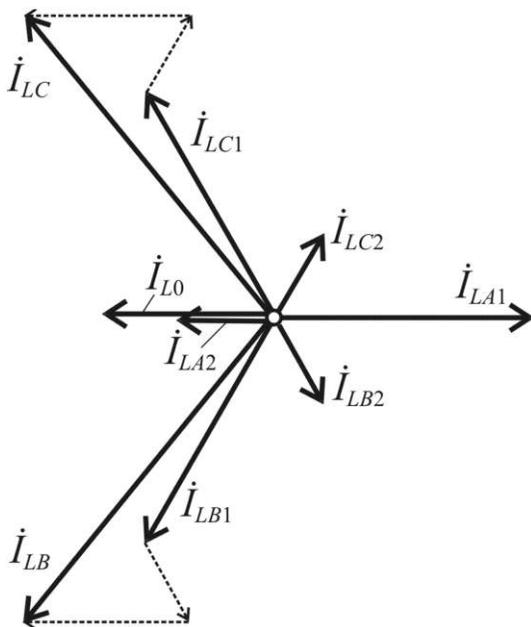


Рис. 13.3. Векторная диаграмма токов в месте обрыва одной фазы

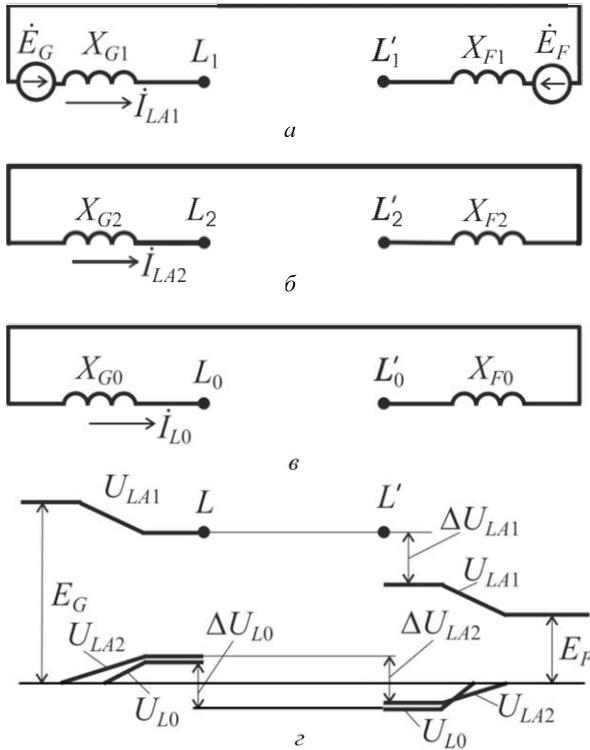
Для определения падения напряжения прямой последовательности особой фазы в месте ее обрыва можно воспользоваться формулой (13.1). Однако чаще используют формулу, получаемую путем исключения из указанной формулы ЭДС  $E_{\text{эк}}$  с помощью (13.12).

При этом искомая формула принимает вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = j \frac{X_{L2\text{эк}} X_{L0\text{эк}}}{X_{L2\text{эк}} + X_{L0\text{эк}}} \dot{I}_{LA1} = j \Delta X_L^{(1)} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.14)$$

Чтобы построить векторные диаграммы напряжений в точках обрыва  $L$  и  $L'$ , следует, используя схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (см. рис. 13.4 *a, 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 любой последовательности, следует идти к точке  $L$  слева, учитывая в схеме 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 прямой последовательности ЭДС источника  $E_F$  и падение напряжения в эквивалентном сопротивлении прямой последовательности левой части схемы  $X_{F1}$ , а в схемах обратной и нулевой

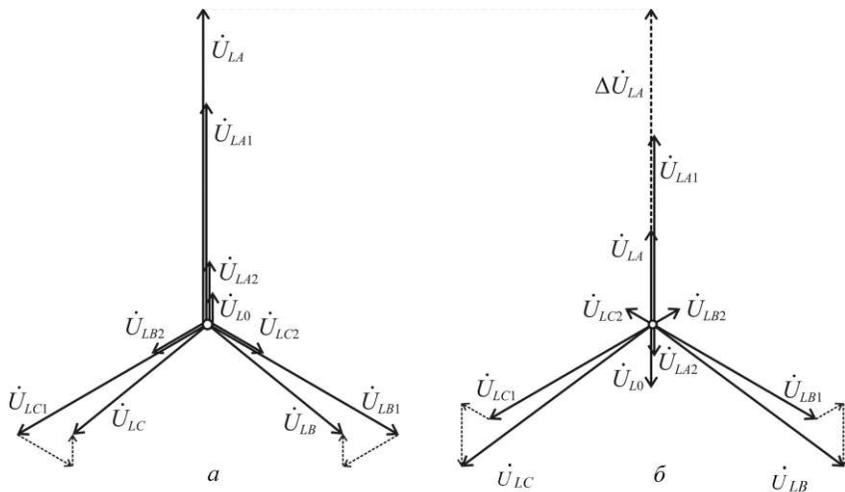
последовательностей – падения напряжений в сопротивлениях  $X_{G2}$  и  $X_{G0}$  или  $X_{F2}$  и  $X_{F0}$ . Затем, учитывая симметричные составляющие падения напряжения в месте обрыва для особой фазы  $\Delta \dot{U}_{LA1}$ ,  $\Delta \dot{U}_{LA2}$  и  $\Delta \dot{U}_{LA0}$ , определить симметричные составляющие напряжения этой фазы с другой стороны обрыва.



**Рис. 13.4.** Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей и эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы (г)

При этом удобно пользоваться эпюрами распределения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, показанными на рис. 13.4г (эпюру распределения напряжения нулевой последовательности условно показан короче других, так как обычно схема нулевой последовательности содержит меньше элементов, чем схемы прямой и обратной последовательностей). Как видно из рис. 13.4г, 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. 13.5. Из этих диаграмм и формулы (13.8) 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. 13.5. 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 эфир распределения напряжений (см. рис. 13.4з), неодинаковы. Чтобы обеспечить выполнение соотношений (13.7) и (13.8) и не смещать потенциалы в схемах прямой и обратной 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. 13.6. 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.

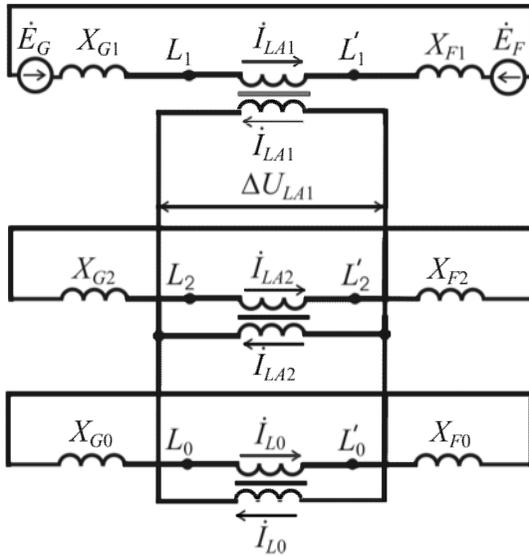


Рис. 13.6. Комплексная схема замещения при обрыве одной фазы

Более широкое применение, однако, находит упрощенная комплексная схема замещения, которая представлена на рис. 13.7. Она получена непосредственным соединением между собой точек  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_0$  и  $L'_1$ ,  $L'_2$ ,  $L'_0$ . При этом потенциалы во всех точках схем замещения обратной и нулевой последовательностей, в том числе и в началах схем, оказываются смещенными.

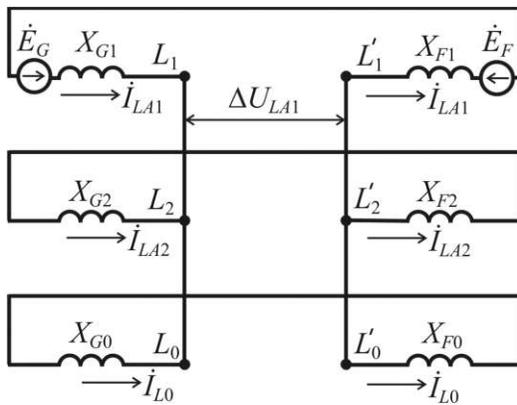


Рис. 13.7. Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве одной фазы

### 13.3. Обрыв двух фаз

При обрыве двух фаз граничные условия (см. рис. 13.8) выражаются следующим образом:

1) падение напряжения между точками  $L$  и  $L'$  особой фазы (фазы  $A$ ) равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LA} = 0; \quad (13.15)$$

2) ток оборванной фазы  $B$  равен нулю

$$\dot{I}_{LB} = 0; \quad (13.16)$$

3) ток оборванной фазы  $C$  равен нулю

$$\dot{I}_{LC} = 0. \quad (13.17)$$

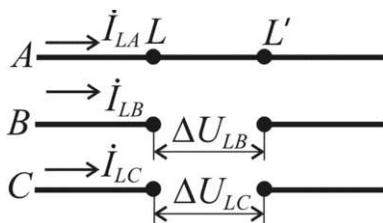


Рис. 13.8. Обрыв двух фаз

Условие (13.15), выраженное через симметричные составляющие падения напряжения между точками  $L$  и  $L'$  особой фазы, можно представить так:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = \Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0. \quad (13.18)$$

Используя формулы для определения симметричных составляющих тока фазы  $A$  по значениям полных токов разных фаз и принимая во внимание условия (13.16) и (13.17), получим:

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{LA}. \quad (13.19)$$

Чтобы найти расчетное выражение для определения тока прямой последовательности неповрежденной фазы  $\dot{I}_{LA1}$ , следует сложить левые и правые части уравнений (13.1) – (13.3) и принять во внимание (13.18) и (13.19):

$$0 = \dot{E}_{\text{ЭК}} - j(X_{L1\text{ЭК}} + X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}) \dot{I}_{LA1},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{j(X_{L1\text{ЭК}} + X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}})}, \quad (13.20)$$

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 дополнительное сопротивление  $\Delta X_L^{(2)}$ , равное последовательно соединенным эквивалентным сопротивлениям схем замещения обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва, т.е.

$$\Delta X_L^{(2)} = X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}. \quad (13.21)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей, как видно из (13.19), 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. 13.9.

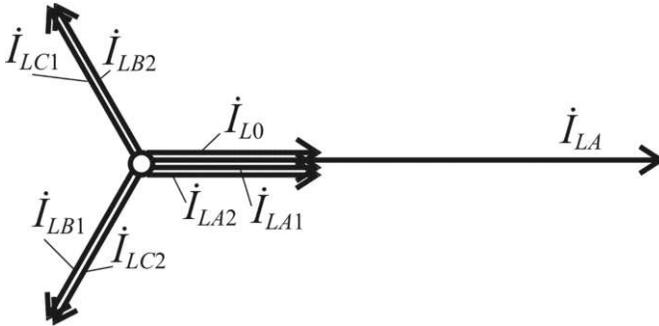


Рис. 13.9. Векторная диаграмма токов в месте обрыва двух фаз

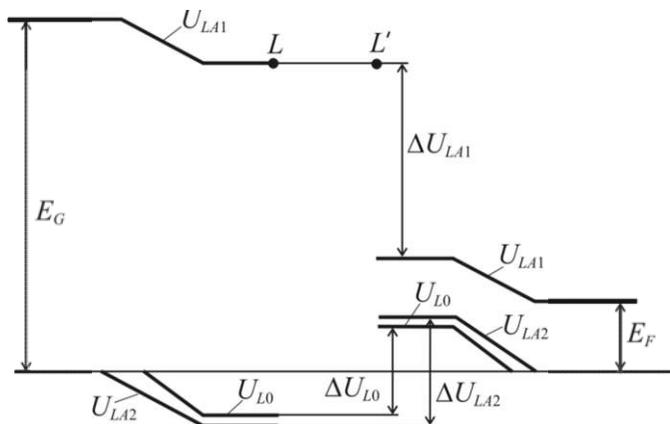
Падение напряжения прямой последовательности в особой фазе между точками  $L$  и  $L'$  может быть определено или по формуле (13.1), или по формуле, получаемой путем исключения из (13.1) ЭДС  $E_{\text{ЭК}}$ , используя с этой целью формулу (13.20). В результате формула приобретает вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = j(X_{L2\text{ЭК}} + X_{L0\text{ЭК}}) \dot{I}_{LA1} = j\Delta X_L^{(2)} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.22)$$

Соответствующие падения напряжения обратной и нулевой последовательностей в особой фазе определяют по формулам (13.2) и (13.3).

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  $L'$ . А затем, учитывая симметричные составляющие падения напряжения в месте обрыва для особой фазы, определяемые по формулам (13.22), (13.2) и (13.3), находят симметричные составляющие напряжения этой фазы с другой стороны обрыва. Поскольку при обрыве двух фаз не только ток прямой последовательности положительны (и численно равны друг другу), но и токи обратной и нулевой последовательностей положительны (и численно равны друг другу), то со стороны большей ЭДС напряжения обратной и нулевой последовательностей 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 (13.18),  $\Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = -\Delta \dot{U}_{LA1}$ ).

Характер эпюр распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы при обрыве двух фаз показан на рис. 13.10, а векторные диаграммы напряжений в точках обрыва  $L$  и  $L'$  представлены на рис. 13.11. Очевидно, при переходе от точки  $L$  к точке  $L'$  остается неизменным только напряжение неповрежденной фазы.



**Рис. 13.10.** Эпюры распределения симметричных составляющих напряжения особой фазы при обрыве двух фаз

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 обратной и нулевой последовательностей, возможна как и при обрыве одной фазы только при использовании для связи схем различных последовательностей идеаль-

ных трансформаторов с коэффициентом трансформации  $n = 1/1$ . Такая схема приведена на рис. 13.12. В ней связывающая часть, получаемая путем последовательного соединения вторичных обмоток идеальных трансформаторов, обеспечивает равенство симметричных составляющих тока здоровой фазы (соотношение (13.19)) и равенство нулю суммы симметричных составляющих падения напряжения между точками  $L$  и  $L'$  (соотношение (13.18)).

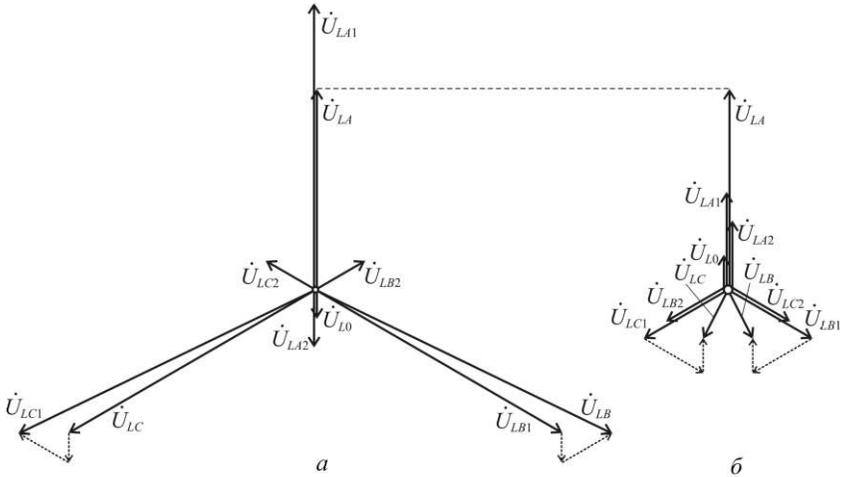


Рис. 13.11. Векторные диаграммы напряжений в точках  $L$  (а) и  $L'$  (б)

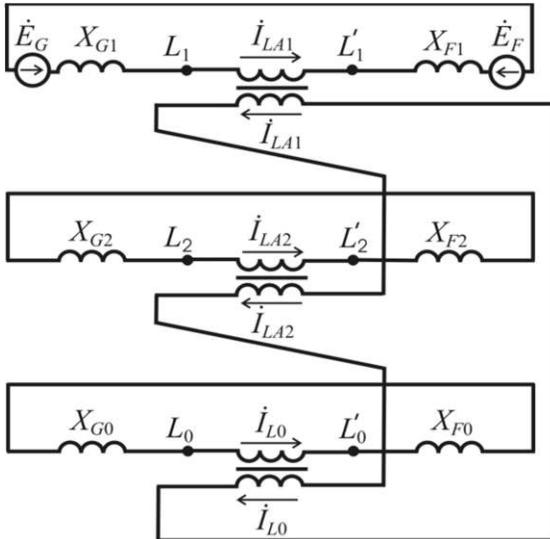


Рис. 13.12. Комплексная схема замещения при обрыве двух фаз

Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве двух фаз показана на рис. 13.13. 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 (13.19), соблюдается.

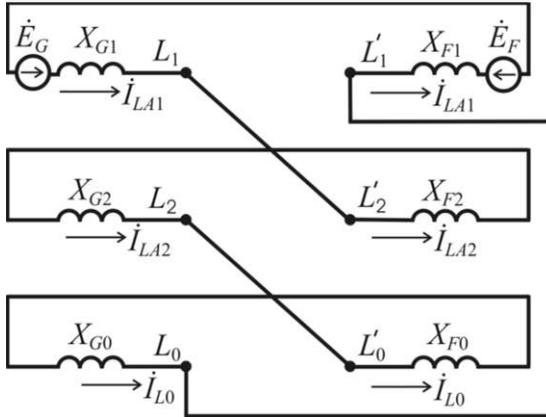


Рис. 13.13. Упрощенная комплексная схема замещения при обрыве двух фаз

### 13.4. Включение в одну из фаз элемента с сопротивлением

При включении сопротивления  $\underline{Z}$  в одну из фаз (фазу  $A$ ) граничные условия, как следует из рис. 13.14, таковы:

1) падение напряжения на сопротивлении  $\underline{Z}$ , включенном в фазу  $A$ , составляет

$$\Delta \dot{U}_{LA} = \underline{Z} \dot{I}_{LA}; \quad (13.23)$$

2) падение напряжения между точками  $L$  и  $L'$  проводника фазы  $B$  равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LB} = 0; \quad (13.24)$$

3) падение напряжения между точками  $L$  и  $L'$  проводника фазы  $C$  равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (13.25)$$

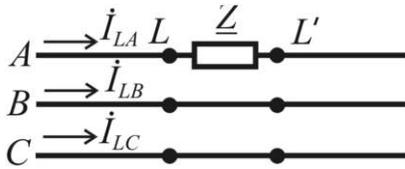


Рис. 13.14. Включение элемента с сопротивлением  $\underline{Z}$  в фазу  $A$

Поскольку при включении в фазу  $A$  сопротивления  $\underline{Z}$  второе и третье граничные условия те же, что и при обрыве этой фазы, то равенства (13.8) справедливы и в рассматриваемом случае. Справедливо и соотношение (13.9).

Первое граничное условие, указанное выше, с учетом (13.8) можно записать так:

$$\Delta \dot{U}_{LA} = \underline{Z} \left( \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} \right) = 3 \Delta \dot{U}_{LA2},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = \frac{\Delta \dot{U}_{LA2}}{\underline{Z}/3}.$$

Если с помощью (13.9) исключить из этого выражения  $\dot{I}_{LA0}$  и учесть (13.2), то получим

$$\left( 1 + \frac{jX_{L2эк}}{jX_{L0эк}} + j \frac{jX_{L2эк}}{\underline{Z}/3} \right) \dot{I}_{LA2} = -\dot{I}_{LA1},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = - \frac{1}{jX_{L2эк} \left( \frac{1}{jX_{L2эк}} + \frac{1}{jX_{L0эк}} + \frac{1}{\underline{Z}/3} \right)} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.26)$$

Чтобы получить расчетное выражение для тока прямой последовательности, следует в соответствии с (13.8) приравнять правые части (13.1) и (13.2) и исключить из полученного равенства ток  $\dot{I}_{LA2}$  с помощью (13.26):

$$\dot{E}_{эк} - jX_{L1эк} \dot{I}_{LA1} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{L2эк}} + \frac{1}{jX_{L0эк}} + \frac{1}{\underline{Z}/3}} \dot{I}_{LA1},$$

откуда ток прямой последовательности особой фазы (фазы  $A$ ) при включении в нее сопротивления  $\underline{Z}$

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma K}}{jX_{L1\Sigma K} + \frac{1}{\frac{1}{jX_{L2\Sigma K}} + \frac{1}{jX_{L0\Sigma K}} + \frac{1}{\underline{Z}/3}}}, \quad (13.27)$$

где верхний индекс (1) обозначает включение сопротивления в одну фазу, или

$$\dot{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma K}}{jX_{L1\Sigma K} + jX_{L2\Sigma K} // jX_{L0\Sigma K} // \underline{Z}/3} = \frac{\dot{E}_{\Sigma K}}{jX_{L1\Sigma K} + \Delta Z_L^{(1)}}, \quad (13.27a)$$

где

$$\Delta Z_L^{(1)} = jX_{L2\Sigma K} // jX_{L0\Sigma K} // \underline{Z}/3. \quad (13.28)$$

Выражение (13.27a) показывает, что для определения тока прямой последовательности при включении в одну из фаз сопротивления  $\underline{Z}$  необходимо в каждую фазу между точками  $L$  и  $L'$  включить одинаковые сопротивления, равные  $\Delta Z_L^{(1)}$  и представляющие собой параллельно соединенные сопротивления  $X_{L2\Sigma K}$ ,  $X_{L0\Sigma K}$  и  $\underline{Z}/3$ .

При найденном токе прямой последовательности ток обратной последовательности определяется по формуле (13.26), которую можно представить так:

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\Delta Z_L^{(1)}}{jX_{L2\Sigma K}} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.29)$$

Ток нулевой последовательности в соответствии с формулами (13.9) и (13.29)

$$\dot{I}_{L0} = -\frac{\Delta Z_L^{(1)}}{jX_{L0\Sigma K}} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.30)$$

Для определения падения напряжения прямой последовательности на сопротивлении  $\underline{Z}$  можно использовать формулу (13.1) или

формулу, получаемую исключением из (13.1) ЭДС  $E_{эк}$  с помощью (13.27а)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \left( jX_{L2эк} // jX_{L0эк} // \underline{Z} / 3 \right) \dot{I}_{LA1} = \Delta \underline{Z}_{L'}^{(1)} \dot{I}_{LA1}. \quad (13.31)$$

Зная параметры исходной расчетной схемы и значение включаемого сопротивления, нетрудно определить симметричные составляющие токов особой фазы, симметричные составляющие потенциала в точке  $L$  или  $L'$ , падение напряжения прямой последовательности на сопротивлении  $Z$ , что 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. 13.15. Упрощенная комплексная схема замещения, которая справедлива только для симметричных составляющих тока фазы  $A$ , а потенциалы в схемах обратной и нулевой последовательностей смещены, приведена на рис. 13.16.

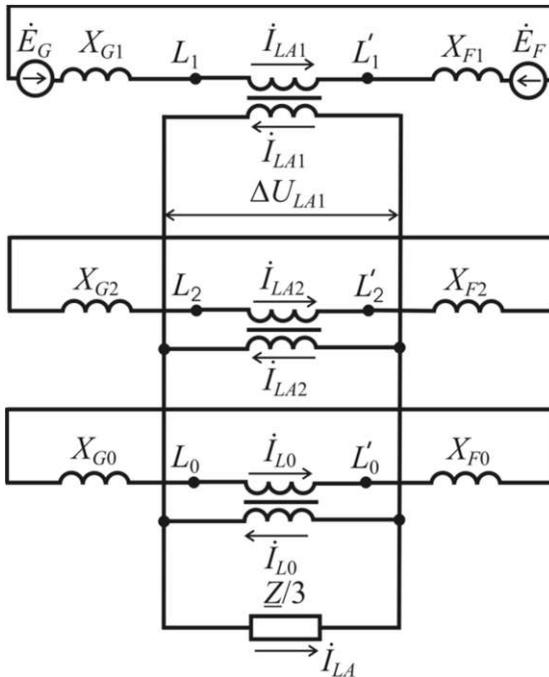


Рис. 13.15. Комплексная схема замещения при включении в фазу  $A$  элемента с сопротивлением  $Z$

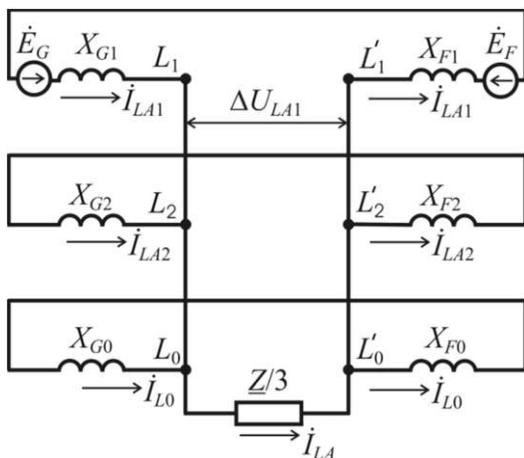


Рис. 13.16. Упрощенная комплексная схема замещения при включении в фазу  $A$  элемента с сопротивлением  $\underline{Z}$

### 13.5. Включение в две фазы элементов с одинаковым сопротивлением

В случае включения одинаковых сопротивлений  $\underline{Z}$  в фазы  $B$  и  $C$  граничные условия (см. рис. 13.17) таковы:

1) падение напряжения между точками  $L$  и  $L'$  проводника особой фазы (фазы  $A$ ) равно нулю

$$\Delta \dot{U}_{LA} = 0; \quad (13.32)$$

2) падение напряжения на сопротивлении  $\underline{Z}$ , включенном в фазу  $B$ , составляет

$$\Delta \dot{U}_{LB} = \underline{Z} \dot{I}_{LB}; \quad (13.33)$$

3) падение напряжения на сопротивлении  $\underline{Z}$ , включенном в фазу  $C$ , составляет

$$\Delta \dot{U}_{LC} = \underline{Z} \dot{I}_{LC}. \quad (13.34)$$

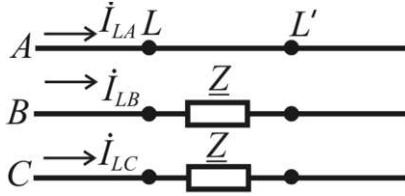


Рис. 13.17. Включение элементов с сопротивлением  $\underline{Z}$  в фазы  $B$  и  $C$

Первое условие, выраженное через симметричные составляющие падения напряжения, имеет вид:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0. \quad (13.35)$$

Составляющая падения напряжения прямой последовательно-сти особой фазы (фазы  $A$ ) с учетом (13.32) – (13.34) равна

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{1}{3} \left( \underline{Z} a \dot{I}_{LB} + \underline{Z} a^2 \dot{I}_{LC} \right) = \\ &= \frac{\underline{Z}}{3} \left[ a \left( \dot{I}_{LB1} + \dot{I}_{LB2} + \dot{I}_{LB0} \right) + a^2 \left( \dot{I}_{LC1} + \dot{I}_{LC2} + \dot{I}_{LC0} \right) \right]. \end{aligned}$$

Входящие в это выражение симметричные составляющие фаз  $B$  и  $C$  целесообразно выразить через симметричные составляющие тока особой фазы:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{LA1} &= \frac{\underline{Z}}{3} \left[ a \left( a^2 \dot{I}_{LA1} + a \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} \right) + a^2 \left( a \dot{I}_{LA1} + a^2 \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} \right) \right] = \\ &= \frac{\underline{Z}}{3} \left( 2 \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA0} \right). \end{aligned} \quad (13.36)$$

Таким же путем могут быть получены выражения для  $\Delta \dot{U}_{LA2}$  и  $\Delta \dot{U}_{LA0}$ :

$$\Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{\underline{Z}}{3} \left( 2 \dot{I}_{LA2} - \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA0} \right); \quad (13.37)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA0} = \frac{\underline{Z}}{3} \left( 2 \dot{I}_{LA0} - \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} \right). \quad (13.38)$$

Чтобы получить расчетное выражение для определения тока прямой последовательности особой фазы, необходимо предварительно токи обратной и нулевой последовательностей выразить через ток прямой последовательности. С этой целью следует в формулах (13.36) – (13.38) симметричные составляющие падения напряжения

$\Delta \dot{U}_{LA1}$ ,  $\Delta \dot{U}_{LA2}$  и  $\Delta \dot{U}_{LA0}$  заменить их выражениями, используя уравнения (13.1) – (13.3), и сначала найти разности левых (записанных указанным способом) и правых частей (13.36) и (13.37):

$$\dot{E}_{\text{ЭК}} - jX_{L1\text{ЭК}} \dot{I}_{LA1} + jX_{L2\text{ЭК}} \dot{I}_{LA2} = Z \left( \dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2} \right),$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = - \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}} - \left( jX_{L1\text{ЭК}} + Z \right) \dot{I}_{LA1}}{jX_{L2\text{ЭК}} + Z}. \quad (13.39)$$

А из разности левых и правых частей (13.36) и (13.38) следует:

$$\dot{I}_{LA0} = - \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}} - \left( jX_{L1\text{ЭК}} + Z \right) \dot{I}_{LA1}}{jX_{L0\text{ЭК}} + Z}. \quad (13.40)$$

Выражения (13.39) и (13.40) позволяют исключить из уравнений (13.2) и (13.3) токи  $\dot{I}_{LA2}$  и  $\dot{I}_{LA0}$ . Если теперь сложить левые и правые части уравнений (13.1) – (13.3) и учесть (13.35), то после соответствующих преобразований получим следующую формулу для определения тока прямой последовательности при включении одинаковых сопротивлений в две фазы:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{LA1}^{(II)} &= \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \frac{\left( \frac{jX_{L2\text{ЭК}} Z}{jX_{L2\text{ЭК}} + Z} + \frac{jX_{L0\text{ЭК}} Z}{jX_{L0\text{ЭК}} + Z} \right) Z} = \\ &= \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \left[ \left( jX_{L2\text{ЭК}} // Z + jX_{L0\text{ЭК}} // Z \right) // Z} \right]}, \end{aligned} \quad (13.41)$$

где верхний индекс (II) обозначает включение сопротивления в две фазы, или

$$\dot{i}_{L,A1}^{(II)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \Delta Z_L^{(II)}}, \quad (13.42)$$

где

$$\Delta Z_L^{(II)} = \left[ \left( jX_{L2\text{ЭК}} // \underline{Z} + jX_{L0\text{ЭК}} // \underline{Z} \right) \right] // \underline{Z}. \quad (13.43)$$

Выражение (13.42) показывает, что для определения тока прямой последовательности особой фазы в случае включения одинаковых сопротивлений в две другие фазы необходимо в каждую фазу между точками  $L$  и  $L'$  включить одинаковые сопротивления  $\Delta Z_L^{(II)}$ , определяемые по формуле (13.43).

Из выражений (13.39) и (13.40) для токов обратной и нулевой последовательностей, целесообразно исключить ЭДС  $E_{\text{ЭК}}$ , используя с этой целью формулу (13.42). При этом эти формулы принимают вид:

$$\dot{i}_{L,A2} = \frac{Z - \Delta Z_L^{(II)}}{jX_{L2\text{ЭК}} + \underline{Z}} \dot{i}_{L,A1} \quad (13.44)$$

и

$$\dot{i}_{L,A0} = \frac{Z - \Delta Z_L^{(II)}}{jX_{L0\text{ЭК}} + \underline{Z}} \dot{i}_{L,A1}. \quad (13.45)$$

Падение напряжения прямой последовательности в особой фазе можно определить по формуле (13.1). Однако чаще используют выражение, полученное исключением из этой формулы ЭДС  $E_{\text{ЭК}}$  с помощью (13.42). При этом получаем

$$\Delta U_{L,A1} = \Delta Z_L^{(II)} \dot{i}_{L,A1}. \quad (13.46)$$

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 токов прямой последовательности в элементах с сопротивлением  $\Delta Z_L^{(II)}$ , определяемом по формуле (13.43), если их включить между точками  $L$  и  $L'$  во все три фазы (вместо элементов, вызвавших несимметрию).

Падения напряжения обратной и нулевой последовательностей в особой фазе между точками  $L$  и  $L'$  определяют по формулам (13.2) и (13.3).

Комплексная схема замещения для расчета симметричных составляющих токов и напряжений при включении в две фазы одинаковых сопротивлений, в которой схемы разных последовательностей связаны между собой с помощью идеальных трансформаторов с коэффициентом трансформации  $n = 1/1$ , приведена на рис. 13.18, а упрощенная комплексная схема замещения, в которой выполняются все характерные соотношения для симметричных составляющих токов, но потенциалы у схем обратной и нулевой последовательностей смещены, представлена на рис. 13.19.

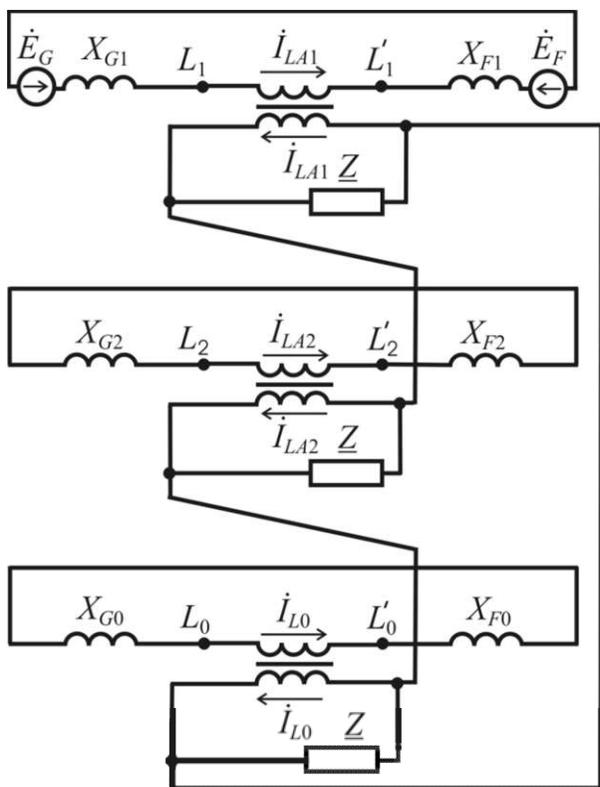


Рис. 13.18. Комплексная схема замещения при включении в фазы  $B$  и  $C$  элементов с одинаковым сопротивлением  $Z$

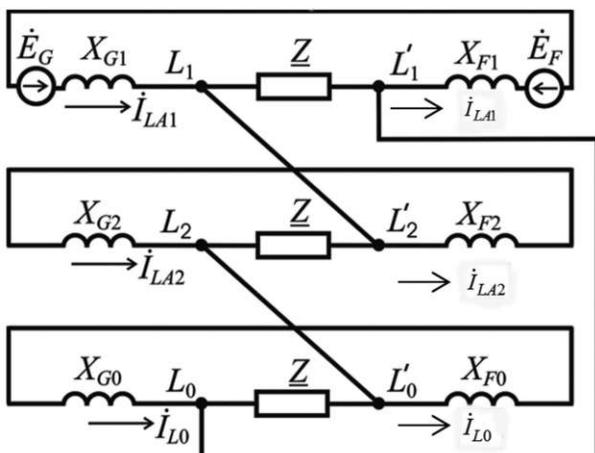


Рис. 13.19. Упрощенная комплексная схема замещения при включении в фазы *B* и *C* элементов с одинаковым сопротивлением  $\underline{Z}$

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  $L'_0$ ,  $L_0$  — с  $L'_1$ , 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.

### 13.6. Особенности расчета токов и напряжений при однократной продольной несимметрии

Формулы (13.12), (13.20), (13.27) и (13.41) для определения тока прямой последовательности при однократной несимметрии разных видов имеют одинаковую структуру, поэтому могут быть представлены в обобщенном виде:

$$\dot{I}_{LA1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{\text{ЭК}}}{jX_{L1\text{ЭК}} + \Delta Z_L^{(n)}}, \quad (13.47)$$

где верхний индекс ( $n$ ) обозначает вид однократной несимметрии.

Очевидно, сопротивление  $\Delta Z_{L'}^{(n)}$  представляет собой сопротивление некоторого эквивалентного симметричного трехфазного элемента, включаемого между точками  $L$  и  $L'$  вместо обрыва или вместо элемента с заданным сопротивлением  $Z$ , 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 обратной и нулевой последовательностей 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 (13.14), (13.22), (13.31) и (13.46) для определения падения напряжения прямой последовательности на особой фазе в месте возникновения продольной несимметрии разных видов отличаются только значением  $\Delta Z_{L'}^{(n)}$  эквивалентного трехфазного симметричного элемента, поэтому они тоже могут быть представлены в обобщенном виде:

$$\Delta \dot{U}_{L'A'}^{(n)} = \Delta Z_{L'}^{(n)} \dot{I}_{L'A'}^{(n)} \quad (13.48)$$

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  $\Delta Z_{L'}^{(n)}$ .

Выражения для определения сопротивления  $\Delta Z_{L'}^{(n)}$ , 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. 13.1.

Таблица 13.1

Формулы для определения значений различных величин при однофазной продольной несимметрии разных видов

Обозначение величины	Формула для определения значения расчетной величины			
	при обрыве		при включении элемента, обладающего сопротивлением	в две фазы
	одной фазы	двух фаз	в одну фазу	
$\Delta Z_{\underline{L}}^{(n)}$	$jX_{L2Эк} // jX_{L0Эк}$	$jX_{L2Эк} + jX_{L0Эк}$	$jX_{L2Эк} // jX_{L0Эк} // Z_{\underline{L}} / 3$	$\left( jX_{L2Эк} // Z_{\underline{L}} + jX_{L0Эк} // Z_{\underline{L}} \right) // Z_{\underline{L}}$
$\dot{I}_{L42}$	$-\frac{X_{L0Эк}}{X_{L2Эк} + X_{L0Эк}} \dot{I}_{L41}$	$\dot{I}_{L41}$	$\frac{\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L2Эк}} \dot{I}_{L41}$	$\frac{Z_{\underline{L}} - \Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L2Эк} + Z_{\underline{L}}} \dot{I}_{L41}$
$\dot{I}_{L10}$	$-\frac{X_{L2Эк}}{X_{L2Эк} + X_{L0Эк}} \dot{I}_{L41}$	$\dot{I}_{L41}$	$\frac{\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L0Эк}} \dot{I}_{L41}$	$\frac{Z_{\underline{L}} - \Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L0Эк} + Z_{\underline{L}}} \dot{I}_{L41}$
$\Delta \dot{U}_{L41}$	$j\Delta X_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$j\Delta X_{\underline{L}}^{(2)} \dot{I}_{L41}$	$\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$
$\Delta \dot{U}_{L42}$	$j\Delta X_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$-jX_{L2Эк} \dot{I}_{L41}$	$\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$\frac{Z_{\underline{L}} - \Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L2Эк} + Z_{\underline{L}}} \dot{I}_{L41}$
$\Delta \dot{U}_{L10}$	$j\Delta X_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$-jX_{L0Эк} \dot{I}_{L41}$	$\Delta Z_{\underline{L}}^{(1)} \dot{I}_{L41}$	$\frac{Z_{\underline{L}} - \Delta Z_{\underline{L}}^{(1)}}{jX_{L0Эк} + Z_{\underline{L}}} \dot{I}_{L41}$

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 (13.1) – (13.3) 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. Как следует, например, из рис. 13.4,а – 13.4,в симметричные составляющие напряжения в точке  $L$

$$\dot{U}_{LA1} = \dot{E}_G - jX_{G1} \dot{I}_{LA1}; \quad (13.49)$$

$$\dot{U}_{LA2} = -jX_{G2} \dot{I}_{LA2}; \quad (13.50)$$

$$\dot{U}_{L0} = -jX_{G0} \dot{I}_{L0}. \quad (13.51)$$

Аналогичным путем нетрудно определить симметричные составляющие напряжения в любой другой точке расчетной схемы. 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.

## ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

---

---

# РАСЧЕТ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СЛОЖНЫХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

---

---

### 14.1. Общие замечания

В практике эксплуатации электроэнергетических систем наиболее частыми видами сложных несимметричных повреждений являются 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.п.

Обрывы фаз при коротком замыкании возможны как вследствие обрыва проводов, так и вследствие несодновременного расхождения контактов выключателя в отдельных фазах. В течение очень короткого времени несодновременный обрыв и короткое замыкание имеют место при всяком 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 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:

- используют комплексные схемы замещения;

- составляют и решают систему 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);
- используют так называемые расширенные схемы замещения прямой последовательности.
- Ниже рассмотрены все эти способы.

## **14.2. Использование комплексных схем замещения при анализе сложных несимметричных повреждений**

Использование комплексных схем замещения при анализе сложных несимметричных повреждений даст 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.п.

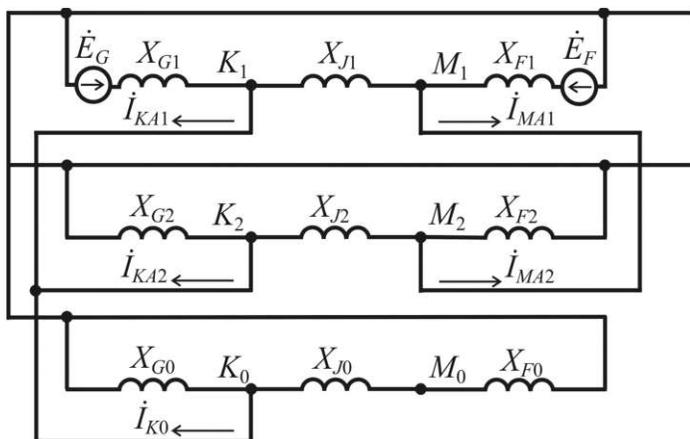
Любое сложное несимметричное повреждение можно разложить на отдельные простые (однократные) несимметричные повреждения, поэтому комплексная схема замещения для сложного повреждения может быть составлена из известных комплексных схем замещения для простых несимметричных повреждений (см. гл. 12 и 13). Однако последние 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 при двух и более одновременных несимметричных повреждениях комплексных схем замещения второй группы недопустимо, так как наличие смещения потенциалов в схемах обратной и нулевой последовательностей, в общем случае различного для отдельных простых схем, вызывает появление в объединенной комплексной схеме токов, которых на самом деле не должно быть.

В качестве примеров на рис. 14.1 показана объединенная комплексная схема замещения для случая двухфазного короткого замыкания на землю фаз  $B$  и  $C$  в точке  $K$  и двухфазного короткого замыкания этих же фаз в точке  $M$ , а на рис. 14.2 – 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 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. 14.1. 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  $M$**

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, ока-

завшейся 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 соответствовали токам и напряжениям той фазы, для которой возможна комплексная схема замещения без поворота фаз токов и напряжений. В качестве примера на рис. 14.3 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 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).

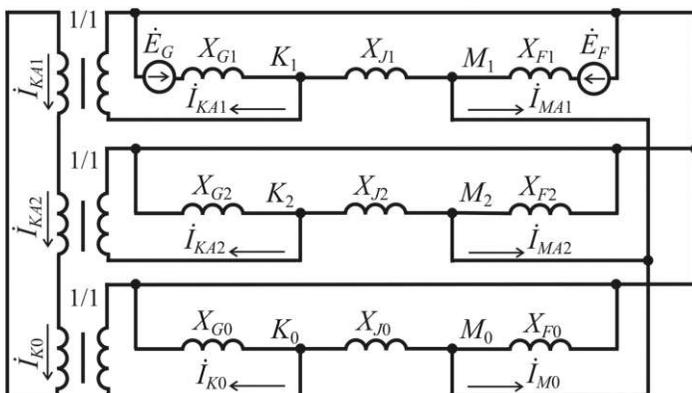
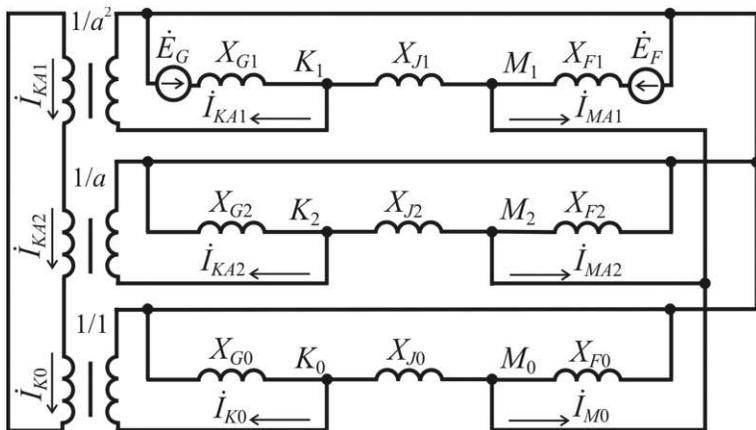


Рис. 14.2. Комплексная схема замещения при однофазном коротком замыкании фазы  $A$  в точке  $K$  и двухфазном коротком замыкании на землю фаз  $B$  и  $C$  в точке  $M$



**Рис. 14.3. Комплексная схема замещения при двухфазном коротком замыкании на землю фаз  $B$  и  $C$  в точке  $M$  и однофазном коротком замыкании фазы  $B$  в точке  $K$**

Возможность использования комплексных схем замещения для анализа процессов при двойных несимметричных повреждениях рассмотрим на примере расчета токов при обрыве одной фазы трехфазной системы с одновременным замыканием одного из оборванных концов на землю. Комплексная схема замещения для поврежденной фазы представлена на рис. 14.4. В ней 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 напряжений в месте этого короткого замыкания. Вторая – обеспечивает равенство падений напряжений в месте обрыва и равенство нулю суммы симметричных составляющих токов в оборванной фазе.

За положительное направление симметричных составляющих токов примем направление к месту короткого замыкания, а в качестве независимых примем токи  $\dot{I}_{GA1}$ ,  $\dot{I}_{FA1}$ ,  $\dot{I}_{FA2}$  и составим три уравнения для их определения. Предварительно выразим остальные симметричные составляющие токов через независимые токи:

- ток нулевой последовательности в месте обрыва

$$\dot{I}_{F0} = -\dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2},$$

так как при обрыве  $\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} + \dot{I}_{F0} = 0$ ;

- ток обратной последовательности в ветви с сопротивлением  $X_{G2}$

$$\dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{FA2},$$

но, учитывая, что  $\dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{KA1} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1}$ , получим

$$\dot{I}_{GA2} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2};$$

- ток нулевой последовательности в ветви с сопротивлением  $X_{G0}$

$$\dot{I}_{G0} = \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{F0} = \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} = \dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2}.$$

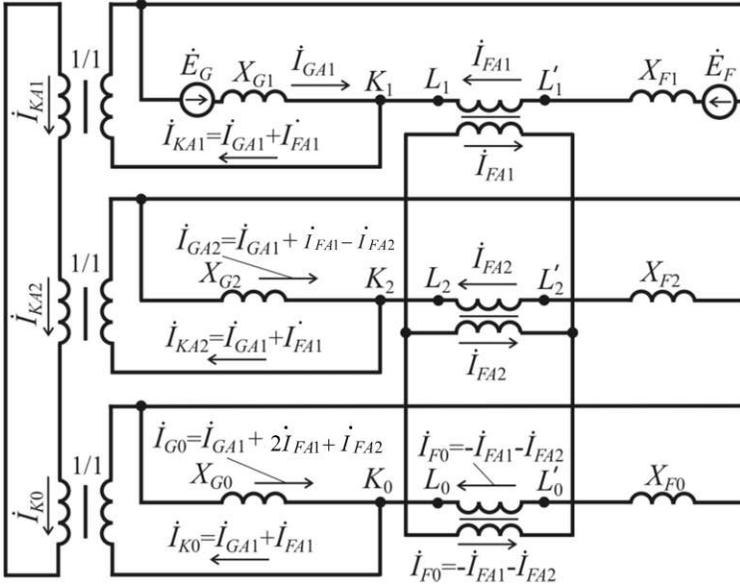


Рис. 14.4. Комплексная схема замещения при обрыве одной фазы с одновременным замыканием одного конца на землю

Первое уравнение может быть составлено из условия, что при однофазном коротком замыкании  $\dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0$  (см. (12.19)). При этом, как видно из рис. 14.4, напряжения в точках  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_0$  определяются так:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{GA} - jX_{G1} \dot{I}_{GA1};$$

$$\dot{U}_{KA2} = 0 - jX_{G2} \dot{I}_{GA2} = 0 - jX_{G2} \left( \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right);$$

$$\dot{U}_{K0} = 0 - jX_{G0} \dot{I}_{G0} = 0 - jX_{G0} \left( \dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right),$$

поэтому

$$\begin{aligned} \dot{E}_{G4} - jX_{G1} \dot{I}_{GA1} - jX_{G2} \left( \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right) - \\ - jX_{G0} \left( \dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (14.1)$$

Два других уравнения могут быть составлены, исходя из того, что при обрыве одной фазы справедливы равенства  $\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2}$  и  $\Delta \dot{U}_{LA2} = \Delta \dot{U}_{L0}$ . В соответствии с рис. 14.4 эти равенства можно представить так:

$$\begin{aligned} jX_{F1} \dot{I}_{FA1} - \dot{E}_{FA} + \dot{E}_{G4} - jX_{G1} \dot{I}_{GA1} = \\ = jX_{F2} \dot{I}_{FA2} - jX_{G2} \left( \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right); \end{aligned} \quad (14.2)$$

$$\begin{aligned} jX_{F2} \dot{I}_{FA2} - jX_{G2} \left( \dot{I}_{GA1} + \dot{I}_{FA1} - \dot{I}_{FA2} \right) = \\ = -jX_{F0} \left( \dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right) - jX_{G0} \left( \dot{I}_{GA1} + 2\dot{I}_{FA1} + \dot{I}_{FA2} \right). \end{aligned} \quad (14.3)$$

Уравнения (14.1) – (14.3) можно представить в таком виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{G4} = j(X_{G1} + X_{G2} + X_{G0}) \dot{I}_{GA1} + j(X_{G2} + 2X_{G0}) \dot{I}_{FA1} + \\ + j(X_{G0} - X_{G2}) \dot{I}_{FA2}; \end{aligned} \quad (14.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{G4} - \dot{E}_{FA} = j(X_{G1} - X_{G2}) \dot{I}_{GA1} - j(X_{F1} + X_{G2}) \dot{I}_{FA1} + \\ + j(X_{F2} + X_{G2}) \dot{I}_{FA2}; \end{aligned} \quad (14.5)$$

$$\begin{aligned} 0 = j(X_{G2} - X_{G0}) \dot{I}_{GA1} + j(X_{G2} - X_{F0} - 2X_{G0}) \dot{I}_{FA1} - \\ - j(X_{G2} + X_{G0} + X_{F2} + X_{F0}) \dot{I}_{FA2}. \end{aligned} \quad (14.6)$$

После решения этих уравнений, т.е. определения токов  $\dot{I}_{GA1}$ ,  $\dot{I}_{FA1}$  и  $\dot{I}_{FA2}$  несложно найти остальные симметричные составляющие токов разных ветвей и симметричные составляющие напряжений в разных точках комплексной схемы замещения.

### 14.3. Расчет двойных коротких замыканий на землю

При расчете двойных коротких замыканий на землю разноименных фаз трехфазной системы, возникающих в разных, но электрически связанных между собой точках, например, точках  $K$  и  $M$  (см. рис. 14.5) обычно применяют способ составления и решения системы расчетных уравнений, полагая, что поврежденными являются фаза  $B$  (в точке  $K$ ) и фаза  $C$  (в точке  $M$ ), а фаза  $A$  является особой.

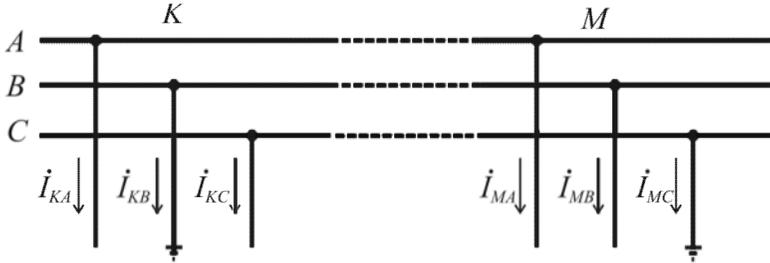


Рис. 14.5. Исходная расчетная схема

Система уравнений, определяющих симметричные составляющие токов и напряжений при двойных коротких замыканиях на землю, зависит от того, заземлены или не заземлены нейтрали трансформаторов на той ступени напряжения сети, где произошло двойное короткое замыкание.

Сначала рассмотрим случай, когда *нейтрали трансформаторов глухо заземлены* и обеспечена циркуляция по ним токов нулевой последовательности. Составленные для расчета двойных коротких замыканий на землю расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей любой конфигурации обычно сначала приводят к схемам треугольника с ЭДС  $\dot{E}_{GA}$  и  $\dot{E}_{FA}$  в схеме прямой последовательности (см. рис. 14.6), а затем каждую схему преобразуют в трехлучевую звезду (см. рис. 14.7) с ЭДС  $\dot{E}_{KA}$  и  $\dot{E}_{MA}$  в схеме прямой последовательности. Эти ЭДС определяют по формулам:

$$\dot{E}_{KA} = \frac{\dot{E}_{GA}(X_{F1} + X_{J1}) + \dot{E}_{FA} X_{G1}}{X_{G1} + X_{J1} + X_{F1}}; \quad (14.7)$$

$$\dot{E}_{MA} = \frac{\dot{E}_{FA}(X_{G1} + X_{J1}) + \dot{E}_{GA} X_{F1}}{X_{G1} + X_{J1} + X_{F1}}. \quad (14.8)$$

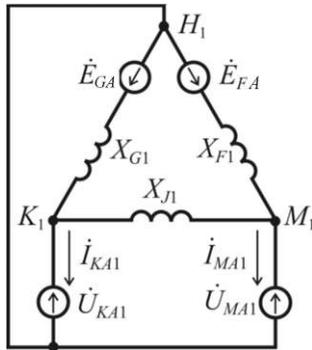


Рис. 14.6. Схема замещения прямой последовательности, приведенная к схеме треугольника

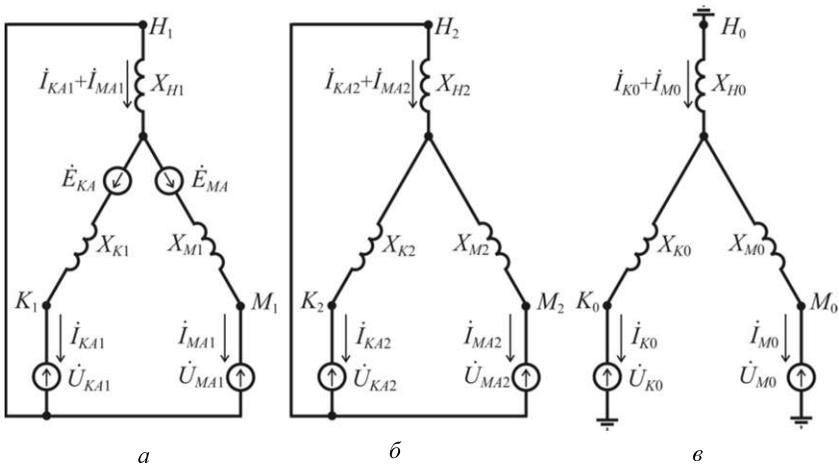


Рис. 14.7. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей, преобразованные в трехлучевую звезду

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. 14.7,а целесообразно вводить только одну ЭДС  $\dot{E}_{HA} = \dot{E}_{GA}$  в ветвь с сопротивлением  $X_{H1}$ .

При замыканиях на землю фаз В и С граничные условия, как видно из рис. 14.5, таковы:

- 1) токи неповрежденных фаз в точке К равны нулю:

$$\dot{I}_{KA} = 0; \quad (14.9)$$

$$\dot{I}_{KC} = 0; \quad (14.10)$$

2) напряжение поврежденной фазы в точке  $K$  равно нулю

$$\dot{U}_{KB} = 0; \quad (14.11)$$

3) токи неповрежденных фаз в точке  $M$  равны нулю:

$$\dot{I}_{MA} = 0; \quad (14.12)$$

$$\dot{I}_{MB} = 0; \quad (14.13)$$

4) напряжение поврежденной фазы в точке  $M$  равно нулю

$$\dot{U}_{MC} = 0. \quad (14.14)$$

Граничным условиям (14.9) и (14.10) соответствует следующее соотношение между симметричными составляющими тока поврежденной фазы  $B$  в точке  $K$ :

$$\dot{I}_{KB1} = \dot{I}_{KB2} = \dot{I}_{KB0} = \frac{\dot{I}_{KB}}{3}, \quad (14.15)$$

а граничным условиям (14.12) и (14.13) – аналогичное соотношение между симметричными составляющими тока поврежденной фазы  $C$  в точке  $M$ :

$$\dot{I}_{MC1} = \dot{I}_{MC2} = \dot{I}_{MC0} = \frac{\dot{I}_{MC}}{3}. \quad (14.16)$$

Граничные условия (14.11) и (14.14) можно представить так:

$$\dot{U}_{KB1} + \dot{U}_{KB2} + \dot{U}_{K0} = 0; \quad (14.17)$$

$$\dot{U}_{MC1} + \dot{U}_{MC2} + \dot{U}_{M0} = 0. \quad (14.18)$$

Соотношения (14.15) – (14.18), выраженные через симметричные составляющие тока и напряжения особой фазы, принимают вид:

$$a^2 \dot{I}_{KA1} = a \dot{I}_{KA2} = \dot{I}_{K0} = \frac{\dot{I}_{KB}}{3}; \quad (14.19)$$

$$a \dot{I}_{MA1} = a^2 \dot{I}_{MA2} = \dot{I}_{M0} = \frac{\dot{I}_{MC}}{3}; \quad (14.20)$$

$$a^2 \dot{U}_{KA1} + a \dot{U}_{KA2} + \dot{U}_{K0} = 0; \quad (14.21)$$

$$a \dot{U}_{MA1} + a^2 \dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{M0} = 0. \quad (14.22)$$

Дополнительные уравнения, устанавливающие связь между токами и напряжениями одноименной последовательности, легко получить из

схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, представленных на рис. 14.7:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{KA} - j(X_{H1} + X_{K1})\dot{I}_{KA1} - jX_{H1}\dot{I}_{MA1}; \quad (14.23)$$

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - jX_{H1}\dot{I}_{KA1} - j(X_{H1} + X_{M1})\dot{I}_{MA1}; \quad (14.24)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -j(X_{H2} + X_{K2})\dot{I}_{KA2} - jX_{H2}\dot{I}_{MA2}; \quad (14.25)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -jX_{H2}\dot{I}_{KA2} - j(X_{H2} + X_{M2})\dot{I}_{MA2}; \quad (14.26)$$

$$\dot{U}_{K0} = -j(X_{H0} + X_{K0})\dot{I}_{K0} - jX_{H0}\dot{I}_{M0}; \quad (14.27)$$

$$\dot{U}_{M0} = -jX_{H0}\dot{I}_{K0} - j(X_{H0} + X_{M0})\dot{I}_{M0}. \quad (14.28)$$

Подставив (14.23), (14.25), (14.27) в (14.21) и (14.24), (14.26), (14.28) в (14.22), получим два уравнения:

$$\begin{aligned} a^2 \dot{E}_{KA} &= j(X_{H1} + X_{K1})a^2 \dot{I}_{KA1} + jX_{H1}a^2 \dot{I}_{MA1} + \\ &+ j(X_{H2} + X_{K2})a \dot{I}_{KA2} + jX_{H2}a \dot{I}_{MA2} + \\ &+ j(X_{H0} + X_{K0})\dot{I}_{K0} + jX_{H0}\dot{I}_{M0}; \end{aligned} \quad (14.29)$$

$$\begin{aligned} a \dot{E}_{MA} &= jX_{H1}a \dot{I}_{KA1} + j(X_{H1} + X_{M1})a \dot{I}_{MA1} + \\ &+ jX_{H2}a^2 \dot{I}_{KA2} + j(X_{H2} + X_{M2})a^2 \dot{I}_{MA2} + \\ &+ jX_{H0}\dot{I}_{K0} + j(X_{H0} + X_{M0})\dot{I}_{M0}. \end{aligned} \quad (14.30)$$

Учитывая (14.19) и (14.20), исключим из уравнений (14.29) и (14.30) токи  $\dot{I}_{KA2}$ ,  $\dot{I}_{K0}$  и  $\dot{I}_{MA2}$ ,  $\dot{I}_{M0}$ , выразив их соответственно через  $\dot{I}_{KA1}$  и  $\dot{I}_{MA1}$ :

$$\begin{aligned} a^2 \dot{E}_{KA} &= j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0})a^2 \dot{I}_{KA1} + \\ &+ j(\alpha^2 X_{H1} + X_{H2} + \alpha X_{H0})\dot{I}_{MA1}; \end{aligned} \quad (14.31)$$

$$a \dot{E}_{MA} = j \left( aX_{H1} + X_{H2} + a^2 X_{H0} \right) \dot{I}_{KA1} + \quad (14.32)$$

$$+ j \left( X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0} \right) a \dot{I}_{MA1}.$$

Если умножить все члены уравнения (14.31) на комплекс  $a^2$ , а уравнения (14.32) на комплекс  $a$ , получим:

$$a \dot{E}_{KA} = j \left( X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0} \right) a \dot{I}_{KA1} + \quad (14.33)$$

$$+ j \left( aX_{H1} + a^2 X_{H2} + X_{H0} \right) \dot{I}_{MA1} = k_1 a \dot{I}_{KA1} + m_1 \dot{I}_{MA1};$$

$$a^2 \dot{E}_{MA} = j \left( a^2 X_{H1} + aX_{H2} + X_{H0} \right) \dot{I}_{KA1} +$$

$$+ j \left( X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0} \right) a^2 \dot{I}_{MA1} = \quad (14.34)$$

$$= k_2 \dot{I}_{KA1} + m_2 a^2 \dot{I}_{MA1}.$$

В последних двух уравнениях приняты следующие обозначения:

$$\underline{k}_1 = j \left( X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0} \right);$$

$$\underline{m}_1 = j \left( aX_{H1} + a^2 X_{H2} + X_{H0} \right);$$

$$\underline{k}_2 = j \left( a^2 X_{H1} + aX_{H2} + X_{H0} \right);$$

$$\underline{m}_2 = j \left( X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0} \right).$$

Из уравнений (14.33) и (14.34) следует:

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\begin{vmatrix} a \dot{E}_{KA} & m_1 \\ a^2 \dot{E}_{MA} & \underline{m}_2 a^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \underline{k}_1 a & m_1 \\ \underline{k}_2 & \underline{m}_2 a^2 \end{vmatrix}} = \frac{\dot{E}_{KA} m_2 - a^2 \dot{E}_{MA} m_1}{\underline{k}_1 \underline{m}_2 - \underline{k}_2 \underline{m}_1}; \quad (14.35)$$

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{\begin{vmatrix} k_1 a & a \dot{E}_{KA} \\ k_2 & a^2 \dot{E}_{MA} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} k_1 a & m_1 \\ k_2 & m_2 a^2 \end{vmatrix}} = \frac{\dot{E}_{MA} k_1 - a \dot{E}_{KA} k_2}{k_1 m_2 - k_2 m_1}. \quad (14.36)$$

Определив по этим выражениям токи прямой последовательности  $\dot{I}_{KA1}$  и  $\dot{I}_{MA1}$  и учитывая соотношения (14.19) и (14.20), легко найти искомые полные токи поврежденных фаз в местах замыканий на землю. Симметричные составляющие напряжений особой фазы в местах повреждений определяются по формулам (14.23) – (14.28).

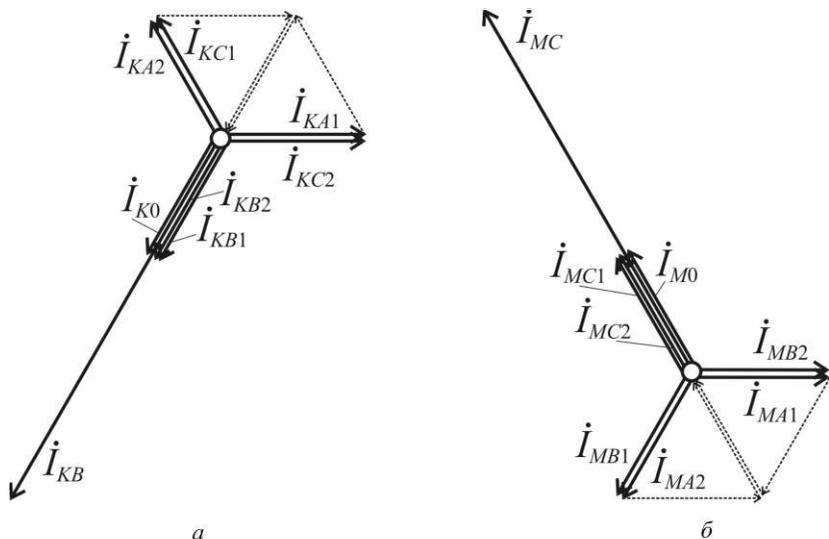
Обычно эквивалентные сопротивления схем замещения обратной и прямой последовательностей равны или отличаются друг от друга на доли процента, поэтому в формулах для  $m_1$  и  $k_2$  можно принять, что  $X_{H1} = X_{H2}$ . При этом  $k_2 = m_1 = j(X_{H0} - X_{H1})$ . Если еще учесть, что по абсолютной величине  $k_1$  и  $m_2$  значительно больше соответственно  $m_1$  и  $k_2$ , то коэффициентами  $m_1$  и  $k_2$  в формулах (14.35) и (14.36) можно пренебречь (т.е. принять их равными нулю). Это приводит к существенному упрощению указанных формул:

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{KA}}{k_1} = \frac{\dot{E}_{KA}}{j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0})}; \quad (14.37)$$

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{\dot{E}_{MA}}{m_2} = \frac{\dot{E}_{MA}}{j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0})}. \quad (14.38)$$

Как видно из (14.37) и (14.38), 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 (14.19) и (14.20), построить векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю. Такие диаграммы представлены на рис. 14.8. 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. 14.8. Векторные диаграммы токов в местах замыканий на землю фазы  $B$  (а) и фазы  $C$  (б) в сети с глухозаземленными нейтральными трансформаторов**

Теперь рассмотрим случай, когда на той ступени напряжения сети, где произошло двойное короткое замыкание на землю, *нейтралей всех трансформаторов не заземлены*. При этом  $X_{H0} = \infty$ , поэтому схема замещения нулевой последовательности (см. рис. 14.7б) превращается в двухполюсник, сопротивление которого составляет  $X_{K0} + X_{M0} = X_{KM0}$ , 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 (14.19) и (14.20), а также уравнения (14.23) – (14.26). А уравнения (14.27) и (14.28) 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  $M$ :

$$\dot{U}_{K0} - \dot{U}_{M0} = -jX_{KM0} \dot{I}_{K0}. \quad (14.39)$$

В этом выражении за положительное направление тока  $\dot{I}_{K0}$  принято направление от точки  $M$  к точке  $K$ .

Дополнительное уравнение можно составить исходя из условия, что при отсутствии в сети, где происходит двойное короткое замыкание на землю, заземленных нейтралей справедливо соотношение:

$$\dot{I}_{KB} + \dot{I}_{MC} = 0$$

или

$$\dot{I}_{KB} = -\dot{I}_{MC}.$$

При этом, как видно из тождеств (14.19) и (14.20),

$$\dot{I}_{K0} = -\dot{I}_{M0}. \quad (14.40)$$

Очевидно, и остальные члены тождества (14.20) отличаются от членов тождества (14.19) только знаком, что позволяет не только симметричные составляющие тока в точке замыкания  $K$ , т.е.  $\dot{I}_{KA2}$  и  $\dot{I}_{K0}$ , но и все симметричные составляющие тока в точке замыкания  $M$  выразить через ток  $\dot{I}_{KA1}$ :

$$\dot{I}_{KA2} = a \dot{I}_{KA1}; \quad (14.41)$$

$$\dot{I}_{K0} = a^2 \dot{I}_{KA1}; \quad (14.42)$$

$$\dot{I}_{MA1} = -a \dot{I}_{KA1}; \quad (14.43)$$

$$\dot{I}_{MA2} = -\dot{I}_{KA1}; \quad (14.44)$$

$$\dot{I}_{M0} = -a^2 \dot{I}_{KA1}. \quad (14.45)$$

Это дает возможность выражения (14.23) – (14.26) представить в виде функций тока  $\dot{I}_{KA1}$ :

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{KA} - j(X_{H1} + X_{K1})\dot{I}_{KA1} + jX_{H1}a\dot{I}_{KA1}; \quad (14.46)$$

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - jX_{H1}\dot{I}_{KA1} + j(X_{H1} + X_{M1})a\dot{I}_{KA1}; \quad (14.47)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -j(X_{H2} + X_{K2})a\dot{I}_{KA1} + jX_{H2}\dot{I}_{KA1}; \quad (14.48)$$

$$\dot{U}_{MA2} = -jX_{H2}a\dot{I}_{KA1} + j(X_{H2} + X_{M2})\dot{I}_{KA1}. \quad (14.49)$$

Теперь найдем разность левых частей уравнений (14.21) и (14.22) и в полученное соотношение вместо  $\dot{U}_{KA1}$ ,  $\dot{U}_{MA1}$ ,  $\dot{U}_{KA2}$  и  $\dot{U}_{MA2}$  подставим выражения (14.46) – (14.49), а разность  $\dot{U}_{KA0} - \dot{U}_{MA0}$  предста-

вим как функцию  $\dot{I}_{KA1}$ , используя с этой целью выражения (14.39) и (14.42):

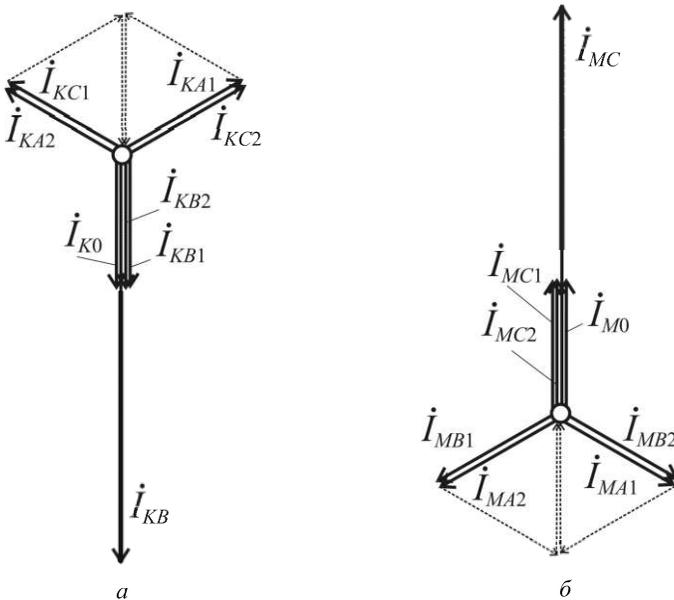
$$a^2 \dot{E}_{KA} - a \dot{E}_{MA} - j(2X_{H1} + 2X_{H2} + X_{K1} + X_{M1} + X_{K2} + X_{M2}) a^2 \dot{I}_{KA1} + jX_{H1}(1+a) \dot{I}_{KA1} + jX_{H2}(1+a) \dot{I}_{KA1} - jX_{KM0} a^2 \dot{I}_{KA1} = 0.$$

Если теперь умножить все члены этого уравнения на комплекс  $a$  и учесть, что  $a + a^2 = -1$ , то получим

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{KA} - a^2 \dot{E}_{MA}}{j(3X_{H1} + 3X_{H2} + X_{K1} + X_{M1} + X_{K2} + X_{M2} + X_{KM0})}. \quad (14.50)$$

Остальные симметричные составляющие токов в местах коротких замыканий на землю определяются по формулам (14.41) – (14.45). На рис. 14.9 приведены векторные диаграммы токов в местах замыканий. Как видно, токи поврежденных фаз в местах коротких замыканий на землю сдвинуты по фазе на угол  $\pi$  и составляют

$$\dot{I}_{KB} = -\dot{I}_{MC} = 3a^2 \dot{I}_{KA1}.$$



**Рис. 14.9. 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 (14.46) – (14.49), а затем по формулам (14.21) и (14.22) находятся напряжения нулевой последовательности.

#### 14.4. Расчет несимметрии при обрыве фазы и 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 замесе в основной схеме замещения прямой последовательности обоих повреждений (т.е.  $\dot{U}_{KЛ}$  и  $\dot{\Delta U}_{ЛЛ}$ ) так называемой производной или эквивалентной схемой замещения прямой последовательности. Причем параметры этой схемы определяются только параметрами схем обратной и нулевой последовательностей. Этот метод позволяет расчет токов и напряжений в схеме 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 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 обратной и нулевой последовательностей. Сущность этого метода изложена ниже.

На рис. 14.10 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.

Исходя из приведенных на рис. 14.10 схем прямой, обратной и нулевой последовательностей и выбранных положительных направлений токов и напряжений можно составить следующие уравнения:

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{E}_{GA} - jX_{G1} \left( \dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right); \quad (14.51)$$

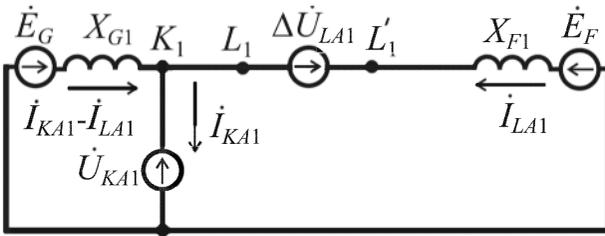
$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{FA} - \dot{E}_{GA} - jX_{F1} \dot{I}_{LA1} + jX_{G1} \left( \dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} \right); \quad (14.52)$$

$$\dot{U}_{KA2} = -jX_{G2} \left( \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} \right); \quad (14.53)$$

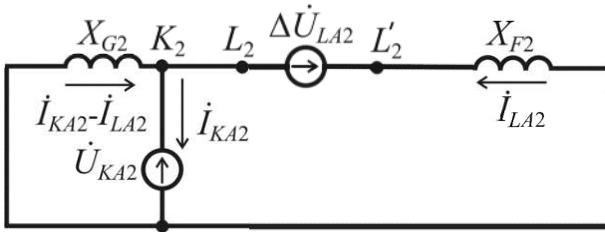
$$\Delta \dot{U}_{LA2} = -jX_{F2} \dot{I}_{LA2} + jX_{G2} \left( \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} \right); \quad (14.54)$$

$$\dot{U}_{K0} = -jX_{G0} \left( \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{L0} \right); \quad (14.55)$$

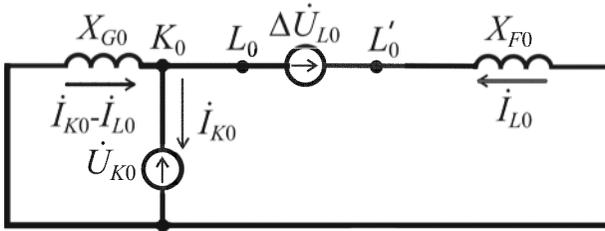
$$\Delta \dot{U}_{L0} = -jX_{F0} \dot{I}_{L0} + jX_{G0} \left( \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{L0} \right). \quad (14.56)$$



a



б



в

Рис. 14.10. Схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей при обрыве фазы и однофазном коротком замыкании

Уравнения (14.51) и (14.52) 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 (12.19) и (12.20)], так и несимметрии, связанной с обрывом одной фазы [уравнения (13.7) и (13.8)].

Если из уравнений (14.53) – (14.56), (12.19), (13.7) и соотношений (12.20) и (13.8) исключить токи и напряжения обратной и нулевой последовательностей, можно получить два уравнения, связывающие токи и напряжения прямой последовательности (особые или несобственные уравнения) в виде

$$\dot{U}_{KA1} = jX_K \dot{I}_{KA1} + jX_{KL} \dot{I}_{LA1}; \quad (14.57)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = jX_{LK} \dot{I}_{KA1} + jX_L \dot{I}_{LA1}, \quad (14.58)$$

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 (13.8) приравняем правые части (14.54) и (14.56):

$$\begin{aligned} jX_{G2} \dot{I}_{KA2} - j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{LA2} = \\ = jX_{G0} \dot{I}_{KA0} - j(X_{G0} + X_{F0}) \dot{I}_{L0}. \end{aligned} \quad (14.59)$$

Но в соответствии с (13.7)

$$\dot{I}_{LA2} = -\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{L0},$$

поэтому

$$\begin{aligned} jX_{G2} \dot{I}_{KA2} + j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{LA1} = \\ = jX_{G0} \dot{I}_{KA0} - j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}) \dot{I}_{L0}. \end{aligned}$$

Учитывая (12.20), находим

$$\dot{I}_{L0} = \frac{j(X_{G0} - X_{G2}) \dot{I}_{KA1} - j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})}. \quad (14.60)$$

Найдем также связь между током  $\dot{I}_{LA2}$  и токами прямой последовательности  $\dot{I}_{KA1}$  и  $\dot{I}_{LA1}$ . С этой целью в соответствии с (13.7) ток  $\dot{I}_{L0}$  в (14.59) представим как

$$\dot{I}_{L0} = -\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2}.$$

Тогда

$$jX_{G2}\dot{I}_{KA2} + j(X_{G2} + X_{F2})\dot{I}_{LA2} = jX_{G0}\dot{I}_{K0} - j(X_{G0} + X_{F0})\left(-\dot{I}_{LA1} - \dot{I}_{LA2}\right).$$

Учитывая (12.20), получим:

$$j(X_{G2} - X_{G0})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G0} + X_{F0})\dot{I}_{LA1} = j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})\dot{I}_{LA2},$$

откуда

$$\dot{I}_{LA2} = \frac{j(X_{G2} - X_{G0})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G0} + X_{F0})\dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})}. \quad (14.61)$$

Согласно уравнению (12.19) напряжение  $\dot{U}_{KA1}$  связано с  $\dot{U}_{KA2}$  и  $\dot{U}_{KA0}$  соотношением

$$\dot{U}_{KA1} = -\dot{U}_{KA2} - \dot{U}_{KA0}$$

или, в соответствии с (14.53) и (14.55)

$$\dot{U}_{KA1} = j(X_{G2} + X_{G0})\dot{I}_{KA1} - jX_{G2}\dot{I}_{LA2} - jX_{G0}\dot{I}_{LA0}.$$

Подставив в это выражение (14.60) и (14.61), найдем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KA1} &= \\ &= j(X_{G2} + X_{G0})\dot{I}_{KA1} - jX_{G2} \frac{j(X_{G2} - X_{G0})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G0} + X_{F0})\dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} - \\ &\quad - jX_{G0} \frac{j(X_{G0} - X_{G2})\dot{I}_{KA1} - j(X_{G2} + X_{F2})\dot{I}_{LA1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} = \\ &= j \left[ X_{G2} + X_{G0} - \frac{(X_{G2} - X_{G0})^2}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \right] \dot{I}_{KA1} + \\ &\quad + j \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{LA1} = jX_K \dot{I}_{KA1} + jX_{KL} \dot{I}_{LA1}. \end{aligned} \quad (14.62)$$

Перейдем к обычно принимаемым в литературе обозначениям различных величин, определяющих  $X_K$  и  $X_{KL}$ :

- $X_{K2}$  и  $X_{K0}$  – сопротивления обратной и нулевой последовательностей относительно точки короткого замыкания при обрыве между точками  $L_2$  и  $L'_2$ , а также  $L_0$  и  $L'_0$  соответственно в схемах об-

ратной и нулевой последовательностей (т.е. при  $\dot{I}_{LA2} = 0$  и  $\dot{I}_{LA0} = 0$ );

- $X_{L2}$  и  $X_{L0}$  – сопротивления обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва при отсутствии короткого замыкания соответственно в схемах обратной и нулевой последовательностей (т.е. при  $\dot{I}_{KA2} = 0$  и  $\dot{I}_{K0} = 0$ );

- $X_{KL2}$  и  $X_{KL0}$  – взаимные сопротивления между точкой короткого замыкания и местом обрыва соответственно в схемах обратной и нулевой последовательностей (т.е.  $X_{KL2}$  определяется как напряжение в точке  $K$  схемы обратной последовательности при  $\dot{I}_{KA2} = 0$  и  $\dot{I}_{LA2} = 1$ , а  $X_{KL0}$  – как напряжение в точке  $K$  схемы нулевой последовательности при  $\dot{I}_{K0} = 0$  и  $\dot{I}_{L0} = 1$ ).

Таким образом имеем:

$$\begin{aligned} X_{K2} &= X_{G2}; X_{K0} = X_{G0}; \\ X_{L2} &= X_{G2} + X_{F2}; X_{L0} = X_{G0} + X_{F0}; \\ X_{KL2} &= X_{G2}; X_{KL0} = X_{G0}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KA1} &= j \left[ X_{K2} + X_{K0} - \frac{(X_{KL2} - X_{KL0})^2}{X_{L2} + X_{L0}} \right] \dot{I}_{KA1} + \\ &+ j \frac{jX_{KL2}X_{L0} + X_{KL0}X_{L2}}{X_{L2} + X_{L0}} \dot{I}_{LA1} = jX_K \dot{I}_{KA1} + jX_{KL} \dot{I}_{LA1}. \end{aligned} \quad (14.63)$$

Отсюда видно, что

$$X_K = X_{K2} + X_{K0} - \frac{(X_{KL2} - X_{KL0})^2}{X_{L2} + X_{L0}} \quad (14.64)$$

и

$$X_{KL} = \frac{X_{KL2}X_{L0} + X_{KL0}X_{L2}}{X_{L2} + X_{L0}}. \quad (14.65)$$

Найдем сопротивления  $X_{LK}$  и  $X_{L}$ , входящие в уравнение (14.58). В соответствии с (13.8), (14.54) и (12.20)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \Delta \dot{U}_{LA2} = jX_{G2} \dot{I}_{KA1} - j(X_{G2} + X_{F2}) \dot{I}_{LA2}.$$

Используя формулу (14.61), получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{L\Delta 1} &= \\ &= jX_{G2} \dot{I}_{K\Delta 1} - j(X_{G2} + X_{F2}) \frac{j(X_{G2} - X_{G0}) \dot{I}_{K\Delta 1} - j(X_{G0} + X_{F0}) \dot{I}_{L\Delta 1}}{j(X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0})} = \\ &= j \frac{X_{G2}(X_{G0} + X_{F0}) + X_{G0}(X_{G2} + X_{F2})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{K\Delta 1} + \\ &\quad + j \frac{(X_{G2} + X_{F2})(X_{G0} + X_{F0})}{X_{G2} + X_{F2} + X_{G0} + X_{F0}} \dot{I}_{L\Delta 1}. \end{aligned} \quad (14.66)$$

Переходя к общепринятым обозначениям, имеем:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{L\Delta 1} &= j \frac{X_{KL2}X_{L0} + X_{KL0}X_{L2}}{X_{L2} + X_{L0}} \dot{I}_{K\Delta 1} + j \frac{X_{L2}X_{L0}}{X_{L2} + X_{L0}} \dot{I}_{L\Delta 1} = \\ &= jX_{LK} \dot{I}_{K\Delta 1} + jX_L \dot{I}_{L\Delta 1}. \end{aligned} \quad (14.67)$$

Отсюда видно, что

$$X_{LK} = \frac{X_{KL2}X_{L0} + X_{KL0}X_{L2}}{X_{L2} + X_{L0}} \quad (14.68)$$

и

$$X_L = \frac{X_{L2}X_{L0}}{X_{L2} + X_{L0}}. \quad (14.69)$$

Выражения (14.63) и (14.67) показывают, что при обрыве проводника какой-либо фазы и одновременном однофазном коротком замыкании то же фазы взаимные сопротивления  $X_{KL}$  и  $X_{LK}$  равны. При этом условии уравнения (14.57) и (14.58) можно представить в виде:

$$\dot{U}_{K\Delta 1} = -jX_{KL} \left( \dot{I}_{K\Delta 1} - \dot{I}_{L\Delta 1} \right) + j(X_K + X_{KL}) \dot{I}_{K\Delta 1}; \quad (14.70)$$

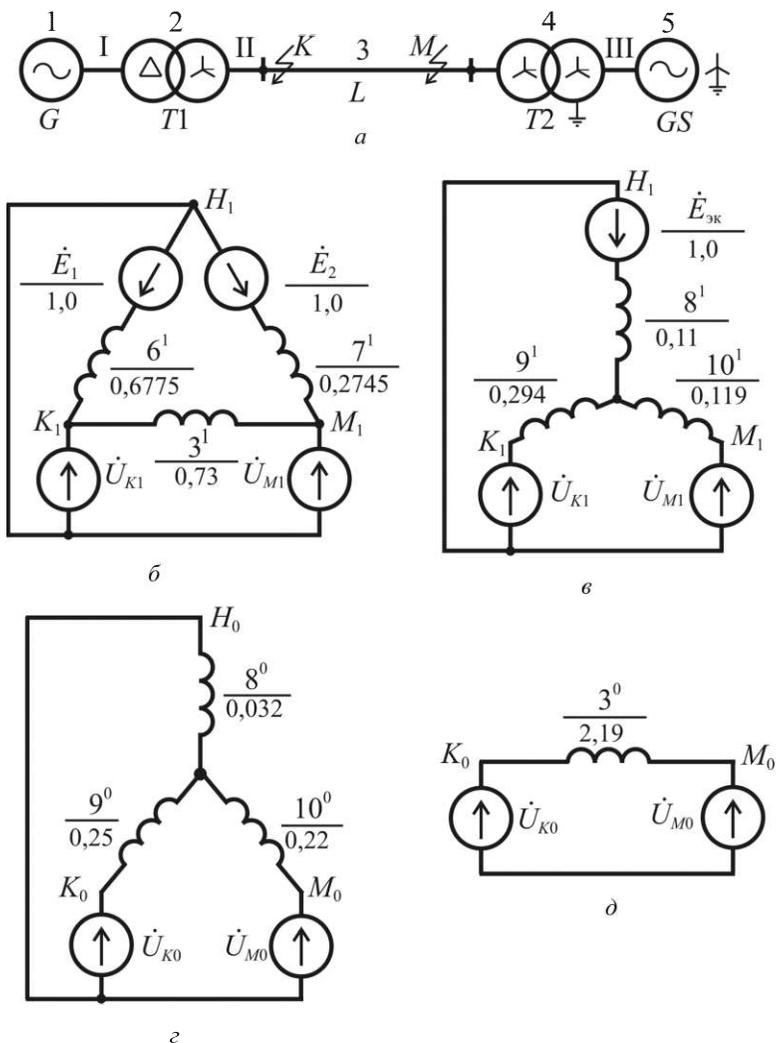
$$\dot{U}_{L\Delta 1} = -(-jX_{KL}) \left( \dot{I}_{K\Delta 1} - \dot{I}_{L\Delta 1} \right) + j(X_L + X_{KL}) \dot{I}_{L\Delta 1}. \quad (14.71)$$

Поскольку  $X_{KL}$  и  $X_{LK}$  равны, то этим уравнениям соответствует производная или эквивалентная схема замещения прямой последовательности, которая представлена на рис. 14.11 (обведена пунктирной линией) совместно с основной схемой замещения прямой последовательности.



## 14.5. Примеры решения задач

*Задача 1.* На воздушной линии электропередачи напряжением 35 кВ (см. рис. 14.12,а) произошло двойное замыкание на землю фазы *B* в начале линии (точка *K*) и фазы *C* на ее конце (точка *M*). Определить значения начального тока в местах короткого замыкания для случаев, когда нейтрали обмоток 35 кВ трансформаторов *T1* и *T2* заземлены и изолированы.



**Рис. 14.12. К задаче 1:**

*a* – исходная схема; *б* и *в* – схемы замещения прямой;  
*г* и *д* – схемы замещения обратной последовательности

*Исходные данные:*

• электроэнергетическая система и сеть GIS:  $S_{\text{ном}} = 10000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  
 $U_{\text{ном}} = 115 \text{ кВ}$ ;  $X_{*1(\text{ном})} = 1,2$ ;  $X_{*0(\text{ном})} / X_{*1(\text{ном})} = 1,4$ ;

• генератор G:  $P_{\text{ном}} = 32 \text{ МВт}$ ;  $U_{\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ ;  
 $X_{*d(\text{ном})} \approx X_{*2(\text{ном})} = 0,143$ ; до короткого замыкания генератор работал на холостом ходу с номинальным напряжением;

• трансформатор T1:  $S_{\text{ном}} = 25 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 38,5/6,3 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 8\%$ ;

• трансформатор T2:  $S_{\text{ном}} = 40 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 115/37 \text{ кВ}$ ;  $u_k = 10,5\%$ ;

• линия электропередачи L:  $l = 20 \text{ км}$ ;  $X_{\text{лог}} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;  
 $X_{0\text{лог}}/X_{1\text{лог}} = 3$ ;

*Решение.* Расчет выполним с использованием системы относительных единиц при базисной мощности  $S_6 = 100 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и базисном напряжении на каждой из ступеней  $U_6 = U_{\text{сп}}$ . При этом на ступени напряжения 37 кВ значение базисного тока составит

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}.$$

При выбранных базисных условиях ЭДС генератора  $E_1 = E_{\text{кд}} = 1$  и ЭДС системы  $E_2 = E_{\text{Мд}} = 1$ , а относительные значения индуктивных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов расчетной схемы будут равны:

$$X_{11} = X_{12} = 0,143 \cdot \frac{100}{\frac{32}{0,8}} = 0,3575;$$

$$X_{21} = X_{22} = X_{20} = \frac{8}{100} \cdot \frac{100}{25} = 0,32;$$

$$X_{31} = X_{32} = 0,4 \cdot 20 \cdot \frac{100}{37^2} = 0,73;$$

$$X_{30} = 0,73 \cdot 3 = 2,19;$$

$$X_{41} = X_{42} = X_{40} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,2625;$$

$$X_{51} = X_{52} = 1,2 \cdot \frac{100}{10000} = 0,012;$$

$$X_{50} = 0,012 \cdot 1,4 = 0,017.$$

Схема замещения прямой последовательности, соединенная в треугольник показана на рис. 14.12,б, а преобразованная в звезду

схема замещения – на рис. 14.12,в. В этих схемах значения сопротивлений равны:

$$X_{6^1} = X_{1^1} + X_{2^1} = 0,3575 + 0,32 = 0,6775;$$

$$X_{7^1} = X_{4^1} + X_{5^1} = 0,2625 + 0,012 = 0,2745;$$

$$X_{H1} = X_{8^1} = \frac{X_{6^1} X_{7^1}}{X_{3^1} + X_{6^1} + X_{7^1}} = \frac{0,6775 \cdot 0,2745}{0,73 + 0,6775 + 0,2745} = 0,11;$$

$$X_{K1} = X_{9^1} = \frac{X_{6^1} X_{3^1}}{X_{3^1} + X_{6^1} + X_{7^1}} = \frac{0,6775 \cdot 0,73}{0,73 + 0,6775 + 0,2745} = 0,294;$$

$$X_{M1} = X_{10^1} = \frac{X_{7^1} X_{3^1}}{X_{3^1} + X_{6^1} + X_{7^1}} = \frac{0,2745 \cdot 0,73}{0,73 + 0,6775 + 0,2745} = 0,119.$$

Схема замещения обратной последовательности отличается от схемы замещения прямой последовательности лишь отсутствием ЭДС, причем вследствие равенства сопротивлений прямой и обратной последовательностей всех элементов расчетной схемы, эквивалентные сопротивления схем замещения обратной и нулевой последовательностей одинаковы.

Схемы замещения нулевой последовательности для случаев заземленных и незаземленных нейтралей обмоток трансформаторов на стороне ступени напряжения II различны и, следовательно, решения, согласно изложенному выше будут также различны.

В первом случае схема замещения нулевой последовательности, преобразованная в звезду, имеет вид, показанный на рис. 14.12,г. В ней значения сопротивлений соответственно равны:

$$X_{H0} = X_{8^0} = \frac{X_{2^0} (X_{4^0} + X_{5^0})}{X_{3^0} + X_{2^0} + X_{4^0} + X_{5^0}} = \frac{0,32 (0,2625 + 0,017)}{2,19 + 0,32 + 0,2625 + 0,017} = 0,032;$$

$$X_{K0} = X_{9^0} = \frac{X_{2^0} X_{3^0}}{X_{3^0} + X_{2^0} + X_{4^0} + X_{5^0}} = \frac{0,32 \cdot 2,19}{2,19 + 0,32 + 0,2625 + 0,017} = 0,25;$$

$$X_{M0} = X_{10^0} = \frac{(X_{4^0} + X_{5^0}) X_{3^0}}{X_{3^0} + X_{2^0} + X_{4^0} + X_{5^0}} = \frac{(0,2625 + 0,017) \cdot 2,19}{2,19 + 0,32 + 0,2625 + 0,017} = 0,22.$$

Считаем, что ЭДС  $E_1$  совпадает по фазе с ЭДС  $E_2$ . Поскольку их модули одинаковы, то их можно заменить одной эквивалентной ЭДС  $E_{эк} = E_{кз} = 1$ , включенной в луч звезды с сопротивлением  $X_{H0}$ .

Так как  $X_{H1} = X_{H2}$ , то

$$k_2 = m_1 = j(X_{H0} - X_{H1}) = j(0,032 - 0,11) = -j0,079;$$

$$\begin{aligned} \underline{k}_1 &= j(X_{H1} + X_{K1} + X_{H2} + X_{K2} + X_{H0} + X_{K0}) = \\ &= j(0,11 + 0,294 + 0,11 + 0,294 + 0,032 + 0,25) = j1,09; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{m}_2 &= j(X_{H1} + X_{M1} + X_{H2} + X_{M2} + X_{H0} + X_{M0}) = \\ &= j(0,11 + 0,119 + 0,11 + 0,119 + 0,032 + 0,22) = j0,71. \end{aligned}$$

Значения  $\underline{k}_1$  и  $\underline{m}_2$  по абсолютной величине значительно больше соответственно  $\underline{m}_1$  и  $\underline{k}_2$ , поэтому коэффициенты  $\underline{m}_1$  и  $\underline{k}_2$  можно принять равными нулю. В этом случае в соответствии с формулами (14.37) и (14.38) токи прямой последовательности в точках  $K$  и  $M$ :

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{\Sigma K}}{k_1} = \frac{1}{j1,09} = -j0,917;$$

$$\dot{I}_{MA1} = \frac{\dot{E}_{\Sigma K}}{m_2} = \frac{1}{j0,71} = -j1,408.$$

Согласно (14.19) и (14.20) значения токов короткого замыкания в именованных единицах в точке  $K$  (фаза  $B$ ) и в точке  $M$  (фаза  $C$ ) по модулю соответственно составят:

$$I_{KB} = 3I_{KA1}I_6 = 3 \cdot 0,917 \cdot 1,56 = 4,292 \text{ кА};$$

$$I_{MC} = 3I_{MA1}I_6 = 3 \cdot 1,408 \cdot 1,56 = 6,589 \text{ кА}.$$

Во втором случае, когда нейтрали трансформаторов на ступени напряжения II не заземлены,  $X_{H0} = \infty$ , поэтому схема замещения нулевой последовательности превращается в двухполюсник, сопротивление которого составляет  $X_{KM0}$ , численно равное сопротивлению нулевой последовательности части электрической цепи, заключенной между точками замыканий на землю  $K$  и  $M$ , т.е. схема замещения будет состоять из одного сопротивления  $X_{30} = X_{KM0} = 2,19$  (см. рис. 14.12,д).

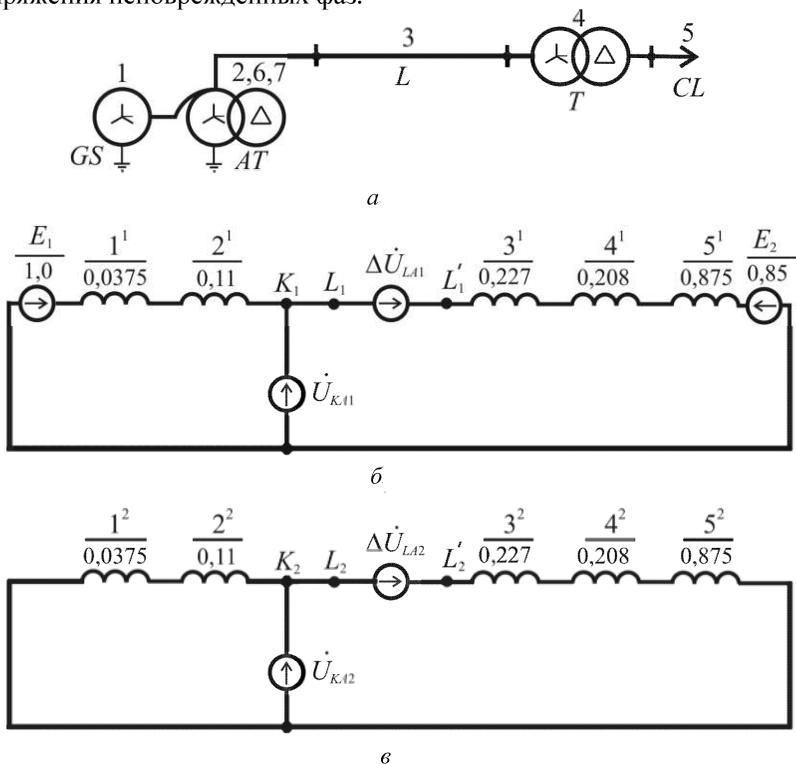
Согласно (14.50)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{K\Omega 11} &= \frac{1(1-a^2)}{j(3 \cdot 0,11 + 3 \cdot 0,11 + 0,294 + 0,119 + 0,294 + 0,119 + 2,19)} = \\ &= -j(1-a^2)0,272, \end{aligned}$$

а его модуль  $\left| \dot{I}_{KA1} \right| = \sqrt{3} \cdot 0,272$ , поэтому в соответствии с формулами (14.19) и (14.20) с учетом (14.43) токи короткого замыкания в именованных единицах в точке  $K$  (фаза  $B$ ) и в точке  $M$  (фаза  $C$ ) по модулю равны:

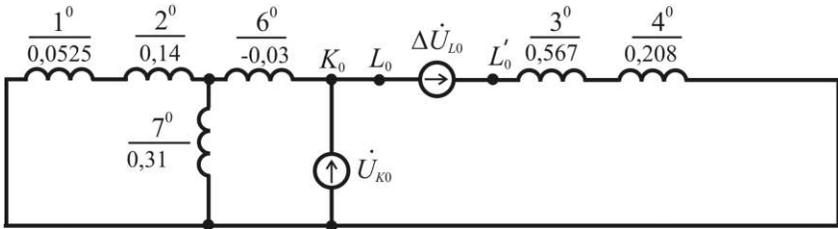
$$I_{KB} = -I_{MC} = 3 \left| \dot{I}_{KA1} \right| I_{\sigma} = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,272 \cdot 1,56 = 2,2 \text{ кА.}$$

**Задача 2.** В начале воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ, предназначенной для электроснабжения потребителей и связанной с электроэнергетической системой через автотрансформатор (см. рис. 14.13, *a*), произошел обрыв провода фазы  $A$ , при этом один из его концов соединился с землей. Определить значение начального тока в месте короткого замыкания, токи от автотрансформатора и фазные напряжения неповрежденных фаз.

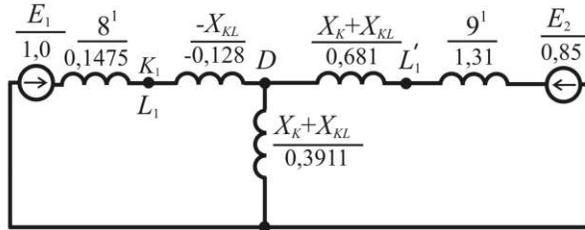


**Рис. 14.13. К задаче 2:**

*a* – исходная схема; *b*, *в* и *г* – схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей; *д* – совмещенная схема замещения прямой последовательности



з



б

Окончание рис. 14.13

Исходные данные:

- электроэнергетическая система и сеть  $GS$ :  $S_{\text{ном}} = 10000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $U_{\text{ном}} = 230 \text{ кВ}$ ;  $X_{* \text{ I(ном)}} = 3,0$ ;  $X_{* \text{ O(ном)}} / X_{* \text{ I(ном)}} = 1,4$ ;
- автотрансформатор  $AT$ :  $S_{\text{ном}} = 125 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 230/115/10,5 \text{ кВ}$ ;  $u_{\text{к В-С}} = 11\%$ ;  $u_{\text{к В-Н}} = 45\%$ ;  $u_{\text{к С-Н}} = 28\%$ ;
- трансформатор  $T$ :  $S_{\text{ном}} = 63 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $n_T = 115/10,5 \text{ кВ}$ ;  $u_{\text{к}} = 10,5\%$ ;
- линия электропередачи  $L$ :  $l = 60 \text{ км}$ ;  $X_{\text{Iпор}} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;  $X_{0\text{пор}}/X_{\text{Iпор}} = 2,5$ ;
- нагрузка  $CL$ :  $S_{\text{ном}} = 50 \text{ МВ}\cdot\text{А}$ ;  $X_{* \text{ (ном)}}'' = 0,35$ ;  $E_{* \text{ (ном)}}'' = 0,85$ .

*Решение.* Расчет выполним с использованием системы относительных единиц при базисной мощности  $S_{\text{б}} = 125 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и базисном напряжении на каждой из ступеней  $U_{\text{б}} = U_{\text{ср}}$ . При этом на ступени напряжения 115 кВ значение базисного тока составит

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3}U_{\text{б}}} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,628 \text{ кА}.$$

На рис. 14.13, б, в и з показаны схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При выбранных базисных условиях ЭДС системы и сети  $E_1 = 1$ , а ЭДС нагрузки  $E_2 = 0,85$ , относительные значения индуктивных сопротивлений прямой и обратной последовательностей элементов схем замещения будут равны:

$$X_{1^1} = X_{1^2} = X_{* \text{ К(НОМ)}} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 3 \frac{125}{10000} = 0,0375;$$

$$X_{2^1} = X_{2^2} = \frac{u_{\text{К В-С}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,11;$$

$$X_{3^1} = X_{3^2} = X_{\text{Пог. I}} \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{125}{115^2} = 0,227;$$

$$X_{4^1} = X_{4^2} = \frac{u_{\text{К}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{125}{63} = 0,208;$$

$$X_{5^1} = X_{5^2} = X_{* \text{ (НОМ)}}'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,35 \frac{125}{50} = 0,875;$$

$$X_{8^1} = X_{8^2} = X_{1^1} + X_{2^1} = 0,0375 + 0,11 = 0,1475;$$

$$X_{9^1} = X_{9^2} = X_{3^1} + X_{4^1} + X_{5^1} = 0,227 + 0,208 + 0,875 = 1,31.$$

Относительные значения индуктивных сопротивлений нулевой последовательности элементов схем замещения будут равны:

$$X_{1^0} = X_{1^1} \frac{X_{* \text{ (НОМ)}}}{X_{* \text{ К(НОМ)}}} = 0,0375 \cdot 1,4 = 0,0525;$$

$$X_{3^0} = X_{3^1} \frac{X_{\text{Пог. I}}}{X_{\text{Пог. I}}} = 0,227 \cdot 2,5 = 0,567;$$

$$X_{4^0} = X_{4^1} = 0,208.$$

Автотрансформатор в схеме замещения нулевой последовательности представлен Т-образной схемой, поэтому предварительно определим значения напряжений короткого замыкания каждой из его обмоток, т.е.

$$u_{\text{К В}} = 0,5(u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К В-Н}} - u_{\text{К С-Н}}) = 0,5(11 + 45 - 28) = 14\%;$$

$$u_{\text{К С}} = 0,5(u_{\text{К В-С}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-Н}}) = 0,5(11 + 28 - 45) = -3\%;$$

$$u_{\text{К Н}} = 0,5(u_{\text{К В-Н}} + u_{\text{К С-Н}} - u_{\text{К В-С}}) = 0,5(45 + 28 - 11) = 31\%.$$

Соответствующие им индуктивные сопротивления

$$X_{2^0} = \frac{u_{\text{К В}}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,14;$$

$$X_{6^0} = \frac{u_{кС}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{-3}{100} \cdot \frac{125}{125} = -0,03;$$

$$X_{7^0} = \frac{u_{кН}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{31}{100} \cdot \frac{125}{125} = 0,31$$

и

$$\begin{aligned} X_{8^0} &= (X_{1^0} + X_{2^0}) // X_{7^0} + X_{6^0} = \frac{(X_{1^0} + X_{2^0})X_{7^0}}{X_{1^0} + X_{2^0} + X_{7^0}} + X_{6^0} = \\ &= \frac{(0,0525 + 0,14)0,31}{0,0525 + 0,14 + 0,31} - 0,03 = 0,116; \\ X_{9^0} &= X_{3^0} + X_{4^0} = 0,567 + 0,208 = 0,775. \end{aligned}$$

Найдем значения индуктивных сопротивлений, которые позволяют, используя формулы (14.64), (14.65) и (14.69), определить значения параметров производной (эквивалентной) схемы замещения прямой последовательности:

• сопротивления обратной и нулевой последовательностей относительно точки короткого замыкания при обрыве между точками  $L_2$  и  $L'_2$ , а также  $L_0$  и  $L'_0$

$$X_{K2} = X_{1^2} + X_{2^2} = X_{8^2} = 0,1475;$$

$$X_{K0} = (X_{1^0} + X_{2^0}) // X_{7^0} + X_{6^0} = X_{8^0} = 0,116;$$

• сопротивления обратной и нулевой последовательностей относительно места обрыва при отсутствии короткого замыкания

$$\begin{aligned} X_{L2} &= X_{1^2} + X_{2^2} + X_{3^2} + X_{4^2} + X_{5^2} = \\ &= 0,0375 + 0,11 + 0,227 + 0,208 + 0,875 = 1,4575; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{L0} &= (X_{1^0} + X_{2^0}) // X_{7^0} + X_{6^0} + X_{3^0} + X_{4^0} = X_{8^0} + X_{3^0} + X_{4^0} = \\ &= 0,116 + 0,567 + 0,208 = 0,891; \end{aligned}$$

• взаимные сопротивления обратной и нулевой последовательностей между точкой короткого замыкания и местом обрыва (т.е.  $X_{KL2}$  и  $X_{KL0}$  определяются как напряжения в точке  $K$  соответственно при  $\dot{I}_{K12} = 0$ ,  $\dot{I}_{LA2} = 1$  и  $\dot{I}_{K10} = 0$ ,  $\dot{I}_{LA0} = 1$ )

$$X_{KL2} = X_{1^2} + X_{2^2} = X_{8^2} = 0,1475;$$

$$X_{KL0} = (X_{1^0} + X_{2^0}) // X_{7^0} + X_{6^0} = X_{8^0} = 0,116.$$

В соответствии с (14.64), (14.65) и (14.69) находим

$$\begin{aligned}
 X_K &= X_{K2} + X_{K0} - \frac{(X_{KL2} - X_{KL0})^2}{X_{L2} + X_{L0}} = \\
 &= 0,1475 + 0,116 - \frac{(0,1475 - 0,116)^2}{1,4575 + 0,891} = 0,2631; \\
 X_{KL} &= \frac{X_{KL2} \cdot X_{L0} + X_{KL0} \cdot X_{L2}}{X_{L2} + X_{L0}} = \frac{0,1475 \cdot 0,891 + 0,116 \cdot 1,4575}{1,4575 + 0,891} = 0,128; \\
 X_L &= \frac{X_{L2} X_{L0}}{X_{L2} + X_{L0}} = \frac{1,4575 \cdot 0,891}{1,4575 + 0,891} = 0,553.
 \end{aligned}$$

При этом

$$\begin{aligned}
 X_K + X_{KL} &= 0,2631 + 0,128 = 0,3911; \\
 X_L + X_{KL} &= 0,553 + 0,128 = 0,681.
 \end{aligned}$$

Полученные значения  $X_{KL}$ ,  $X_K + X_{KL}$  и  $X_L + X_{KL}$  позволяют построить производную (эквивалентную) схему замещения прямой последовательности и совместить ее с основной схемой замещения прямой последовательности, убрав из последней источник  $U_{KM}$  и  $\Delta U_{LM}$ . Полученная таким образом совмещенная схема замещения представлена на рис. 14.13, *д*. Преобразуем эту схему относительно точки  $M$  и найдем эквивалентное сопротивление  $X_{1\text{ЭК}}$  и эквивалентную ЭДС  $E_{\text{ЭК}}$ :

$$\begin{aligned}
 X_{1\text{ЭК}} &= (X_{g1} - X_{KL}) // (X_{g1} + X_L + X_{KL}) + X_K + X_{KL} = \\
 &= \frac{(X_{g1} - X_{KL})(X_{g1} + X_L + X_{KL})}{X_{g1} - X_{KL} + X_{g1} + X_L + X_{KL}} + X_K + X_{KL} = \\
 &= \frac{(0,1475 - 0,128)(1,31 + 0,553 + 0,128)}{0,1475 - 0,128 + 1,31 + 0,553 + 0,128} + 0,2631 + 0,128 = 0,4104; \\
 E_{\text{ЭК}} &= \frac{E_1(X_{g1} + X_L + X_{KL}) + E_2(X_{g1} - X_{KL})}{X_{g1} + X_L + X_{KL} + X_{g1} - X_{KL}} = \\
 &= \frac{1(1,31 + 0,553 + 0,128) + 0,85(0,1475 - 0,128)}{0,1475 - 0,128 + 1,31 + 0,553 + 0,128} = 0,9985.
 \end{aligned}$$

Таким образом, ток прямой последовательности в месте короткого замыкания (учтя, что  $\dot{E}_{\text{ЭК}} = j0,9985$ )

$$\dot{I}_{KA1} = \frac{jE_{\text{ЭК}}}{jX_{\text{ЛЭК}}} = \frac{j0,9985}{j0,4104} = 2,433$$

и полный ток в месте короткого замыкания

$$\dot{I}_K = 3\dot{I}_{KA1} = 3 \cdot 2,433 = 7,299$$

или в именованных единицах

$$I_K = I_{K*} I_{\text{б}} = 7,299 \cdot 0,628 = 4,584 \text{ кА.}$$

Напряженис прямой последовательности в точке  $D$  (рис. 14.13,  $\delta$ )

$$\dot{U}_{DA1} = j(X_K + X_{KL})\dot{I}_{KA1} = j(0,2631 + 0,128) \cdot 2,433 = 0,9515.$$

Ток прямой последовательности в линии

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{jE_2 - j\dot{U}_{DA1}}{j(X_9 + X_K + X_{KL})} = \frac{j(0,85 - 0,9515)}{j(1,31 + 0,681)} = -0,051.$$

Ток прямой последовательности от автотрансформатора

$$\dot{I}_{ATA1} = \dot{I}_{KA1} - \dot{I}_{LA1} = 2,433 - (-0,051) = 2,484.$$

Напряженис прямой последовательности в точке  $K_1$

$$\dot{U}_{KA1} = \dot{U}_{DA1} + j(-X_{KL})\dot{I}_{ATA1} = j0,9515 - j0,128 \cdot 2,484 = j0,6335.$$

То же в точке  $L_1'$  (рис. 14.13,  $\delta$ )

$$\dot{U}_{LA1} = \dot{U}_{DA1} + j(X_L + X_{KL})\dot{I}_{KA1} = j0,9515 - j0,681 \cdot 0,051 = j0,917.$$

Симметричные составляющие падения напряжения в месте обрыва

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2} = \Delta\dot{U}_{LA0} = \dot{U}_{LA1} - \dot{U}_{KA1} = j0,917 - j0,6335 = j0,2835.$$

При известных значениях тока обратной последовательности в месте короткого замыкания  $\dot{I}_{KA2}$  (он равен  $\dot{I}_{KA1}$ ) и падении напряжения обратной последовательности в месте обрыва  $\Delta\dot{U}_{LA2}$  (оно равно  $\Delta\dot{U}_{L11}$ ) легко определить ток обратной последовательности в линии (рис. 14.13,  $\epsilon$ )

$$\dot{I}_{LA2} = \frac{jX_{g2} \dot{I}_{KA2} - \Delta \dot{U}_{LA2}}{j(X_{g2} + X_{92})} = \frac{j0,1475 \cdot 2,433 - j0,2835}{j(0,1475 + 1,31)} = 0,051,$$

а ток обратной последовательности от автотрансформатора будет равен

$$\dot{I}_{ATA2} = \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} = 2,433 - 0,051 = 2,382.$$

Напряжение обратной последовательности в месте короткого замыкания можно определить из схемы замещения обратной последовательности (рис. 14.13, з)

$$\dot{U}_{KA2} = -jX_{g2} \left( \dot{I}_{KA2} - \dot{I}_{LA2} \right) = -j0,1475(2,433 - 0,051) = 0,3513,$$

а напряжение нулевой последовательности из соотношения

$$\dot{U}_{K0} = - \left( \dot{U}_{KA1} + \dot{U}_{KA2} \right) = -j(0,6335 - 0,3513) = -j0,2822,$$

Ток нулевой последовательности линии

$$\dot{I}_{LA0} = - \left( \dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} \right) = -(-0,051 + 0,051) = 0,$$

а ток нулевой последовательности от автотрансформатора

$$\dot{I}_{AT0} = \dot{I}_{K0} - \dot{I}_{W0} = 2,433 - 0 = 2,433.$$

Суммарный ток от автотрансформатора в поврежденной фазе (фазе А)

$$I_{AT} = 3I_{K0} = 3 \cdot 2,433 = 7,299$$

или в именованных единицах

$$I_{AT} = I_{*AT} I_G = 7,299 \cdot 0,628 = 4,584 \text{ кА.}$$

Суммарные токи в оборванной фазе линии равны нулю, а суммарные токи в неповрежденных фазах по абсолютной величине одинаковы и их значения составляют

$$\left| \dot{I}_{LB} \right| = \left| \dot{I}_{LC} \right| = \sqrt{3} \left| \dot{I}_{WA1} \right| = \sqrt{3} \cdot 0,051 = 0,0883$$

или в именованных единицах

$$\left| \dot{I}_{LB} \right| = \left| \dot{I}_{LC} \right| = 0,0883 \cdot 0,628 = 0,055 \text{ кА.}$$

## ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

---

---

# КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

---

---

### 15.1. Основные факторы, влияющие на процесс короткого замыкания

При расчете токов короткого замыкания в электроустановках напряжением до 1000 В, в отличие от электроустановок напряжением свыше 1 кВ, пренебрегать активными составляющими элементов расчетной схемы недопустимо. Роль активного сопротивления возрастает по мере уменьшения номинального напряжения электроустановок. Это обусловлено, во-первых, тем, что в электроустановках низкого напряжения широко используются проводники небольшого сечения, меньше  $16 \text{ мм}^2$ , которые не применяются в высоковольтных электроустановках из-за их недостаточной механической прочности и из-за нежелательности возникновения коронных разрядов. Во-вторых, погонная индуктивность воздушных и кабельных линий низкого напряжения меньше, чем индуктивность линий высокого напряжения, так как она зависит от расстояния между токоведущими частями, которое уменьшается по мере уменьшения напряжения электроустановок. Например, расстояние между фазными проводниками воздушной линии напряжением 500 кВ должно быть не менее 7 м, а у линий напряжением 0,4 кВ может быть всего 40 см. Толщина изоляции жил кабелей также существенно уменьшается при уменьшении их номинального напряжения. Уменьшение расстояния между токоведущими частями приводит к уменьшению их индуктивности, в результате чего отношение индуктивности к активному сопротивлению цепей электроустановок уменьшается по мере уменьшения их номинального напряжения.

Расчет коротких замыканий в электроустановках напряжением до 1000 В обычно выполняется с использованием системы именованных единиц. Использование относительных единиц затрудняет учет

нелинейности сопротивлений элементов расчетной схемы. Обычно 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.

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; при нагреве проводников протекающим по ним током; при возникновении электрической дуги; при окислении поверхности соединительных контактов проводников, вызванном агрессивным характером среды. Индуктивное сопротивление цепи меняется лишь при изменении размеров и взаиморасположения проводников и при изменении магнитной проницаемости окружающей среды, что позволяет в большинстве случаев считать его неизменным. Целесообразность учета нелинейного характера индуктивности может появиться лишь при расчете однофазных коротких замыканий в цепях с трехжильными кабелями, проложенными в непосредственной близости со стальными конструкциями.

Влияние температуры  $\vartheta$  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°C для меди и 228°C для алюминия.

В упрощенных расчетах температурный коэффициент сопротивления принимается не зависящим от температуры проводника и равным для меди и алюминия 0,004 1/°C. Соответственно, можно ожидать, что при изменениях температуры проводников от 20 до – 40 °C и от 20 до 80 °C, обусловленных сезонными колебаниями температуры окружающей среды и нагревом проводников токами продолжительных эксплуатационных режимов, их сопротивление будет изменяться в  $(1 + \alpha\theta) = (1 + 0,004 \cdot 60) = 1,24$  раза, где  $\theta$  – диапазон изменения температуры проводника. 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 поливинил-

хлоридной изоляции, равный  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , можно ожидать увеличения сопротивления жил кабелей в  $(1 + 0,004 \cdot 330) = 2,32$  раза. Уменьшение тока, обусловленное нагревом проводников цепи, называется «тепловым спадом тока».

На процесс короткого замыкания в электроустановках напряжением до  $1000\text{ В}$  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. В электроустановках напряжением  $380\text{ В}$  переменного тока и  $220\text{ В}$  постоянного тока, при дуговых коротких замыканиях ток примерно в два раза меньше, чем при металлических коротких замыканиях.

Еще одной особенностью при расчете коротких замыканий в низковольтных электроустановках, является учет влияния асинхронных электродвигателей, которое обусловлено быстрым затуханием апериодической составляющей тока ротора электродвигателя. Эта составляющая возникает в начальный момент короткого замыкания и первые, примерно  $20\text{ мс}$ , обуславливает увеличение периодической составляющей тока статора электродвигателя и соответствующую подпитку электрически близких к нему коротких замыканий. Далее апериодический ток в роторе уменьшается, вместе с ним стремится к нулю и периодическая ЭДС двигателя, в результате чего обмотка статора двигателя шунтирует цепь короткого замыкания, и ток в последней уменьшается.

В отличие от высоковольтных электроустановок расчет коротких замыканий в низковольтных электроустановках следует проводить с учетом переходного сопротивления разъёмных 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 эксплуатации 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  $100 - 200\text{ В}$ , окисная пленка пробивается. При токе  $20\text{ мА}$  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 не стабильными 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 низковольтных электроустановках, кроме разъемных и разборных контактов имеют еще и ветросенные 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 оказывает влияние на точность метода симметричных составляющих при расчете несимметричных коротких замыканий, так как в этом случае возникает или даже 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 1000 В. В редких случаях, когда требуется учесть гармонические составляющие в токах и напряжениях, используются более сложные математические модели, построенные в фазных координатах.

Для расчета однофазных коротких замыканий в системах электроснабжения зданий иногда применяются упрощенные методы, базирующиеся 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»  $Z_{\phi-0}$ , так и через сопротивления прямой  $Z_1$ , обратной  $Z_2$  и нулевой  $Z_0$  последовательностей:

$$\dot{I}_k^{(1)} = \frac{\dot{U}_\phi}{Z_{\phi-0}} = 3 \frac{\dot{U}_\phi}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad (15.1)$$

откуда

$$Z_1 + Z_2 + Z_0 = 3 Z_{\phi-0}. \quad (15.2)$$

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  $\dot{I}_K^{(2)}$ , в этом случае

$$\dot{I}_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{Z_{\phi-\phi}} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}U_\phi}{Z_1 + Z_2}, \quad (15.3)$$

откуда

$$Z_1 + Z_2 = \sqrt{3} Z_{\phi-\phi}. \quad (15.4)$$

С приемлемой для практики точностью, можно принять  $Z_1 = Z_2$  и тогда на основании формул (15.2) и (15.4)

$$Z_0 = 3Z_{\phi-0} - Z_1 - Z_2 = 3Z_{\phi-0} - \sqrt{3}Z_{\phi-\phi}. \quad (15.5)$$

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 «фаза–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 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.

## 15.2. Параметры элементов электроустановок переменного тока, необходимые для расчета переходных процессов

**Сетевой источник питания.** Основным источником питания электроустановок напряжением до 1000 В является высоковольтная сеть. При расчете коротких замыканий высоковольтная сеть замеща-

ется эквивалентным источником ЭДС  $E_{\text{ф.эк}}$  и эквивалентным сопротивлением  $Z_{\text{эк}}$  различных последовательностей, как правило активно-индуктивного характера. Значение ЭДС эквивалентного источника определяется с учетом напряжения  $U_{*(0)}$  в режиме, предшествующем короткому замыканию и выраженному в относительных единицах

$$E_{\text{ф.эк}} = \frac{U_{*(0)} U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3}},$$

где  $U_{\text{срВ}}$  – среднее номинальное напряжение питающей сети.

Эквивалентное полное сопротивление прямой последовательности источника определяется на основе расчетного значения тока трехфазного короткого замыкания  $I_{\text{к}}^{(3)}$

$$Z_1 = \frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3} I_{\text{к}}^{(3)}}. \quad (15.6)$$

Для определения активной  $R_1$  и индуктивной  $X_1$  составляющих полного сопротивления 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  $K_{\text{уд}}$

$$\frac{X_1}{R_1} = -\frac{0,01\omega_{\text{снпк}}}{\ln(K_{\text{уд}} - 1)} = -\frac{\pi}{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}. \quad (15.7)$$

Как правило, нет необходимости уточнять значение отношения  $X_1/R_1$ , 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 (15.7) индуктивное сопротивление сетевого источника питания

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{X_1/R_1}\right)^2}} = \frac{Z_1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}} = \\ &= \frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3} I_{\text{к}}^{(3)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}}, \end{aligned} \quad (15.8)$$

а его активное сопротивление

$$R_1 = \sqrt{Z_1^2 - X_1^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{срВ}}}{\sqrt{3}I_{\text{к}}^{(3)}}\right)^2 - X_1^2}. \quad (15.9)$$

Сопротивления обратной последовательности определяются аналогичным образом, по известному значению тока двухфазного короткого замыкания в узле питающей сети:

$$X_2 = \frac{U_{\text{срВ}}}{I_{\text{к}}^{(2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}} - X_1; \quad (15.10)$$

$$R_2 = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{срВ}}}{I_{\text{к}}^{(2)}}\right)^2 - (X_1 + X_2)^2} - R_1. \quad (15.11)$$

Если высоковольтные синхронные машины электрически удалены от питающего узла, то эквивалентное сопротивление обратной последовательности питающей сети можно считать равным сопротивлению прямой последовательности  $Z_2 = Z_1$ .

Для низковольтных электроустановок, 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 сопротивление нулевой последовательности питающего узла определяется по известному значению тока однофазного короткого замыкания

$$X_0 = \frac{\sqrt{3}U_{\text{срВ}}}{I_{\text{к}}^{(1)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\ln(K_{\text{уд}} - 1)}{-\pi}\right]^2}} - X_1 - X_2; \quad (15.12)$$

$$R_0 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}U_{\text{срВ}}}{I_{\text{к}}^{(1)}}\right)^2 - (X_1 + X_2 + X_0)^2} - R - R_2. \quad (15.13)$$

При расчете сопротивлений обратной и нулевой последовательности сетевого источника питания по значениям токов короткого замыкания предполагается, что отношение индуктивных и активных сопротивлений у всех последовательностей одинаковое.

Эквивалентные сопротивления питающей сети необходимо привести к ступени напряжения, для которой выполняется расчет корот-

кого замыкания. Для этого можно использовать коэффициент трансформации, определенный через отношение средних номинальных напряжений распределительной сети электроустановки  $U_{\text{срН}}$  из принятого ряда средних номинальных напряжений равных 0,4; 0,23 кВ, и питающей сети  $U_{\text{срВ}}$  (см. гл. 2):

$$\overset{\circ}{Z} = Z \frac{U_{\text{срН}}^2}{U_{\text{срВ}}^2}.$$

Если требуется учесть использование отводов от обмотки высшего напряжения трансформатора, переключаемых без возбуждения (ПВВ) или регулируемых под нагрузкой (РПН), то вместо средних номинальных напряжений необходимо использовать реальный коэффициент трансформации питающего трансформатора.

**Синхронные генераторы.** В качестве резервных источников питания в низковольтных электроустановках иногда используются низковольтные синхронные генераторы. Расчет параметров синхронных генераторов практически не отличается от расчета параметров высоковольтных синхронных машин по известным паспортным или каталожным данным:

- номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ ;
- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ;
- сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$X_{*d(\text{ном})}'';$$

- индуктивное сопротивление обратной последовательности

$$X_{*2(\text{ном})}'';$$

- постоянная времени затухания аperiodической 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 должны быть дополнительно явно указаны сопротивления нулевой последовательности  $X_{*0(\text{ном})}$  и  $R_{*0(\text{ном})}$ . Эти сопротивления имеют большой разброс значений и определяются по результатам натурных испытаний.

Индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей генераторов в именованных единицах вычисляются по формулам:

$$X_1 = X_{*d(\text{ном})}'' \frac{U_{\text{ном}}^2}{P_{\text{ном}} / \cos\varphi_{\text{ном}}}; \quad (15.14)$$

$$X_2 = X_{*2(\text{НОМ})} \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}}, \quad (15.15)$$

а их активные сопротивления прямой и обратной последовательностей

$$R_1 = R_2 = \frac{X_2}{\omega_{\text{СИHX}} T_a^{(3)}}. \quad (15.16)$$

Модуль фазной ЭДС генератора к моменту короткого замыкания вычисляется с учетом параметров предшествующего режима:

$$E_{\Phi} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left( U_{*0(\text{НОМ})} \cos \varphi_0 \right)^2 + \left( U_{*0(\text{НОМ})} \sin \varphi_0 + X_{*d(\text{НОМ})}'' I_{*0(\text{НОМ})} \right)^2}, \quad (15.17)$$

где  $U_{*0(\text{НОМ})}^2$  – напряжение генератора в предшествующем режиме;

$I_{*0(\text{НОМ})}$  – ток генератора в предшествующем режиме;

$\cos \varphi_0$  – коэффициент мощности в предшествующем режиме.

Для большинства низковольтных синхронных генераторов сопротивления  $X_{*d(\text{НОМ})}'' = 0,054 \div 0,18$ . 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 1000В 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 данных для расчетов используются следующие паспортные или каталожные параметры:

- номинальная мощность  $S_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальные напряжения обмоток и фактические коэффициенты трансформации;
- напряжение короткого замыкания между обмотками  $u_{\text{к}}$ ;
- потери короткого замыкания  $\Delta P_{\text{к}}$ .

Сопротивления трансформатора целесообразно вычислять приведенными к напряжению обмотки низшего напряжения  $U_{\text{НОМН}}$ :

$$R_1 = R_2 = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{НОМН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2}; \quad (15.18)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{U_{\text{НОМН}}^2}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\left( \frac{u_{\text{к}}}{100} \right)^2 - \left( \frac{\Delta P_{\text{к}}}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2}. \quad (15.19)$$

Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с обмоткой высшего напряжения, соединенной в треугольник, принимают равными сопротивлениям прямой последовательности:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X_1; \\ R_0 &= R_1. \end{aligned} \right\} \quad (15.20)$$

Если магнитопровод трехфазного трансформатора имеет трехстержневую 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 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 трансформатору и изменяющие пути замыкания магнитных потоков

**Автоматические выключатели.** 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  $R_{\text{конт}}$ . Значения этих сопротивлений по отдельности не нормируются и в паспортных и каталожных данных на автоматические выключатели не приводятся. В них приводятся лишь значения нормируемых номинальных потерь мощности  $\Delta P_{\text{ном}}$  в трех полюсах выключателя, по которому можно лишь ориентировочно оценить суммарное активное сопротивление всех вышеперечисленных элементов выключателя:

$$R_1 = (R_{\text{расц}} + R_{\text{конт}}) \leq \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}^2}. \quad (15.21)$$

Активное сопротивление автоматических выключателей токам обратной и нулевой последовательностей можно принять равными сопротивлениям токам прямой последовательности:

$$R_1 = R_2 = R_0; \quad (15.22)$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = X_{\text{расц}}. \quad (15.23)$$

Более точно сопротивления автоматических выключателей можно определить на основе измерений.

Сопротивления  $R_{\text{конт}}$  зависят в основном от их номинального тока. На основе имеющихся статистических оценок не представляется возможным определить сопротивления отдельно для каждого типа выключателей. У современных типов выключателей существует тенденция уменьшения активного сопротивления, по сравнению с аналогичными по номинальному току выключателями устаревших типов.

При параметризации расчетной схемы следует учитывать тип расцепителей, имеющихся у выключателей.

**Рубильники, магнитные пускатели и контакторы.** Эти аппараты представляются в схемах замещения 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.

$$R_1 = R_2 = R_0 = R_{\text{конт}}. \quad (15.24)$$

**Плавкие предохранители.** Активное сопротивление предохранителей складывается из сопротивлений плавких вставок  $R_{\text{вст}}$ , переходных сопротивлений держателей плавких вставок и сопротивлений присоединительных зажимов  $R_{\text{конт}}$ . По аналогии с автоматическими выключателями, активное сопротивление плавких предохранителей можно оценить по нормируемым номинальным потерям мощности  $\Delta P_{\text{ном}}$ :

$$R_1 = (R_{\text{вст}} + R_{\text{конт}}) \leq \frac{\Delta P_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}^2}, \quad (15.25)$$

причем сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей считаются одинаковыми, т.е.

$$R_1 = R_2 = R_0. \quad (15.26)$$

Индуктивным сопротивлением 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 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 (алюминисвой, свинцовой или в виде стальной ленты) и с непроводящей пластмассовой оболочкой. Кабельная линия может иметь один или несколько параллельно соединенных кабелей («пучок» кабелей).

Сопротивление нулевой последовательности кабельных линий, использующих трехжильные кабели, 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 отсутствующей четвертой жиле кабеля, замыкается по строительной арматуре, контуру заземления, металлическим коммуникациям (трубам). Наибольшая часть тока замыкается по металлическим элементам, расположенным в непосредственной близости от фазных проводников линии. Даже при наличии путей для возврата тока с 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 кабеля. Возможность магнитного насыщения брони кабеля, выполненной из стальной ленты, и расположение кабелей 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 разогрева их током короткого замыкания. Строго говоря, подобный учет следовало бы производить и при определении сопротивлений и других элементов низковольтных электроустановок. Однако в практических расчетах температурный фактор учитывается только при расчете сопротивления кабельных линий. Это оправдано тем, что именно у кабельных линий активное сопротивление преобладает над индуктивным, к тому же кабельные линии в основном и определяют суммарное сопротивление короткозамкнутой

цепи. При коротких замыканиях вблизи от сборных шин растет активное сопротивление трансформатора, шинных конструкций, расцепителей автоматических выключателей или плавких вставок предохранителей, но этот рост на изменение тока короткого замыкания сказывается незначительно, так как эти элементы имеют большие номинальные токи и у них преобладает индуктивная составляющая сопротивления.

Значения погонных активных сопротивлений кабелей в справочниках приводят для продолжительно допустимой температуры, соответствующей материалу изоляции жилы. Поэтому сопротивления кабелей с одинаковым сечением и материалом жил, но с разными видами изоляции жил, например, поливинилхлоридной (ПВХ) и бумажной, отличаются друг от друга на 0,4 – 2,4%.

При расчете тока в начальный момент короткого замыкания активное сопротивление кабелей следует привести к температуре жил кабеля в момент предшествующий короткому замыканию

$$\vartheta_{\text{нач}} = \vartheta_{\text{окр}} + K_3^2 (\vartheta_{\text{доп.прод}} - \vartheta_{\text{окр.норм}}),$$

где  $\vartheta_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, °С;

$K_3 = \frac{I_{\text{расч}}}{I_{\text{доп.прод}}}$  – коэффициент загрузки кабеля (обычно  $K_3 = 0,6$ );

$\vartheta_{\text{доп.прод}}$  – допустимая температура нагрева изоляции в продолжительном режиме °С (для ПВХ – 70 °С, для бумажной – 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;  
 $I_{\text{доп.прод}}$  – допустимый ток продолжительного режима для проводника данного сечения.

Коэффициент для приведения активного сопротивления кабелей к температуре, соответствующей начальному моменту короткого замыкания  $\vartheta_{\text{ном}}$  вычисляется по аппроксимирующей формуле:

$$K_{\vartheta_{\text{нач}}} = \frac{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_{\text{нач}}}{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_{\text{ном}}},$$

где  $\vartheta_{\text{ус}}$  – условная температура (для меди 234 °С, для алюминия 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:

$$X_1 = X_2 = \frac{x_{1\text{пог}} l}{n_{\text{ц}}}; \quad (15.27)$$

$$X_0 = \frac{x_{0\text{пог}} l}{n_{\text{ц}}}; \quad (15.28)$$

$$R_{1\text{нач}} = R_{2\text{нач}} = K_{\vartheta_{\text{нач}}} \frac{r_{1\text{пог}} l + k_{\text{кв}} R_{\text{кв}}}{n_{\text{ц}}}; \quad (15.29)$$

$$R_{0\text{нач}} = K_{\vartheta_{\text{нач}}} \frac{r_{0\text{пог}} l + k_{\text{кв}} R_{\text{кв}}}{n_{\text{ц}}}, \quad (15.30)$$

где  $l$  – длина линии, м;

$n_{\text{ц}}$  – количество параллельных кабелей в линии;

$k_{\text{кв}}$  – количество разборных контактных соединений по длине одной жилы;

$R_{\text{кв}}$  – 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  $K_{\vartheta_{\text{нач}}}$  используется коэффициент  $K_{\vartheta_t}$ , который определяется с учетом превышения температуры жил за счет протекания по ним тока короткого замыкания

$$K_{\vartheta_t} = \frac{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_t}{\vartheta_{\text{ус}} + \vartheta_{\text{нач}}},$$

и тогда температура жил к моменту отключения короткого замыкания, определяется по формуле:

$$\vartheta_t = \left( \vartheta_{\text{нач}} - \vartheta_{\text{ус}} \right) e^{\frac{I_k^2 t / S^2 + \vartheta_{\text{нач}}}{K^2 S^2}} - \vartheta_{\text{ус}},$$

где  $I_k$  – среднеквадратичное значение тока короткого замыкания, А;

$S$  – площадь поперечного сечения жилы, мм<sup>2</sup>;

$K$  – константа, зависящая от физических свойств материала жилы (для меди – 226 А·с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>, для алюминия – 148 А·с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>);

$\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий теплообмен между жилами кабеля, изоляцией жил, оболочкой и броней кабеля (при адиабатическом процессе нагрева жил  $\varepsilon = 1$  и возрастает при увеличении отношения  $t/S$ ).

Значение коэффициента  $\varepsilon$  определяется по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t}{S}} + F^2 B \left( \frac{t}{S} \right)},$$

где  $F$  – коэффициент полноты теплового контакта между жилой и изоляцией (для твердой изоляции принимается равным 0,7, а для маслонаполненных кабелей – 1,0);

$A$  и  $B$  – эмпирические постоянные, определяющие термические характеристики окружающих или соседних неметаллических материалов (измеряемые соответственно в  $\text{мм}/\text{с}^{0,5}$  и в  $\text{мм}^2/\text{с}$ ).

Значения этих постоянных определяются по формулам:

$$A = \frac{C_1}{\sigma_{\text{ж}}} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{и}}}{\rho_{\text{и}}}}; \quad B = \frac{C_2}{\sigma_{\text{ж}}} \frac{\sigma_{\text{и}}}{\rho_{\text{и}}},$$

где  $C_1 = 2464 \text{ мм}/\text{м}$ ;  $C_2 = 1,22 \text{ К мм}^2/\text{Дж}$ ;

$\sigma_{\text{ж}}$  – удельная объемная теплоемкость жил, равная для меди  $3,45 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , для алюминия –  $2,5^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ ;

$\sigma_{\text{и}}$  – удельная объемная теплоемкость изоляции жил, равная: для бумажной пропитанной изоляции кабелей  $2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , для полиэтиленовой изоляции –  $2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , для поливинилхлоридной (ПВХ) изоляции –  $1,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ ;

$\rho_{\text{и}}$  – удельное термическое сопротивление изоляции жил, равное для бумажной пропитанной изоляции кабелей  $6,0 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ , для полиэтиленовой изоляции –  $3,5 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ , для ПВХ изоляции –  $5 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ .

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 искомые сопротивления к моменту отключения короткого замыкания определяются так:

$$\left. \begin{aligned} R_{1t} &= K_{\vartheta_t} R_{1\text{нач}} \\ R_{2t} &= K_{\vartheta_t} R_{2\text{нач}} \\ R_{0t} &= K_{\vartheta_t} R_{0\text{нач}} \end{aligned} \right\} \quad (15.31)$$

Если отношение продолжительности короткого замыкания к сечению жил  $t/S < 0,1 \text{ с}/\text{мм}^2$ , влияние теплообмена между жилами и изоляцией жил незначительно, т.е. процесс нагрева проводников можно считать адиабатическим, при этом  $\varepsilon = 1$ . В этом случае погрешность расчета токов не превышает 5%.

**Шинопроводы.** Активное сопротивление шинопроводов определяется их длиной, сечением и материалом, из которых они сделаны. 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 сопротивление шинопровода зависит и от сопротивлений разборных контактных соединений  $R_{\text{конт}}$ , количество которых может быть большим, если шинопровод собирается из отрезков (секций) шин небольшой длины.

Индуктивное сопротивление шинопровода зависит от расстояния (просвета) между шинами и их взаимного расположения. Поэтому индуктивное сопротивление некомплектных шинопроводов 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 шинопроводов приводятся в справочниках.

Активные и индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей шинопровода определяются по формулам:

$$R_1 = R_2 = r_{\text{пог}} l \left[ 1 + \alpha (\vartheta_{\text{раб}} - 20) \right] + R_{\text{кк}} (n_{\text{ш}} + 1); \quad (15.32)$$

$$X_1 = X_2 = x_{\text{пог}} l, \quad (15.33)$$

а соответствующие сопротивления нулевой последовательности – по формулам:

$$R_0 = r_{0\text{пог}} l \left[ 1 + \alpha (\vartheta_{\text{раб}} - 20) \right] + 3R_{\text{кк}} (n_{\text{ш}} + 1); \quad (15.34)$$

$$X_0 = x_{0\text{пог}} l. \quad (15.35)$$

где  $r_{\text{пог}}$  и  $r_{0\text{пог}}$  – погонные активные сопротивления прямой и нулевой последовательности шинопровода при 20 °С, мОм/м;

$x_{\text{пог}}$  и  $x_{0\text{пог}}$  – погонные индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности шинопровода, мОм/м;

$\alpha$  – коэффициент температурного изменения активного сопротивления материала шинопровода (для алюминия и меди можно принять  $\alpha = 0,004$ );

$\vartheta_{\text{раб}}$  – рабочая температура, которая определяется также, как и для кабеля, с учетом температуры окружающей среды и загрузки током в предшествующем режиме;

$l$  – длина шинопровода, м;

$n_{\text{ш}}$  – число последовательно соединенных отрезков шин в каждой фазе;

$R_{\text{кк}}$  – сопротивление разборного контактного соединения отрезков шин, мОм.

**Воздушные линии электропередачи.** В сетях напряжением 0,4 кВ преимущественно используются четырехпроводные воздушные линии. Расчет их сопротивлений не отличается от расчета сопротивлений линий напряжением свыше 1 кВ. При расчете сопротивлений нулевой последовательности сопротивление земли можно не учитывать, так как сопротивление заземляющих устройств, по нормам, может достигать 30 Ом и петля тока, возвращающегося по земле, имеет индуктивность, значительно превышающую индуктивность петли, образованной нулевым проводом линии.

**Токоограничивающие реакторы.** В электроустановках переменного тока напряжением до 1000 В применяются только одиночные токоограничивающие реакторы. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей низковольтных реакторов 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 электродвигатели.** Основная особенность учета синхронных электродвигателей, при расчете коротких замыканий в низковольтных электроустановках, заключается в необходимости более тщательно определять активное сопротивление обмотки статора. Если в паспорте двигателя нет сведений о его активном и индуктивном сопротивлениях прямой последовательности, то их можно определить на основе паспортных или каталожных параметров пусковых характеристик:

$$R_1 = \frac{1 + \sqrt{1 - 0,9976 \cdot \left( \frac{2M_{*0,05}}{I_{*п}} \right)^2}}{39,9 \cdot M_{*0,05}} \cdot \frac{1000U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}; \quad (15.36)$$

$$X_1 = 20 \sqrt{\frac{0,05R}{M_{*0,05}} - R_1^2} \frac{1000U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}, \quad (15.37)$$

где  $M_{*0,05}$  – кратность момента при скольжении 5%;

$I_{*п}$  – кратность пускового тока;

$U_{НОМ}$  – номинальное напряжение, кВ;

$S_{НОМ}$  – номинальная мощность (электрическая полная), кВ·А.

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС электродвигателя определяется по параметрам предшествующего режима:

$$\dot{E}''_{\phi} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} + (R_1 + jX_1) \frac{100P_{\text{ном}} \frac{P_{*(0)}}{P_{\text{ном}}} (1 + jt\text{g}\varphi_{(0)})}{\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cos\varphi_{(0)} \eta_{\text{ном}}}, \quad (15.38)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность (механическая на валу), кВт;

$P_{*(0)}$  – мощность механическая в предшествующем режиме;

$\cos\varphi_{(0)}$  – коэффициент мощности в предшествующем режиме;

$\eta_{\text{ном}}$  – коэффициент полезного действия, %.

Приведенные формулы позволяют рассчитать ток от электродвигателя в начальный момент короткого замыкания. Изменение тока синхронного электродвигателя 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 электродвигателями целесообразно использовать математические модели, позволяющие учесть поведение системы возбуждения и механическую инерционность вращающихся частей.

**Асинхронные электродвигатели.** Влияние асинхронных электродвигателей на ток короткого замыкания зависит от электрической удаленности точки короткого замыкания от электродвигателя и момента короткого замыкания. Если в начальный момент короткого замыкания сверхпереходная ЭДС электродвигателя оказывается больше напряжения на его выводах, то последний работает в генераторном режиме и увеличивает ток в точке короткого замыкания. ЭДС электродвигателя в процессе короткого замыкания уменьшается и, при электрически близких коротких замыканиях, стремится к нулю. Скорость изменения ЭДС определяется скоростью изменения токов в роторе. Чем меньше номинальное напряжение электродвигателя 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 электродвигателя «догоняет» вектор ЭДС, и электродвигатель начинает шунтировать точку короткого замыкания. Шунтирующий эффект асинхронного электродвигателя 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:

$$R_1 = \left[ \frac{s_{\text{ном}}}{100} + \frac{M_{* \text{ п}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} (1,62 - 0,0054 \eta_{\text{ном}})}{I_{* \text{ п}}^2 (100 - s_{\text{ном}})} \right] \frac{10U_{\text{ном}}^2 \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (15.39)$$

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, кВ;

$I_{* \text{ п}}$  – 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 электродвигателе.

Индуктивное сопротивление прямой последовательности асинхронного электродвигателя вычисляется по формуле:

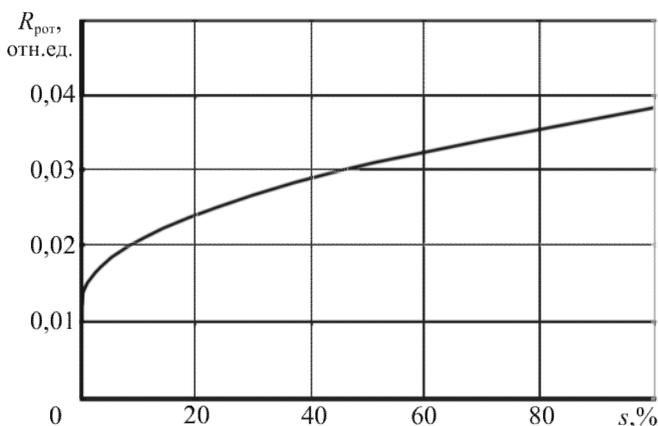
$$X_1 = \sqrt{\left( \frac{1}{I_{* \text{ п}}} \cdot \frac{10U_{\text{ном}}^2 \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} \right)^2 - R_1^2}. \quad (15.40)$$

Комплексное значение сверхпереходной ЭДС асинхронного электродвигателя также как и синхронного электродвигателя определяется из расчета предшествующего режима по формуле (15.38), только в этой формуле знак «+» перед вторым слагаемым следует заменить на знак «-».

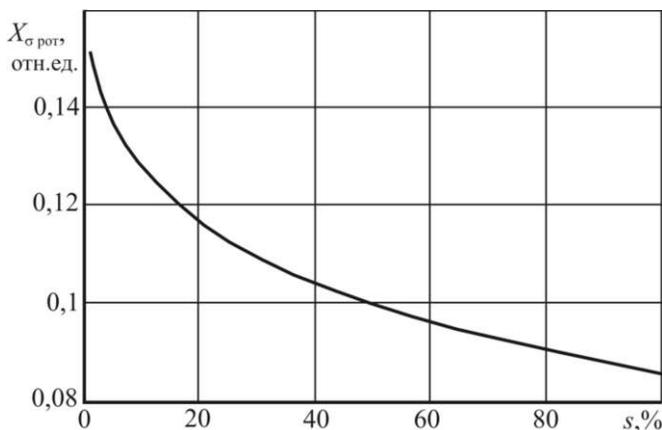
Для определения минимального тока короткого замыкания с учетом шунтирующего эффекта электродвигателя его ЭДС следует принять равной нулю, а составляющие сопротивления считать такими же, как при пуске. В расчетах, требующих особо высокой точности, влияние асинхронных электродвигателей следует определять с учетом зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя от скольжения ротора. Пример такой зависимости приведен на рис. 15.1 и 15.2.

**Обобщенная нагрузка.** Суммарная мощность асинхронных электродвигателей 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. Остальные параметры эквивалентных электродвигателей можно считать совпадающими с параметрами наиболее мощных двигателей сборок. Такой способ позволяет получить оценки максимального и минимального токов короткого замыкания с учетом влияния нагрузки. Также как и в случае отдельных электродвигателей, при расчете максимального тока короткого замыкания следует включать в расчетную схему ЭДС и сопротивления двигателей, соответствующие их скольжению в предшествующем режиме, а при расчете минимального тока короткого замыкания ЭДС эквивалентных электродвигателей считать равными нулю и сопротивления определять для неподвижного ротора.

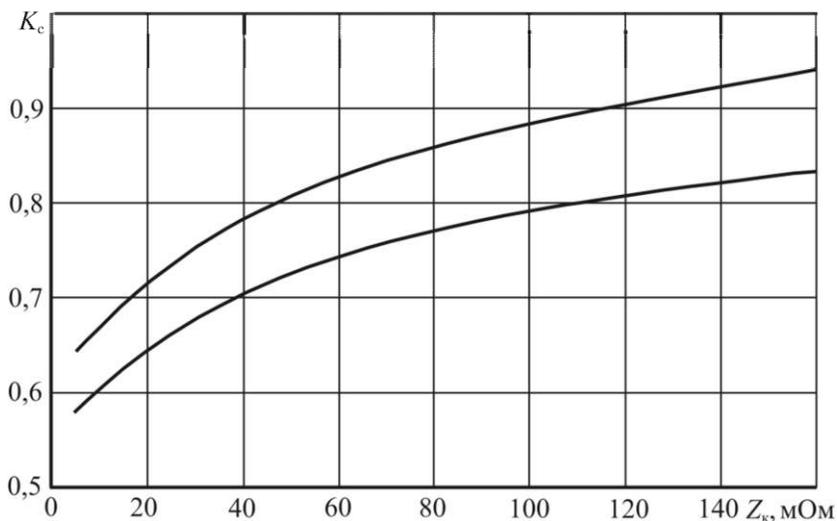


**Рис. 15.1.** Зависимость активного сопротивления эквивалентной обмотки ротора от скольжения асинхронного двигателя А-114-6М



**Рис. 15.2.** Зависимость сопротивления рассеяния эквивалентной обмотки ротора от скольжения асинхронного двигателя А-114-6М

**Электрическая дуга.** Учет электрической дуги в месте короткого замыкания производится введением в расчетную схему ее активного сопротивления  $R_d$ , значение которого определяется на основе усредненных экспериментальных вольтамперных характеристик устойчиво горящей дуги. Реальная электрическая дуга в процессе короткого замыкания под действием электродинамических сил удлиняется и перемещается, удаляясь от источника энергии. Сопротивление дуги является случайной величиной, зависящей от большого количества факторов, в частности, от 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 металлического короткого замыкания и током дугового короткого замыкания посредством коэффициента снижения тока  $K_c$ , кривые зависимости которого от полного сопротивления цепи до точки короткого замыкания  $Z_k$  приведены на рис. 15.3.



**Рис. 15.3.** 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

$$R_d = \sqrt{\frac{U_{\text{срН}}^2}{3I_{\text{п0}}^2 K_c^2} - X_{1\text{эк}}^2 - R_{1\text{эк}}}, \quad (15.41)$$

где  $I_{\text{п0}}$  – начальное значение периодической составляющей тока металлического короткого замыкания;

$R_{1\text{эк}}$  и  $X_{1\text{эк}}$  – соответственно эквивалентное активное и индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания.

Приведенную на рис. 15.3 зависимость  $K_c$  от полного сопротивления цепи короткого замыкания можно аппроксимировать выражениями:

- для начального момента короткого замыкания

$$K_c = 0,6 - 0,025Z_k + 0,114\sqrt{Z_k} - 0,133\sqrt[3]{Z_k};$$

- 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. 15.4. Аппроксимирующее выражение такой зависимости получено из зависимости  $K_c = f(Z_k)$  в произвольный момент времени:

$$R_d = \frac{47}{I_d^{0,28}} - 15, \quad (15.42)$$

где  $I_d$  – ток дуги, кА.

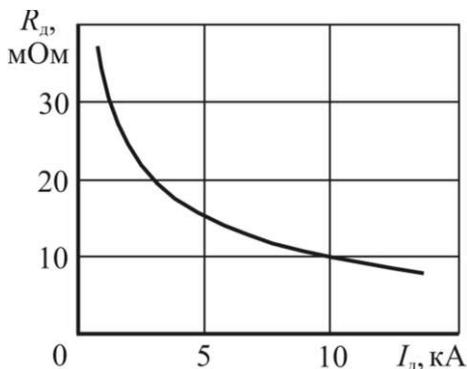


Рис. 15.4. Зависимость сопротивления электрической дуги от тока в дуговом столбе

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.

### **15.3. Параметры элементов электроустановок постоянного тока, необходимые для расчета переходных процессов**

**Общие положения.** В электроустановках постоянного тока источниками энергии являются аккумуляторные батареи и полупроводниковые преобразователи – зарядно-подзарядные агрегаты и конверторы. На ток короткого замыкания 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 аккумуляторов зависит от 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 с присмелой 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 макси-

мально 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 низковольтных электроустановках переменного тока. 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. 15.5.

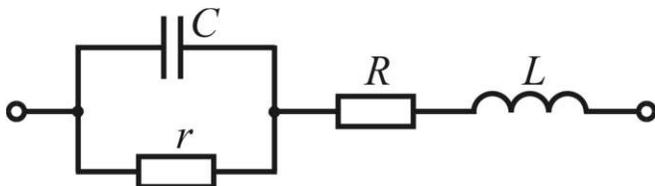
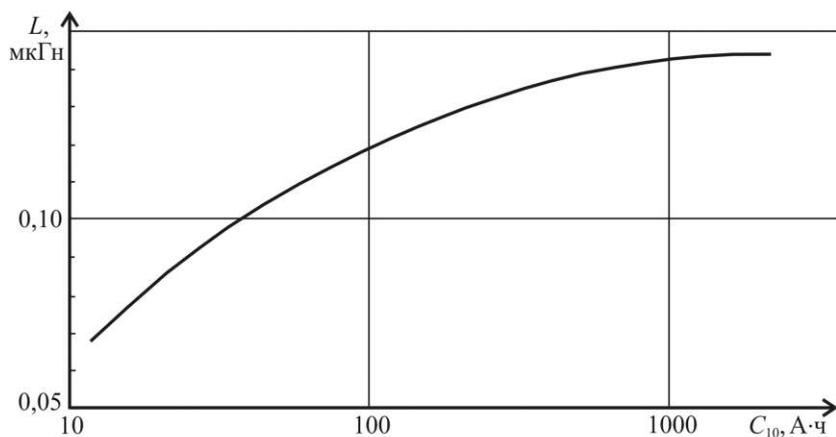


Рис. 15.5. Эквивалент внутреннего сопротивления аккумуляторов

Емкость  $C$  является электрической и ее не следует путать с электрохимической емкостью аккумуляторов. Электрохимическая емкость определяется количеством свинца, участвующего в электрохимических реакциях при заряде и разряде аккумуляторов, а электрическая емкость – конструкцией аккумуляторов, а именно, площадью пластин и расстоянием между ними. Электрическая емкость аккумуляторов не является константой, так как изменяется в зависимости от состояния и степени заряженности аккумулятора. Она также зависит и от тока в цепи с аккумулятором. Непостоянство электрической емкости

обусловлено, в частности, и изменением проводимости электролита в приэлектродных слоях пластин, что изменяет эффективное расстояние 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. 15.6, где в качестве номинальной электрохимической емкости принята емкость десятичасового разряда  $C_{10}$ ). 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. 15.6. 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 сопротивление самих токовыводов. Этой составляющей на рис. 15.5 соответствует элемент  $R$ .

Вторая, наиболее нелинейная, составляющая – сопротивление при-  
 электродных слоев, образующихся на стыке пластин и электролита.  
 Третья составляющая – сопротивление движению ионов между пла-  
 стинами через электролит и сепаратор. Элемент  $r$ , показанный на  
 схеме рис. 15.5, 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 подклю-  
 чается к распределительному щиту. Если межаккумуляторные соеди-  
 нения выполнены не с помощью пайки или сварки, а являются раз-  
 борными, то заметной составляющей полного сопротивления батареи  
 могут стать переходные сопротивления контактов между борнами и  
 внешними проводниками.

При упрощенных расчетах токов короткого замыкания нели-  
 нейную внешнюю вольтамперную характеристику аккумулятора во  
 всем диапазоне возможных значений тока короткого замыкания ап-  
 проксимируют двумя или одной линейной зависимостью. Погреш-  
 ность аппроксимации вольтамперной характеристики на участке с  
 токами более  $0,5C_{10}$  не превышает 5 – 10%. Вольтамперные характери-  
 стики новых полностью заряженных аккумуляторов серии СК при  
 температуре 25 °С обычно аппроксимируют двумя линейными функ-  
 циями (см. рис. 15.7), 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  $150 \cdot N$

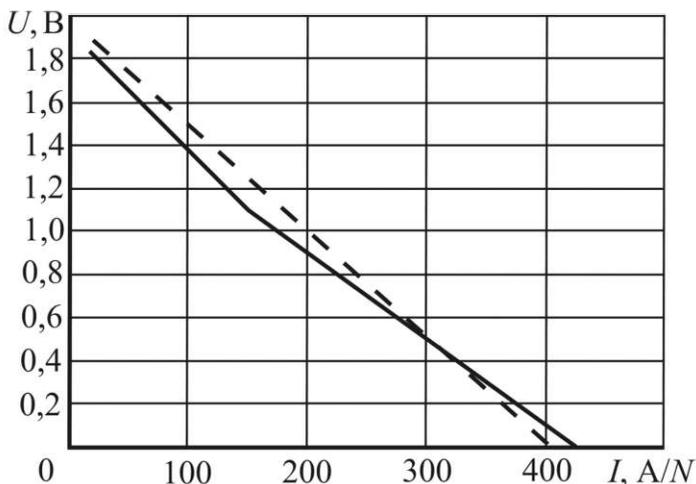
$$E_{ак} = 1,70 \text{ В и } R_{ак} = 4,0/N \text{ мОм,}$$

где  $N = C_{10}/36$  – номер аккумулятора, соответствующий номинальной  
 электрохимической емкости десятичасового разряда  $C_{10}$ .

Вольтамперные характеристики современных аккумуляторов с  
 приемлемой для инженерных расчетов точностью можно аппрокси-  
 мировать одной линейной функцией (см. пунктирную линию на  
 рис. 15.7), т.е. использовать на всем интервале возможных токов ко-  
 роткого замыкания одинаковые значения внутреннего сопротивления  
 и эквивалентной ЭДС аккумулятора. Напряжение холостого хода и  
 ток короткого замыкания спрямленной вольтамперной характери-  
 стики входят в состав паспортных данных аккумуляторов зарубежного  
 производства.

На электростанциях и подстанциях преимущественно исполь-  
 зуются аккумуляторы с плоскими металлическими электродами по-  
 верхностного типа (Планте). Удельное сопротивление таких аккумуля-  
 торов, соответствующее линеаризованной вольтамперной характе-

ристике, находится в интервале значений от 80 до 180 мОм·А·ч. Верхняя граница интервала – 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.



**Рис. 15.7.** Спряmlенная вольтамперная характеристика аккумуляторов серии СК при температуре 25 °С: двухлинейная (сплошная линия) и однолинейная (пунктирная линия)

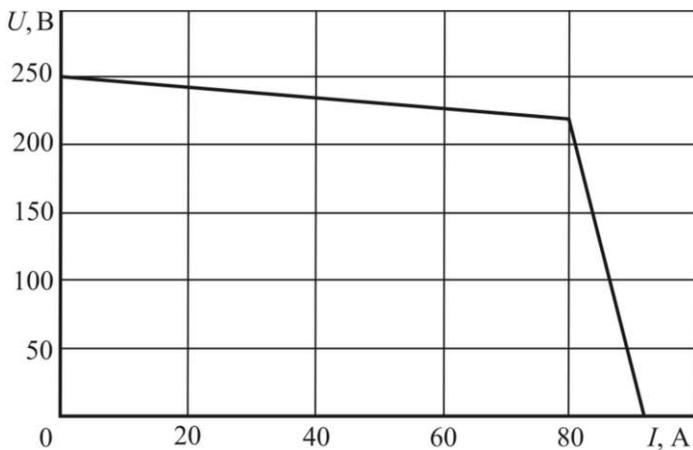
При исследовании коротких замыканий паспортное или каталожное значение внутреннего сопротивления аккумулятора следует скорректировать, исходя из заданных расчетных условий, по температуре аккумулятора, степени его заряженности и сроку службы.

При изменении степени заряженности аккумуляторов и температуры окружающей среды параметры  $E_{ак}$  и  $R_{ак}$  аккумуляторов значительно изменяются. Причем, чем больше аккумулятор разряжен, значение  $R_{ак}$  становится больше, а  $E_{ак}$  – меньше.

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, а сопротивление металлических элементов аккумуляторной батареи при этом несколько возрастает.

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.

**Зарядно-подзарядные агрегаты.** В качестве зарядно-подзарядных агрегатов на современных электростанциях и подстанциях 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. 15.8). Границей между участками характеристики является точка со значением тока, равным номинальному току выпрямительного агрегата.



**Рис. 15.8.** Внешняя вольтамперная характеристика зарядно-подзарядного агрегата серии ВАЗП с номинальным током 80 А

Современные регуляторы обеспечивают поддержание напряжения на выводах аккумуляторной батареи с точностью до  $\pm 0,1\%$ . Более старые типы зарядно-подзарядных агрегатов способны поддерживать напряжение заряда с точностью 2 % и более. Стабилизация напряжения возможна лишь при небольших токах, соответствующих нормальному режиму работы электроустановки. При коротком

замыкании напряженис на выходе зарядно-подзарядных агрегатов определяется 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 зарядно-подзарядный агрегат будет работать на втором участке вольтамперной характеристики. Таким образом, при расчете коротких замыканий зарядно-подзарядный агрегат в схеме замещения можно представлять в виде источника тока, а значение тока источника принимать равным номинальному току зарядно-подзарядного агрегата.

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 схеме замещения расчетной схемы должны быть два источника тока.

При параллельной работе с аккумуляторной батареей зарядно-подзарядные агрегаты имеют в токе короткого замыкания составляющую, равную их номинальному току. Таким образом, если суммарный ток короткого замыкания не превышает номинальный ток зарядно-подзарядных агрегатов, то в нем нет составляющей от аккумуляторной батареи. В ремонтных режимах, когда аккумуляторная батарея отключена, ток короткого замыкания полностью определяется параметрами настройки регуляторов зарядно-подзарядных агрегатов 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. Также неблагоприятно влияет на постоянную времени переходной составляющей использование шинных проводников. В современных аккумуля-

латорных помещениях преимущественно используются одножильные кабели, прокладываемые так, чтобы индуктивность линий была минимальной.

Активное сопротивление шин вычисляется исходя из удельного сопротивления материала шин, их сечения и длины по общезвестной формуле:

$$R_{\text{ш}} = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала шины, Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$l$  – полная длина шин положительной и отрицательной полярности в короткозамкнутой цепи, м;

$S$  – сечение шины, мм<sup>2</sup>.

При температуре 20 °С для меди  $\rho = 0,0172$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, для алюминия  $\rho = 0,0238$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

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  $R_{\text{ш}}$  или используя значения погонных сопротивлений  $R_{\text{пог}}$  (см. табл. ПЗ.3 и ПЗ.4). Шины, которые используются в помещениях с контролируемой температурой, благодаря их большому сечению сравнительно мало нагреваются токами короткого замыкания. В отличие от них, кабельные линии подвержены нагреву в большей степени, поэтому расчет их активных сопротивлений должен обязательно осуществляться с учетом температурного фактора.

При использовании данных о погонном сопротивлении кабелей при переменном токе, приводимых в справочниках, необходимо 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 следует использовать формулу

$$R_{\text{кб}} = K_{\text{э}} K_{\text{нп}} \frac{R_{\text{пог}} l / K_{\text{эф}} + k_{\text{кб}} R_{\text{кб}}}{n_{\text{ц}}}, \quad (15.43)$$

где  $l$  – длина кабельной линии, м;

$K_{\text{эф}}$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления проводников на переменном токе, обусловленное поверхностным эффектом и эффектом близости;

$n_{\text{ц}}$  – количество параллельных жил в линии;

$k_{\text{кв}}$  – количество разборных контактных соединений по длине одной жилы;  
 $R_{\text{кв}}$  – сопротивление одного разборного контактного соединения, мОм.

В отличие от электроустановок переменного тока кабели в электроустановках постоянного тока большую часть времени не нагружены, поэтому температуру их жил 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 сопротивление разноименных полюсов цепи вычисляется отдельно и затем складывается.

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 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. 15.9. В нормальном режиме конвертер добавляет к напряжению батареи от 2 до 60 В, обеспечивая стабилизацию результирующего напряжения при изменении напряжения на выводах батареи. Аналогично другим полупроводниковым преобразователям конвертеры имеют быстродействующую систему ограничения выходного тока. При коротком замыкании конвертер переходит в режим ограничения тока: полярность напряжения на его выходе изменяется на противоположную, т.е. он прекращает работать в режиме вольтодобавки. Выходные зажимы конвертера зашунтированы диодом, который в нормальном режиме закрыт, а при коротком замыкании открывается и ток от батареи, минуя конвертер, напрямую попадает в короткозамкнутую цепь. Таким образом, для учета влияния конвертера на ток короткого замыкания в схему замещения включают источник ЭДС  $I$  В и активное сопротивление, параметры которого в омах соответствуют вольтамперной характеристике открытого полупроводникового диода (см. рис. 15.10):

$$R_{\text{конв}} = \frac{4,8}{I_{\text{ном}}}, \quad (15.44)$$

где  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток конвертера, А.

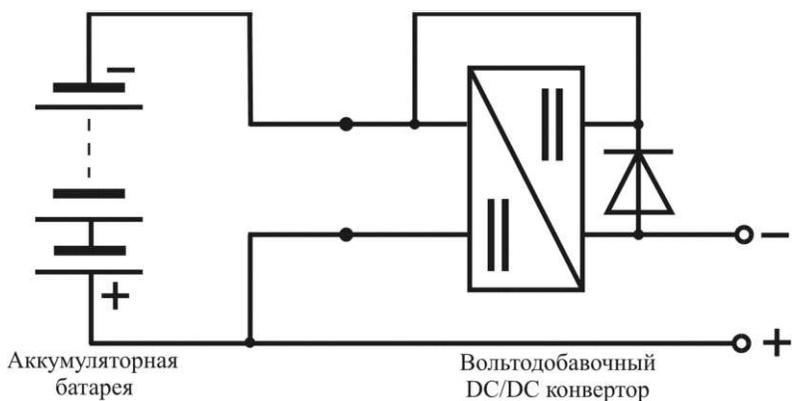


Рис. 15.9. Схема включения вольтодобавочного конвертора

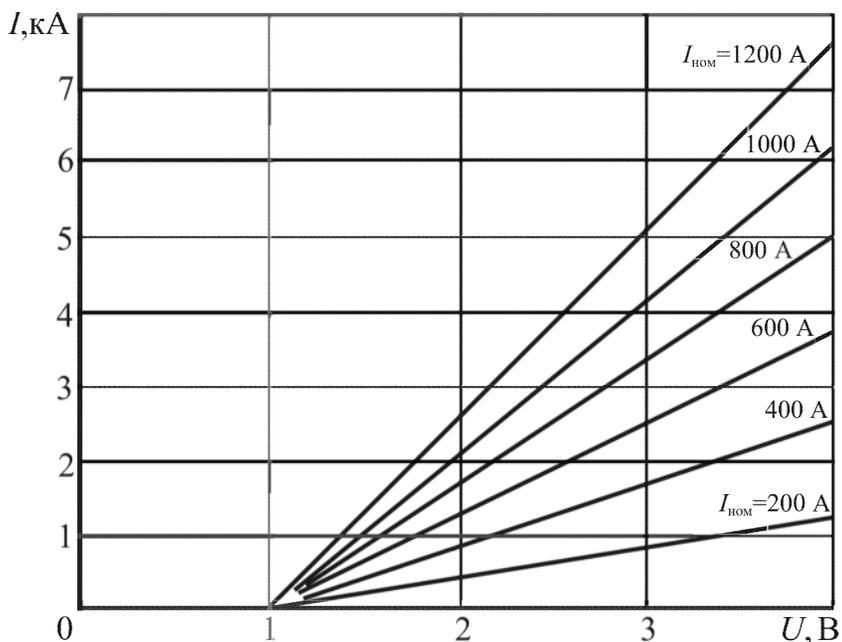


Рис. 15.10. Спрявленные вольтамперные характеристики вольтодобавочных конверторов с номинальным током от 200 до 1200 А

**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 полю-

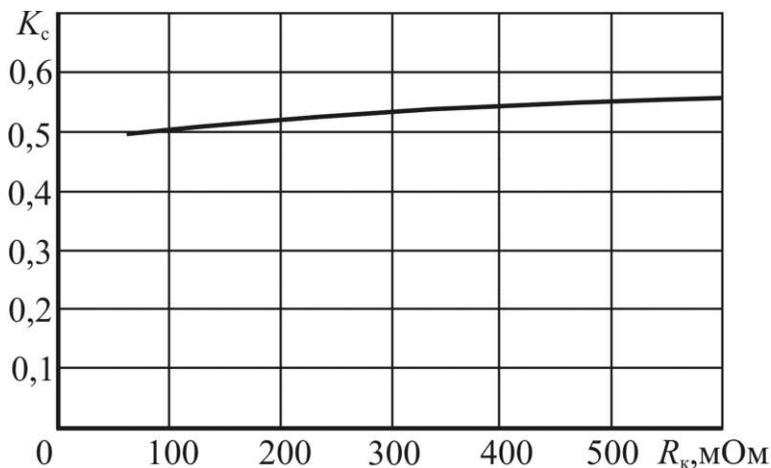
сами, поэтому в однолинейных схемах замещения эквивалентное сопротивление автоматического выключателя равно  $2(R_{расц} + R_{конг})$ , сопротивление рубильника –  $2R_1$ , сопротивление плавкого предохранителя –  $2(R_{вст} + R_{конг})$ . В электроустановках с относительно большими значениями постоянной 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 может возрасти. 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 рис. 15.11 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 короткозамкнутой цепи –  $R_k$ , выраженное в мегаомах. При численных расчетах удобно использовать аналитическую формулу зависимости коэффициента снижения тока от сопротивления:

$$K_c = 0,029 \ln R_k + 0,375.$$

Эмпирическая характеристика, приведенная на рис. 15.11, 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.



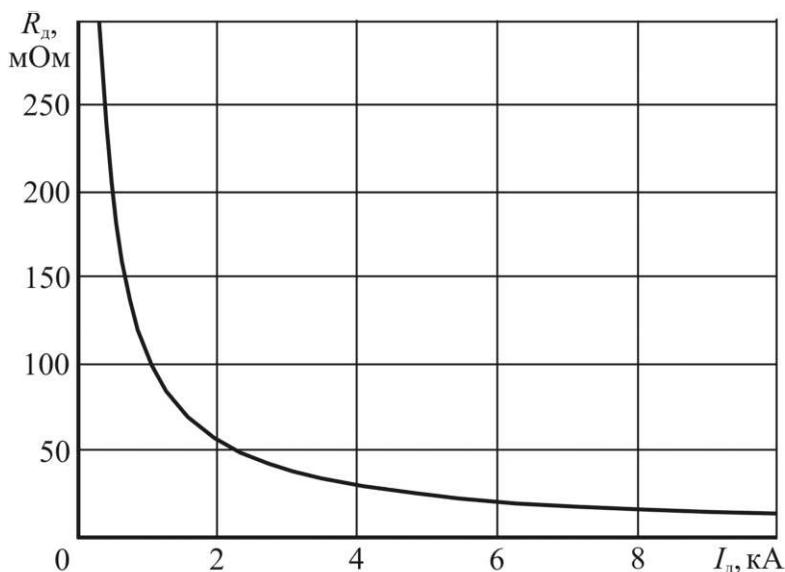
**Рис. 15.11.** Отношение токов дугового и металлического короткого замыкания в зависимости от сопротивления короткозамкнутой цепи

В итерационных алгоритмах расчета коротких замыканий, учитывающих одновременно нелинейность вольтамперных характеристик нескольких элементов короткозамкнутой цепи, более удобным является использование функции  $R_d = f(I_d)$ . С точки зрения физики процессов, происходящих в электрической дуге, выражение зависимости эквивалентного сопротивления дуги  $R_d$  от тока дуги  $I_d$  является более естественным. На рис. 15.12 приведена зависимость  $R_d = f(I_d)$  в графической форме. Эта зависимость получена из функции  $K_c = f(R_k)$  и имеет аппроксимирующую формулу:

$$R_d = 106 I_d^{-0,93},$$

где  $R_d$  – эквивалентное сопротивление дуги, мОм;  
 $I_d$  – ток дуги, кА.

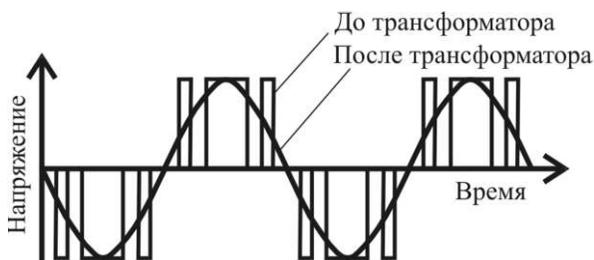
С точки зрения физики процессов, происходящих в электрической дуге, выражение зависимости эквивалентного сопротивления дуги  $R_d$  от тока дуги  $I_d$  является более естественным.



**Рис. 15.12.** Зависимость сопротивления электрической дуги постоянного тока от тока в дуговом столбе

#### **15.4. Электромагнитные переходные процессы 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 (см. рис. 15.13). 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.

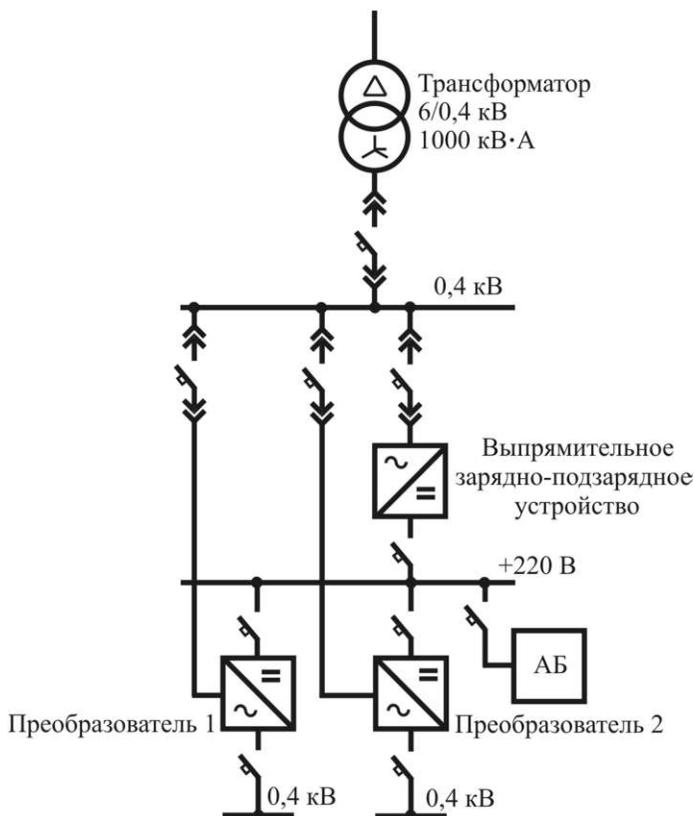


**Рис. 15.13. Принцип широтно-импульсной модуляции:**  
1 – до трансформатора; 2 – после трансформатора

В качестве примера на рис. 15.14 приведен фрагмент схемы электроустановки собственных нужд одной из электростанций, содержащей два полупроводниковых преобразователя. Структурная схема преобразователя показана на рис. 15.15. 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.

Для выбранной электроустановки произведен анализ протекания переходных процессов при коротких замыканиях. На рис. 15.16 приведены осциллограммы напряжений и токов на выходе преобразователя при трехфазном коротком замыкании продолжительностью 50 мс в распределительной сети, подключенной к преобразователю. 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. Короткое замыкание отключалось автоматическим выключателем поврежденной кабельной линии. Из-за неодновременной работы его полюсов 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. Наилучшее каче-

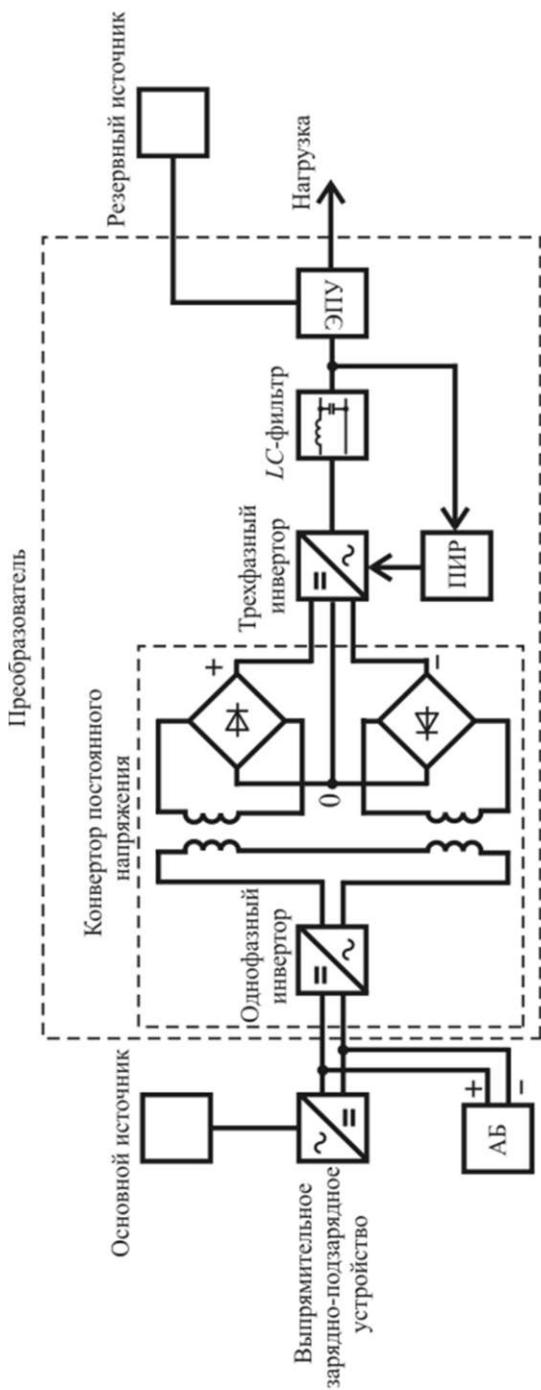
ство переходных процессов обеспечивают преобразователи с высокой базовой частотой и быстродействующими цифровыми регуляторами.



**Рис. 15.14. Фрагмент принципиальной схемы электроустановки собственных нужд электростанции:**

Т – трансформатор; ВУ – выпрямительное зарядно-подзарядное устройство; АБ – аккумуляторная батарея; П1, П2 – полупроводниковые преобразователи

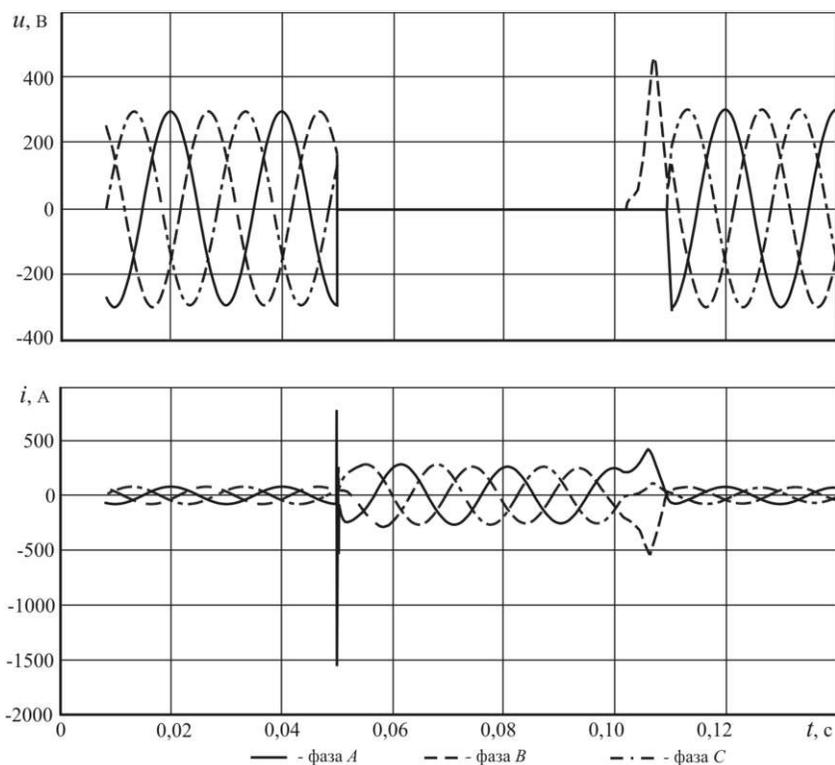
Полупроводниковые преобразователи очень чувствительны к перегрузкам по току, так как их полупроводниковые элементы быстро перегреваются и выходят из строя. Из-за этого уставку ограничения выходного тока принимают такой, чтобы кратность выходного тока по отношению к номинальному току преобразователя была 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.



**Рис. 15.15. Структурная схема преобразователя:**

- 1 – конвертор постоянного напряжения; 2 – трехфазный инвертор; 3 – LC-фильтр; 4 – резервный источник;  
 5 – основной источник; 6 – выпрямительно-подзарядное устройство; 7 – однофазный инвертор;  
 АБ – аккумуляторная батарея; ПИР – пропорционально-интегральный регулятор;

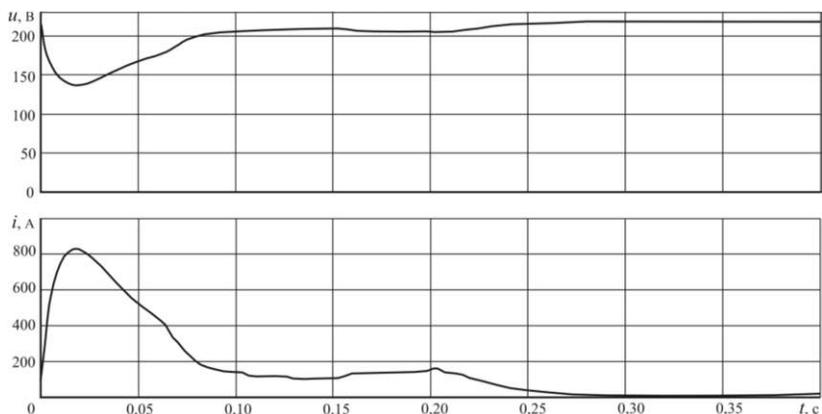
ЭПУ – электронное переключающее устройство



**Рис. 15.16.** Осциллограммы напряжений и токов на выходе преобразователя при трехфазном коротком замыкании продолжительностью 50 мс

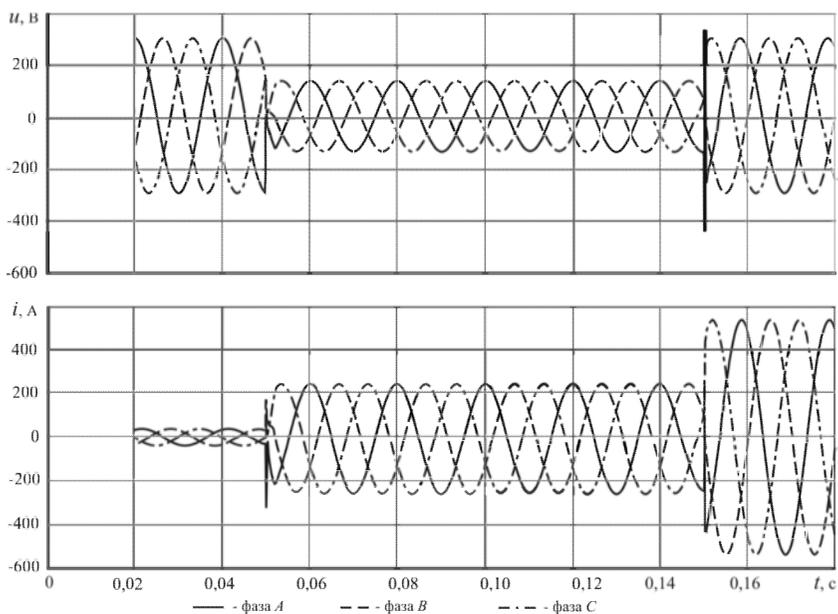
Для повышения надежности электроснабжения нагрузок одновременно с отключением преобразователя может быть обеспечено электронное подключение выходных цепей преобразователя к первичному рабочему или резервному источнику переменного тока.

На рис. 15.17 показаны осциллограммы напряжений и токов на выходе преобразователя при удаленном трехфазном коротком замыкании, при котором из-за отказа автоматического выключателя через 100 мс осуществляется переключение питания с преобразователя на первичный источник переменного тока. Из осциллограммы токов видно, что при удаленном коротком замыкании несмотря на увеличение сопротивления короткозамкнутой цепи в первые 100 мс ток короткого замыкания остается таким же, как и при близком к преобразователю коротком замыкании. После переключения на первичный источник переменного тока параметры короткого замыкания полностью определяются напряжением источника питания и сопротивлением короткозамкнутой цепи.



**Рис. 15.17. Осциллограммы напряжений и токов преобразователя при электрически удаленном трехфазном коротком замыкании**

На рис. 15.18 представлены осциллограммы напряжения и тока внутри преобразователя – на входе конвертора, при его включении и последующем трехфазном коротком замыкании на выходе преобразователя.



**Рис. 15.18. Осциллограммы напряжения и тока на выходе преобразователя при пуске и трехфазном коротком замыкании в выходных цепях конвертора**

Подключение преобразователя к сети переменного тока сопровождается переходным процессом, вызванным зарядом накопительных конденсаторов на выходе конвертора преобразователя. Максимальное значение тока при заряде конденсаторов ограничивается системой регулирования конвертора. Через 0,1 с преобразователь выходит на номинальный режим. В момент времени 0,2 с происходит трехфазное короткое замыкание на выходе преобразователя. Парадоксальным на первый взгляд кажется спад тока, потребляемого конвертором от первичных источников. Возникновение трехфазного короткого замыкания на выходе преобразователя приводит к режиму холостого хода на его входе. С точки зрения баланса входной и выходной активных мощностей такой режим вполне естествен, так как при трехфазном коротком замыкании потребление активной мощности в выходных цепях преобразователя резко уменьшается и, соответственно, уменьшается постоянный ток на входе конвертора. Периодическая составляющая тока короткого замыкания на выходе преобразователя имеет преимущественно индуктивный характер.

## 15.5. Примеры решения задач

*Задача 1.* Рассчитать токи в начальный момент и к моменту отключения дугового короткого замыкания в части электроустановки переменного тока напряжением 0,4 кВ собственных нужд электростанции, расчетная схема которой представлена на рис. 15.19. Расчет рекомендуется выполнить с использованием приведенных выше формул и сравнить с результатами, полученными с помощью компьютерной программы GuPlanAC.

*Исходные данные:*

- узел питания:  $I_K^{(3)} = 4,7 \text{ кА}$ ,  $U_{\text{ср.ном}} = 6,3 \text{ кВ}$ ,  $K_{\text{уд}} = 1,8$ ;
- трансформатор Т1:  $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ,  $U_{\text{ВН}} = 6 \text{ кВ}$ ,  $U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ}$ ,  $u_k = 5,5\%$ ,  $P_k = 11,2 \text{ кВт}$ , схема соединения обмоток  $\Delta / Y_0$ ;
- автоматический выключатель QF1:  $I_{\text{ном}} = 600 \text{ А}$ ;
- автоматический выключатель QF2:  $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$ ;
- автоматический выключатель QF3:  $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$ ;
- кабельная линия 1: кабели марки АВВГ-3×150+50,  $l = 30 \text{ м}$ , число кабелей 2,  $\vartheta_{\text{окр}} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $K_3 = 0,6$ ;
- кабельная линия 2: кабели марки АВВГ-3×70+35,  $l = 20 \text{ м}$ , число кабелей 2,  $\vartheta_{\text{окр}} = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $K_3 = 0,6$ ;
- асинхронный электродвигатель М:  $P_{\text{ном}} = 250 \text{ кВт}$ ,  $s_{\text{ном}} = 1,7\%$ ,  $\eta = 93,5\%$ ,  $\cos \varphi = 0,9$ ,  $I_{* \text{ II}} = 7$ ,  $M_{* \text{ II}} = 2,6$ .

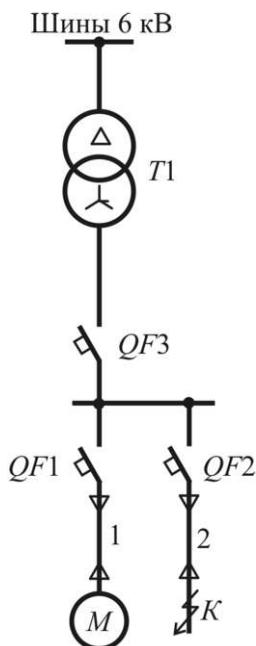


Рис. 15.19. Расчетная схема части электроустановки переменного тока напряжением 0,4 кВ

*Результаты расчета.* Значения параметров симметричных составляющих элементов расчетной схемы к моменту короткого замыкания приведены в табл. 15.1.

Таблица 15.1

**Симметричные составляющие параметров элементов на схеме замещения**

Наименование	$E, \text{ В}$	$R_1, \text{ мОм}$	$X_1, \text{ мОм}$	$R_2, \text{ мОм}$	$X_2, \text{ мОм}$	$R_0, \text{ мОм}$	$X_0, \text{ мОм}$
Узел питания	231	0,221	3,11	0,221	3,11	—	—
Автоматический выключатель $QF3$	0	0,11	0,05	0,11	0,05	0,11	0,05
Автоматический выключатель $QF2$	0	0,55	0,1	0,55	0,1	0,55	0,1
Автоматический выключатель $QF1$	0	0,37	0,084	0,37	0,084	0,37	0,084
Кабельная линия 2	0	4,23	0,78	4,23	0,78	29,4	3,54
Кабельная линия 1	0	2,96	1,13	2,96	1,13	29,4	5,57
Асинхронный двигатель $M$	194	17,4	67,6	17,4	67,6	—	—
Трансформатор $T1$	0	1,79	8,62	1,79	8,62	1,79	8,62

Температура токоведущих жил кабеля 2 в начальный момент трехфазного металлического короткого замыкания составляет 39 °С.

Токи в начальный момент металлического короткого замыкания:  $I_{п0}^{(3)} = 17,3$  кА;  $I_{п0}^{(2)} = 15,0$  кА;  $I_{п0}^{(1)} = 11,4$  кА.

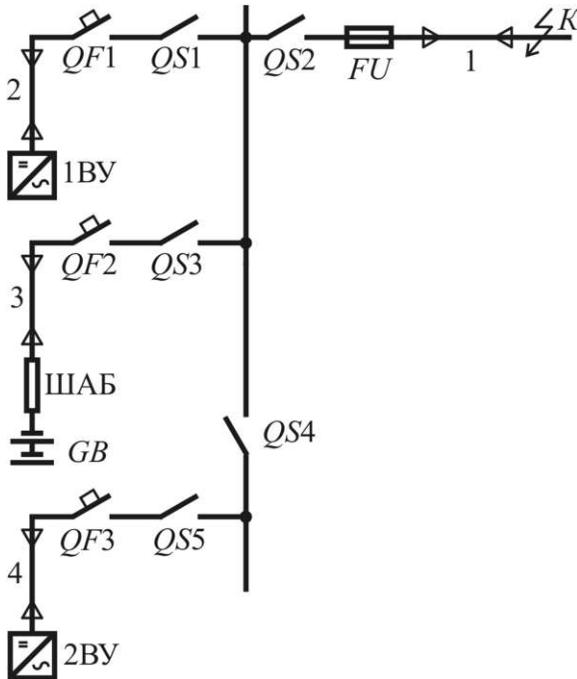
Токи в начальный момент дугового короткого замыкания:  $I_{п0}^{(3)} = 11,8$  кА;  $I_{п0}^{(2)} = 10,2$  кА;  $I_{п0}^{(1)} = 8,07$  кА.

Токи к моменту отключения металлического короткого замыкания ( $t = 0,35$  с):  $I_{пт}^{(3)} = 17,3$  кА;  $I_{пт}^{(2)} = 15,0$  кА;  $I_{пт}^{(1)} = 11,4$  кА.

Температура токоведущих жил кабеля 2 к моменту отключения трехфазного металлического короткого замыкания равна 101 °С.

Токи в момент отключения дугового короткого замыкания ( $t = 0,35$  с):  $I_{пт}^{(3)} = 10,3$  кА;  $I_{пт}^{(2)} = 9,09$  кА;  $I_{пт}^{(1)} = 7,19$  кА.

**Задача 2.** Рассчитать токи в начальный момент и к моменту отключения дугового короткого замыкания в электроустановке оперативного постоянного тока подстанции, схема которой представлена на рис. 15.20.



**Рис. 15.20.** Расчетная схема части электроустановки оперативного постоянного тока

*Исходные данные:*

- автоматический выключатель  $QF1$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- рубильник  $QS1$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- рубильник  $QS2$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- плавкий предохранитель  $FU$ :  $I_{ном} = 20$  А;
- кабельная линия 1: кабели марки АВВГ-2×2,5,  $l = 38$  м, число кабелей 2,  $\vartheta_{окр} = 15$  °С,  $K_3 = 0$ ;
- кабельная линия 2: кабель марки ААБнЛГ-2×25,  $l = 9$  м, число кабелей 1,  $\vartheta_{окр} = 15$  °С,  $K_3 = 0$ ;
- зарядное устройство 1ВУ: тип ВА3П,  $U_{ном} = 232$  В,  $I_{ном} = 140$  А;
- автоматический выключатель  $QF2$ :  $I_{ном} = 140$  А;
- рубильник  $QS3$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- кабельная линия 3: кабель марки ВВГ-2×120,  $l = 40$  м, число кабелей 1,  $\vartheta_{окр} = 15$  °С,  $K_3 = 0$ ;
- медная шинная конструкция ШАБ:  $S = 113$  мм<sup>2</sup>,  $l = 20$  м;
- рубильник  $QS4$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- аккумуляторная батарея  $GB$ : тип СК-8,  $C_{10} = 288$  А·ч,  $N = 108$ ;
- автоматический выключатель  $QF3$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- рубильник  $QS5$ :  $I_{ном} = 100$  А;
- кабельная линия 4: кабель марки ААБнЛГ-2×25,  $l = 10$  м, число кабелей 1,  $\vartheta_{окр} = 15$  °С,  $K_3 = 0$ ;
- зарядное устройство 2ВУ: тип ВА3П,  $U_{ном} = 232$  В,  $I_{ном} = 80$  А.

Расчет токов выполнен с помощью компьютерной программы GuPlanDC.

*Результаты расчета.* Ток в начальный момент металлического короткого замыкания  $I_{п0} = 0,371$  кА.

Ток в начальный момент дугового короткого замыкания  $I_{п0} = 0,208$  кА.

Температура жил кабеля к моменту отключения короткого замыкания ( $t = 0,4$  с)  $\vartheta = 23$  °С.

Ток к моменту отключения дугового короткого замыкания ( $t = 0,4$  с)  $I_{пт} = 0,208$  кА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

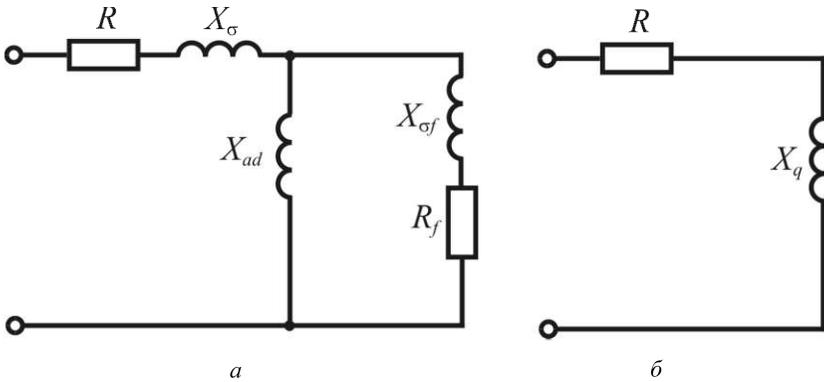
1. Крючков, И.П. Электромагнитные переходные процессы в электро-энергетических системах: учеб. пособие для вузов / И.П. Крючков. – М.: Издательство МЭИ, 2000.
2. Крючков, И.П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учеб. пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова и В.А. Старшинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электро-энергетических системах: учебник для вузов / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970.
4. Мамиконянц, Л.Г. Анализ некоторых аспектов переходных и асинхронных режимов синхронных и асинхронных машин / Л.Г. Мамиконянц. – М.: Издательство «ЭЛЕКС-КМ», 2006.
5. Вайнер, И.Г. Кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания мощных генераторов с учетом влияния энергосистемы / И.Г. Вайнер, И.П. Крючков // Электричество. – 1976. – № 10. – С. 53–56.
6. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
7. ГОСТ Р 50270-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
8. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
9. ГОСТ Р 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
10. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
11. ГОСТ 28895-91 (МЭК 949-88). Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
12. Коган, Ф.Л. Развитие конструкций, параметры и режимы мощных турбогенераторов / Ф.Л. Коган. – М.: ИнФРА-М, 2017.
13. Мамиконянц, Л.Г. О переходных процессах в синхронных машинах с успокоительными контурами на роторе / Л.Г. Мамиконянц // Электричество. – 1954. – №7. – С. 10–15.
14. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

15. Важнов, А.Н. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.Н. Важнов. – Л.: Энергия, 1980.
16. Дроздов А.Д. Нссимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релсйной защиты: учебное пособие / А.Д. Дроздов. – Новочеркасск: издательство Новочеркасского ПИ, 1977.
17. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования; под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. Шиша, М.А. Учет влияния электрической дуги на ток КЗ в сетях напряжением до 1 кВ переменного и постоянного тока / М.А. Шиша. – Электрические станции. – 1996. – № 11. – С. 49–55.
19. Балашов, В.В. Диагностика электроустановок оперативного постоянного тока на подстанциях ОАО «Мосэнерго» / В.В. Балашов, Ю.П. Гусев, А.М. Поляков и др. – Электрические станции. – 2000. – № 8. – С. 39–46.
20. Методические указания по расчету токов короткого замыкания в сети напряжением до 1 кВ электростанций и подстанций с учетом влияния электрической дуги. – М.: Служба передового опыта ОР-ГРЭС, 1993.
21. Дополнения к методическим указаниям по расчету защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций. МУ 34-70-035-83. – М.: Служба передового опыта ПО «СО-ЮЗТЕХЭНЕРГО», 1987.
22. Шакарян, Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины / Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
23. Силовые трансформаторы: справочная книга; под ред. С.Д. Лизунова и А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004.
24. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные и методические материалы для выполнения квалификационных работ: учебно-справочное пособие для вузов / И.П. Крючков, М.В. Пираторов, В.А. Старшинов; под ред. И.П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015.

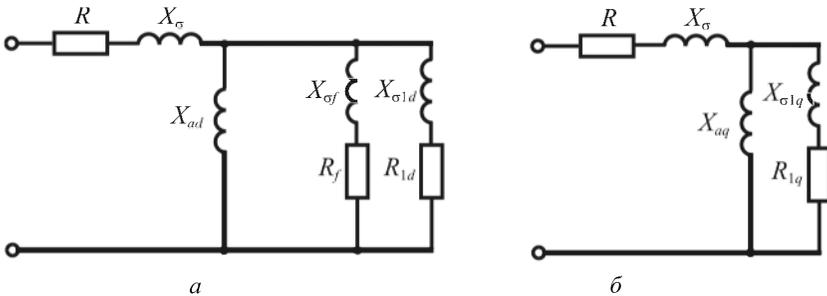
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН**

**П1.1. Определение параметров с использованием  
экспериментальных данных**

Для расчета переходных процессов синхронные машины заменяются схемами замещения, представленными на рис. П1.1 и П1.2. На них все параметры синхронных машин приведены к цепи якоря.



**Рис. П1.1. Схемы замещения синхронной машины  
без учета демпферных контуров:**  
а – по продольной оси; б – по поперечной оси



**Рис. П1.2. Схемы замещения синхронной машины  
с учетом демпферных контуров:**  
а – по продольной оси; б – по поперечной оси

В заводских справочных данных по синхронным машинам обычно указываются следующие параметры:

- номинальная полная мощность  $S_{\text{ном}}$ , МВ·А;
- номинальная активная мощность  $P_{\text{ном}}$ , МВт;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ ;
- номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ , кВ;
- номинальный ток якоря  $I_{\text{ном}}$ , А;
- номинальное напряжение обмотки возбуждения  $U_{f\text{ном}}$ , В;
- номинальный ток возбуждения  $I_{f\text{ном}}$ , А;
- ток возбуждения при холостом ходе машины и номинальном напряжении якоря  $I_{f_0}$ , А;
- отношение короткого замыкания  $K_C$ ;
- сопротивление постоянному току обмотки якоря  $R$ , Ом, при одной или двух значениях температуры;
- сопротивление постоянному току обмотки возбуждения  $R_f$ , Ом, при одной или двух значениях температуры;
- синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $X_d$ , отн. ед.;
- синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $X_q$ , отн. ед.;
- переходное индуктивное сопротивление по продольной оси  $X'_d$ , отн. ед.;
- сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси  $X''_d$ , отн. ед.;
- сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $X''_q$ , отн. ед.;
- индуктивное сопротивление обратной последовательности  $X_2$ , отн. ед.;
- постоянная времени затухания свободной апериодической составляющей тока якоря  $T_a$ , с;
- 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.

Значения параметров  $I_{f_0}$ ,  $R$ ,  $R_f$ ,  $X_d$ ,  $X_q$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $X''_q$ ,  $X_2$ ,  $T'_{d0}$ ,  $T'_d$ ,  $T''_{d0}$ ,  $T''_d$  могут быть определены и экспериментально. При сопостав-

лении экспериментально полученных данных с расчетными заводскими предпочтением, как правило, рекомендуется отдавать экспериментальным данным. Особенно это касается значений параметров  $X'_d$ ,  $T'_{d0}$ ,  $T'_d$ ,  $T''_{d0}$  и  $T''_d$  машин с демпферными контурами, так как заводские расчеты параметров, по крайней мере до недавнего времени, производились без учета соизмеримости собственных постоянных времени обмотки возбуждения и демпферного контура по продольной оси, т.е. использовались формулы, практически верные лишь при условии, что  $T_{f0} \gg T_{1d0}$ .

Экспериментальным путем могут быть относительно легко определены отсутствующие в справочных материалах, но нужные для правильного построения схем замещения синхронных машин следующие параметры:

- индуктивное сопротивление рассеяния якоря  $X_\sigma$  на основании измерений при вынутом роторе;
- постоянные времени  $T_{f0}$ ,  $T_{1d0}$ ,  $T'_f$  и  $T'_{1d}$  из опытов гашения магнитного поля при разомкнутом и замкнутом контуре якоря и при включенном в контур возбуждения какого-либо элемента, сопротивление которого можно изменять.

При наличии данных по перечисленным параметрам можно описанным ниже расчетным путем определить значения недостающих параметров:  $X_{ad}$ ,  $R_f$ ,  $X_{\sigma f}$ ,  $R_{1d}$ ,  $X_{\sigma 1d}$ , входящих в схему замещения синхронной машины по продольной оси.

Сопротивление постоянному току обмотки возбуждения  $R_f$ , приведенное к обмотке якоря и выраженное в относительных единицах, связано с индуктивным сопротивлением взаимной индукции  $X_{ad}$  следующим соотношением:

$$R_f = R_{f(\text{им})} \frac{X_{ad}^2 I_{f\text{н(им)}}^2 \cdot 10^{-6}}{K_c^2 X_d^2 S_{\text{ном(им)}}}, \quad (\text{П1.1})$$

где «(им)» в индексе указывает на то, что соответствующий параметр выражен в импедансных единицах; остальные параметры выражены в относительных единицах.

Сопротивление обмотки возбуждения как правило задается в именованных единицах при некоторой начальной температуре  $\vartheta_0$  (обычно это 15 °С). Поэтому оно должно быть приведено к рабочей температуре  $\vartheta_p$  по формуле

$$R_{f(\text{им})} = R_{f0(\text{им})} \frac{\vartheta_{yc} + \vartheta_p}{\vartheta_{yc} + \vartheta_0}, \quad (\text{П1.2})$$

где  $R_{f0(\text{им})}$  – сопротивление обмотки возбуждения при начальной температуре, Ом;

$\vartheta_{yc}$  – некоторая условная температура, которая зависит от материала обмотки возбуждения: для твердотянутой меди  $\vartheta_{yc} = 242$  °С; для отожженной меди  $\vartheta_{yc} = 234$  °С.

Входящее в формулу (П1.1) индуктивное сопротивление взаимной индукции  $X_{ad}$  связано с  $X_d$  и  $X_\sigma$  простым соотношением:

$$X_{ad} = X_d - X_\sigma, \quad (\text{П1.3})$$

поэтому выражение (П1.1) можно представить в таком виде:

$$R_f = R_{f(\text{им})} \frac{(X_d - X_\sigma)^2 I_{f\kappa(\text{им})}^2 \cdot 10^{-6}}{K_c^2 X_d^2 S_{\text{ном(им)}}}. \quad (\text{П1.4})$$

Для машины без демпферных контуров на роторе найденное опытным путем значение собственной постоянной времени обмотки возбуждения  $T'_{f0}$  и определенное по формуле (П1.4) сопротивление обмотки возбуждения позволяют, используя формулу

$$T'_{f0} = \frac{X_f}{R_f}, \quad (\text{П1.5})$$

найти индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$X_f = T'_{f0} R_f. \quad (\text{П1.6})$$

Искомое индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения равно

$$X_{\sigma f} = X_f - X_{ad}. \quad (\text{П1.7})$$

Для синхронной машины с демпферными контурами на роторе по оси  $d$  справедливы все приведенные выше формулы. Постоянные времени продольного демпферного контура  $T'_{1d0}$  и  $T'_{1d}$  связаны с другими параметрами машины соотношениями:

$$T'_{1d0} = \frac{X_{1d}}{R_{1d}}; \quad (\text{П1.8})$$

$$T'_{1d} = \frac{X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d}}{R_{1d}}. \quad (\text{П1.9})$$

Если  $T'_{1d0}$  и  $T'_{1d}$  определены из опытов гашения магнитного поля, то, используя формулы (П1.8) и (П1.9), легко определить  $X_{1d}$

$$X_{1d} = \frac{T'_{1d0} \frac{X_{ad}^2}{X_d}}{T'_{1d0} - T'_{1d}}. \quad (\text{П1.10})$$

Следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния продольного демпферного контура равно

$$X_{\sigma 1d} = X_{1d} - X_{ad}. \quad (\text{П.1.11})$$

В соответствии с (П.1.8) сопротивление  $R_{1d}$  находится по формуле

$$R_{1d} = \frac{X_{1d}}{T_{1d0}}. \quad (\text{П.1.12})$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции по оси  $q$  определяется формулой, аналогичной формуле (П.1.3):

$$X_{aq} = X_q - X_{\sigma}, \quad (\text{П.1.13})$$

Вместе с тем для  $X_q''$  справедливо соотношение

$$X_q'' = X_q - \frac{X_{aq}^2}{X_{1q}}, \quad (\text{П.1.14})$$

откуда следует:

$$X_{1q} = \frac{X_{aq}^2}{X_q - X_q''}. \quad (\text{П.1.15})$$

Индуктивное сопротивление рассеяния поперечного демпферного контура очевидно составляет

$$X_{\sigma 1q} = X_{1q} - X_{aq}. \quad (\text{П.1.16})$$

Сложнее решается вопрос об определении сопротивления постоянному току поперечного демпферного контура  $R_{1q}$ , ибо, как правило, в справочных материалах нет данных о постоянных времени  $T_{1q0}$  и  $T_{1q}''$ . Поэтому если нет возможности проведения относительно сложных опытов для определения хотя бы одной из этих постоянных времени, можно для практических расчетов использовать следующие приближенные оценки:

- для гидрогенераторов и других явнополюсных синхронных машин или принять параметры демпферного контура по поперечной оси теми же, что и демпферного контура по продольной оси, или считать активное сопротивление поперечного демпферного контура  $R_{1q}$  равным активному сопротивлению, получаемому для поперечной оси в опыте по определению индуктивного сопротивления  $X_q''$  стационарным методом (путем соединения обмотки якоря с источником напряжения промышленной частоты при неподвижном роторе) за вычетом активного сопротивления обмотки якоря;

- для турбогенераторов при замещении массивной бочки ротора по поперечной оси одним эквивалентным контуром принять

параметры последнего такими же, как и продольного демпферного контура, т.е.  $R_{1q} = R_{1d}$ ;  $X_{\sigma 1q} = X_{\sigma 1d}$ .

Индуктивное сопротивление обратной последовательности синхронных машин с демпферными контурами может быть определено по формулам (10.4), (10.7) или (10.8), заменив в них  $X'_d$  на  $X''_d$  и  $X_q$  на  $X''_q$ . Оно также может быть определено опытным путем, в частности, при присоединении обмотки якоря к источнику пониженного напряжения обратной последовательности и вращении ротора с номинальной скоростью в положительном направлении.

## П1.2. Определение параметров при отсутствии экспериментальных данных

Важнейшим параметром схемы замещения синхронных машин является сопротивление взаимоиндукции между обмоткой якоря и контурами ротора по продольной оси  $X_{ad}$ . Однако простого соотношения, устанавливающего связь между заданными параметрами синхронной машины и сопротивлением  $X_{ad}$ , не существует. Последнее может быть получено из известного выражения для сверхпереходного сопротивления синхронной машины по продольной оси, если в нем предварительно выразить неизвестные параметры  $X_\sigma$ ,  $X_{\sigma f}$  и  $X_{\sigma 1d}$  через заданные параметры машины и искомое сопротивление  $X_{ad}$ .

С этой целью в качестве исходного выражения целесообразно взять соотношение (П1.1).

Входящее в (П1.1) сопротивление взаимоиндукции  $X_{ad}$  связано с параметрами  $X'_d$ ,  $X_d$  и  $X_f$  известным соотношением:

$$X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}, \quad (\text{П1.17})$$

из которого следует, что

$$X_{ad}^2 = (X_d - X'_d) X_f. \quad (\text{П1.18})$$

Подставив (П1.18) в (П1.1), получим

$$R_f = R_{f(\text{ИМ})} \frac{(X_d - X'_d) X_f I_{f\text{X}(\text{ИМ})}^2 \cdot 10^{-6}}{K_c^2 X_d^2 S_{\text{НОМ}(\text{ИМ})}},$$

откуда собственная постоянная времени обмотки возбуждения

$$T_{f0} = \frac{X_f}{R_f} = \frac{K_c^2 X_d^2 S_{\text{НОМ}(\text{ИМ})}}{(X_d - X'_d) R_{f(\text{ИМ})} I_{f\text{X}(\text{ИМ})}^2 \cdot 10^{-6}}. \quad (\text{П1.19})$$

Постоянные времени  $T_{f0}$  и  $T_{1d0}$  связаны с  $T'_{d0}$  и  $T''_{d0}$  соотношением:

$$T_{f0} + T_{1d0} = T'_{d0} + T''_{d0},$$

поэтому

$$T_{1d0} = T'_{d0} + T''_{d0} - T_{f0}. \quad (\text{П}1.20)$$

Найденные значения  $T_{f0}$  и  $T_{1d0}$  позволяют определить постоянные времена обмотки возбуждения и продольного демпферного контура при короткозамкнутой обмотке статора:

$$T'_f = T_{f0} \frac{X'_d}{X_d}; \quad (\text{П}1.21)$$

$$T'_{1d} = T'_d + T''_d - T'_f. \quad (\text{П}1.22)$$

Отношение постоянных времени  $T'_{1d}$  и  $T_{1d0}$  составляет

$$\frac{T'_{1d}}{T_{1d0}} = \frac{X_{1d} - \frac{X_{ad}^2}{X_d}}{X_{1d}} = 1 - \frac{X_{ad}^2}{X_d X_{1d}}$$

или, учитывая (П1.18),

$$\frac{T'_{1d}}{T_{1d0}} = 1 - \frac{(X_d - X'_d) X_f}{X_d X_{1d}},$$

откуда отношение  $X_f/X_{1d}$  равно

$$\frac{X_f}{X_{1d}} = \frac{X_{\sigma f} + X_{ad}}{X_{\sigma 1d} + X_{ad}} = \frac{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})}{X_d - X'_d}. \quad (\text{П}1.23)$$

Следовательно,

$$X_{\sigma 1d} = \frac{(X_{\sigma f} + X_{ad})(X_d - X'_d)}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})} - X_{ad}. \quad (\text{П}1.24)$$

Исключим из (П1.24) сопротивление рассеяния обмотки возбуждения  $X_{\sigma f}$ , выразив его через  $X'_d$ ,  $X_d$  и  $X_{ad}$ . Как известно, сопротивления  $X_{\sigma f}$ ,  $X'_d$ ,  $X_d$  и  $X_{ad}$  связаны соотношением

$$\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{ad}} = \frac{1}{X'_d - X_d + X_{ad}}, \quad (\text{П}1.25)$$

откуда сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$X_{\sigma f} = \frac{X_{ad} (X'_d - X_d + X_{ad})}{X_d - X'_d}. \quad (\text{П}1.26)$$

При этом (П1.24) принимает вид:

$$X_{\sigma 1d} = \frac{\left[ \frac{X_{ad}(X'_d - X_d + X_{ad})}{X_d - X'_d} + X_{ad} \right] (X_d - X'_d)}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})} - X_{ad} = \quad (\text{П1.27})$$

$$= \frac{X_{ad}^2}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})} - X_{ad}.$$

Выражение, связывающее  $X'_d$ ,  $X_{\sigma f}$ ,  $X_{\sigma 1d}$  и  $X_{ad}$ , можно представить в виде

$$\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma 1d}} + \frac{1}{X_{ad}} = \frac{1}{X'_d - X_d + X_{ad}}. \quad (\text{П1.28})$$

Если в (П1.28) подставить (П1.26) и (П1.27), получим следующее уравнение относительно  $X_{ad}$ :

$$X_{ad}^2 - 2 \frac{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})(X_d - X'_d)}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0}) - (X'_d - X''_d)} X_{ad} +$$

$$+ \frac{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})(X_d - X'_d)(X_d - X''_d)}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0}) - (X'_d - X''_d)} = 0$$

или

$$X_{ad}^2 - 2X_D X_{ad} + X_D (X_d - X''_d) = 0, \quad (\text{П1.29})$$

где

$$X_D = \frac{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0})(X_d - X'_d)}{X_d (1 - T'_{1d}/T_{1d0}) - (X'_d - X''_d)}. \quad (\text{П1.30})$$

Из (П1.29) следует

$$X_{ad} = X_D \pm \sqrt{X_D^2 - X_D (X_d - X''_d)}. \quad (\text{П1.31})$$

Из двух полученных значений  $X_{ad}$  необходимо выбрать то, которое удовлетворяет условию

$$X_d > X_{ad} > X_d - X''_d.$$

Определив  $X_{ad}$ , легко найти другие параметры схемы замещения синхронной машины по продольной оси. В частности,  $X_{\sigma}$  опреде-

ляется из (П1.3),  $X_{\sigma f}$  – по (П1.26),  $X_{\sigma 1d}$  – по (П1.27),  $R_f$  – по (П1.1).  
 Остальные параметры вычисляются как

$$X_f = X_{\sigma f} + X_{ad}; \quad (\text{П1.32})$$

$$X_{1d} = X_{\sigma 1d} + X_{ad}; \quad (\text{П1.33})$$

$$R_{1d} = \frac{X_{1d}}{T_{1d0}}; \quad (\text{П1.34})$$

$$R = \frac{X_2}{T_a}. \quad (\text{П1.35})$$

Параметры синхронной машины по поперечной оси:

$$X_{aq} = X_q - X_{\sigma}; \quad (\text{П1.36})$$

$$X_{\sigma 1q} = \frac{X_{aq} (X_q'' - X_{\sigma})}{X_q - X_q''}; \quad (\text{П1.37})$$

$$X_{1q} = X_{\sigma 1q} + X_{aq}; \quad (\text{П1.38})$$

$$R_{1q} = \frac{X_{1q}}{T'_{1q0}}. \quad (\text{П1.39})$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПРОСТОЙ БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКОЙ

При исследовании характеристик таких электродвигателей сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора и сопротивление намагничивания обычно считают независимыми от степени насыщения стали, а также пренебрегают изменением параметров обмотки ротора при изменении скольжения. Поэтому задача определения параметров указанных электродвигателей сводится к нахождению неизменных сопротивлений известной T-образной схемы их замещения.

Важнейшей величиной, характеризующей соотношение между сопротивлением рассеяния обмотки статора  $X_{\sigma 1}$  и индуктивным сопротивлением ветви намагничивания  $X_{\mu}$ , является коэффициент

$$C_1 = \frac{X_{\mu} + X_{\sigma 1}}{X_{\mu}}. \quad (\text{П2.1})$$

С достаточной степенью точности этот коэффициент может быть определен по формуле

$$C_1 \approx \sqrt{\frac{(1 - s_{\text{ном}}) I_{* \text{п}}^2}{2b_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}}, \quad (\text{П2.2})$$

где  $s_{\text{ном}}$  – номинальное скольжение электродвигателя, отн. ед.;

$I_{* \text{п}}$  – кратность пускового тока электродвигателя по отношению к номинальному;

$b_{\text{ном}}$  – кратность максимального момента по отношению к номинальному;

$\cos \varphi_{\text{ном}}$  – номинальный коэффициент мощности.

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания в относительных единицах при номинальных условиях составляет

$$X_{* \mu(\text{ном})} = \frac{1}{C_1 \left( \sin \varphi_{\text{ном}} - \frac{\cos \varphi_{\text{ном}}}{b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1}} \right)}. \quad (\text{П2.3})$$

Активное сопротивление ветви намагничивания обычно принимают равным нулю.

При найденных значениях  $C_1$  и  $X_{* \mu(\text{ном})}$  индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах при номинальных условиях составляет

$$X_{* \sigma 1(\text{ном})} = (C_1 - 1) X_{* \mu(\text{ном})}. \quad (\text{П2.4})$$

Данные об активном сопротивлении обмотки статора часто отсутствуют. В этом случае его допускается определять по формуле

$$R_{* 1(\text{ном})} = \frac{M_{* \text{п}}}{I_{* \text{п}}^2} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2 \cos^2 \varphi_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}} \eta}. \quad (\text{П2.5})$$

где  $M_{* \text{п}}$  – кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту;  $I_{* \text{п}}$  – кратность пускового тока по отношению к номинальному току;  $\eta$  – КПД электродвигателя, отн. ед.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в относительных единицах при номинальных условиях следует определять по формуле

$$X_{* \sigma 2(\text{ном})} = \frac{1 - s_{\text{ном}}}{2C_1^2 b_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} - \frac{X_{* \sigma 1(\text{ном})}}{C_1}, \quad (\text{П2.6})$$

а активное сопротивление по формуле

$$R_{* 2(\text{ном})} = \frac{s_{\text{ном}} (1 - s_{\text{ном}}) (b_{\text{ном}} + \sqrt{b_{\text{ном}}^2 - 1})}{2C_1^2 b_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (\text{П2.7})$$

## Приложение 3

# ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Таблица 113.1

### Параметры синхронных генераторов до 1000 В

Тип генератора	$P_{ном}$ кВт	$U_{ном}$ В	cosφ <sub>ном</sub>	Индуктивное сопротивление в относительных единицах				
				$X'_d$	$X''_d$	$X''_d$	$X''_2$	$X''_0$
T2-0.75-2БП	750	400/230	0,8	1,18	0,155	0,12	0,146	0,031
T2-0.75-2БП	750	525	0,8	1,27	0,169	0,13	0,158	0,059
T2-1,5-2РУЗ	1500	400/230	0,8	1,38	0,22	0,15	0,188	0,042
T2-0,5-2	500	400/230	0,8	1,54	0,225	0,145	0,177	0,05
T2-1-2	1000	400/230	0,8	1,8	0,22	0,155	0,19	0,05
МС/Г-323-5/20	400	400	0,8	1,02	0,35	0,25	0,244	0,034
ГС/Г-400-375	400	400	0,8	1,09	0,298	—	—	—

Таблица 113.2

### Параметры трансформаторов

Серия	$S_{ном}$ кВ·А	$U_{ном}$ кВ	$\Delta P_{кв}$ кВт	$\eta_{кв}$ %	Схема соединения обмоток	$R_1$ мОм	$X_1$ мОм	$R_0$ мОм	$X_0$ мОм
ТСЗЛ	630	6,00	7,10	5,5	$\Delta Y_0$	2,86	13,67	2,86	13,67
ТМВМ	630	6,00	7,60	5,5	$\Delta Y_0$	3,06	13,63	3,06	13,63
ТСЗА	630	6,00	7,30	5,5	$Y Y_0$	2,94	13,66	30,30	96,20
ТСЛ	630	6,30	6,80	5,5	$Y Y_0$	2,74	13,70	30,30	96,20
ТСЗА	630	6,30	7,30	5,5	$Y Y_0$	2,94	13,66	30,30	96,20
ТСЗ	630	13,80	8,70	8,0	$\Delta Y_0$	3,51	20,01	3,51	20,01
ТСЛ	1000	6,00	9,80	5,5	$Y Y_0$	1,57	8,66	19,10	60,60
ТМВМ	1000	6,00	11,50	5,5	$Y Y_0$	1,84	8,61	19,10	60,60
ТСЗУ	1000	6,00	10,40	5,5	$Y Y_0$	1,66	8,64	19,10	60,60
ТСЗЛ	1000	6,00	10,20	5,5	$\Delta Y_0$	1,63	8,65	1,63	8,65
ТСЗ	1000	6,00	11,20	5,5	$\Delta Y_0$	1,79	8,62	1,79	8,62
ТСЗУ	1000	6,00	11,40	8,0	$Y Y_0$	1,82	12,67	19,10	72,80
ТСЗА	1000	6,00	12,00	8,0	$\Delta Y_0$	1,92	12,66	1,92	12,66
ТСЗ	1000	13,80	12,00	8,0	$\Delta Y_0$	1,92	12,66	1,92	12,66
ТМГ	100	6,00	1,90	4,5	$Y Y_0$	30,40	65,27	253,9	581,8
ТМ	100	6,00	1,97	4,5	$Y Y_0$	31,52	64,73	253,9	581,8
ТМГ	160	6,00	2,55	4,5	$Y Y_0$	15,94	42,08	150,8	367,0
ТСЗ	160	6,00	2,70	5,5	$\Delta Y_0$	16,88	52,35	16,88	52,35
ТМ	160	6,00	2,65	4,5	$Y Y_0$	16,56	41,84	150,8	367,0
ТМВГ	250	6,00	4,20	4,5	$\Delta Y_0$	10,75	26,72	10,75	26,72
ТМ	250	6,00	3,70	4,5	$Y Y_0$	9,47	27,20	96,5	234,9
ТМВГ	250	6,00	3,70	4,5	$Y Y_0$	9,47	27,20	96,5	234,9
ТСЗ	250	6,00	3,80	5,5	$\Delta Y_0$	9,73	33,83	9,73	33,83
ТСЗА	250	6,00	3,80	5,5	$\Delta Y_0$	9,73	33,83	9,73	33,83

Серия	$S_{\text{ноль}}$ кВ·А	$U_{\text{ноль}}$ кВ	$\Delta P_{\text{кз}}$ кВт	$\eta_{\text{кз}}$ %	Схема соеди- нения обмоток	$R_{\text{ф}}$ мОм	$X_{\text{ф}}$ мОм	$R_{\text{0}}$ мОм	$X_{\text{0}}$ мОм
ТСЗ	250	13,80	4,40	8,0	$\Delta Y_0$	11,26	49,95	11,26	49,95
ТМ	250	35,00	3,70	6,5	$\Delta Y_0$	9,47	40,51	9,47	40,51
ТМГ	400	6,00	5,60	4,5	$\Delta Y_0$	5,60	17,11	5,60	17,11
ТМГ	400	6,00	5,40	4,5	$Y/Y_0$	5,40	17,17	55,6	148,7
ТСЗА	400	6,00	5,40	5,5	$\Delta Y_0$	5,40	21,33	5,40	21,33
ТСЗ	400	6,00	5,40	5,5	$\Delta Y_0$	5,40	21,33	5,40	21,33
ТСЗА	400	6,30	5,40	5,5	$\Delta Y_0$	5,40	21,33	5,40	21,33
ТСЗ	400	13,80	6,00	8,0	$\Delta Y_0$	6,00	31,43	6,00	31,43
ТМН	400	35,00	5,50	6,5	$\Delta Y_0$	5,50	25,41	5,50	25,41
ТСЛ	1600	6,00	13,80	5,5	$\Delta Y_0$	0,86	5,43	0,86	5,43
ТСЗЛ	1600	6,00	15,00	5,5	$\Delta Y_0$	0,94	5,42	0,94	5,42
ТСЗУ	1600	6,00	17,00	5,5	$\Delta Y_0$	1,06	5,40	1,06	5,40
ТСЗ	1600	6,00	16,00	5,5	$\Delta Y_0$	1,00	5,41	1,00	5,41
ТМ	25	10,00	0,60	4,5	$Y/Y_0$	153,6	243,6	1650,5	1929,8
ТМ	40	10,00	0,88	4,5	$Y/Y_0$	88,00	157,0	952,2	1269,6
ТМ	63	10,00	1,28	4,5	$Y/Y_0$	51,60	101,9	503,8	872,6
ТМ	100	10,00	1,97	4,5	$Y/Y_0$	31,52	64,73	253,9	518,8
ТМ	160	10,00	2,65	4,5	$Y/Y_0$	16,56	41,84	150,8	367,0
ТМ	250	10,00	3,70	4,5	$Y/Y_0$	9,47	27,20	96,50	234,9
ТМ	400	10,00	5,50	4,5	$Y/Y_0$	5,50	17,14	55,60	148,7
ТМ	630	10,00	7,60	5,5	$Y/Y_0$	3,06	13,63	30,30	96,2
ТМ	1000	10,00	12,20	5,5	$Y/Y_0$	1,95	8,58	19,10	60,6
ТМ	1600	10,00	18,00	5,5	$Y/Y_0$	1,12	5,38	11,90	37,8
ТМ	100	35,00	1,97	6,5	$Y/Y_0$	31,52	99,11	194,5	520,4
ТМ	160	35,00	2,65	6,5	$Y/Y_0$	16,56	62,86	121,6	326,3
ТМ	250	35,00	3,70	6,5	$Y/Y_0$	9,47	40,51	77,80	208,1
ТМ	400	35,00	5,50	6,5	$Y/Y_0$	5,50	25,41	48,70	130,2
ТМ	630	35,00	7,60	6,5	$Y/Y_0$	3,06	16,22	26,50	84,2
ТМ	1000	35,00	12,20	6,5	$Y/Y_0$	1,95	10,22	16,70	53,1
ТМ	1600	35,00	18,00	6,5	$Y/Y_0$	1,12	6,40	10,50	36,6

Таблица П3.3

## Сопротивления кабелей напряжением 1 кВ с медными жилами

Материал оболочки	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>		Сопротивление, мОм				
	фазной	нулевой	$R_{\text{фог}}$	$X_{\text{фог}}$	$R_{\text{0ог}}$	$X_{\text{0ог}}$	$R_{\text{ког}}$
Пластмасса	1,5	1,5	11,867	0,116	47,467	0,463	0,0850
Пластмасса	2,5	1,5	7,120	0,107	42,720	0,464	0,0850
Пластмасса	2,5	2,5	7,120	0,107	28,480	0,427	0,0850
Пластмасса	4,0	2,5	4,450	0,099	25,810	0,430	0,0850
Пластмасса	4,0	4,0	4,450	0,099	17,800	0,396	0,0850
Алюминий	6,0	0,0	2,967	0,088	4,191	0,833	0,0850
Пластмасса	6,0	4,0	2,967	0,093	16,317	0,401	0,0850
Пластмасса	6,0	6,0	2,967	0,093	11,867	0,373	0,0850
Алюминий	10,0	0,0	1,780	0,087	2,911	0,759	0,0850

Материал оболочки	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>		Сопротивление, мОм				
	фазной	нулевой	$R_{\text{фаз}}$	$X_{\text{фаз}}$	$R_{\text{ног}}$	$X_{\text{ног}}$	$R_{\text{конт}}$
Пластмасса	10,0	6,0	1,780	0,092	10,680	0,402	0,0850
Пластмасса	10,0	10,0	1,780	0,092	7,120	0,367	0,0850
Алюминий	16,0	0,0	1,113	0,082	2,061	0,702	0,0850
Пластмасса	16,0	10,0	1,113	0,086	6,453	0,375	0,0850
Пластмасса	16,0	16,0	1,113	0,086	4,450	0,344	0,0850
Алюминий	25,0	0,0	0,712	0,082	1,492	0,676	0,0640
Пластмасса	25,0	16,0	0,712	0,085	4,050	0,368	0,0640
Пластмасса	25,0	25,0	0,712	0,085	2,848	0,339	0,0640
Алюминий	35,0	0,0	0,509	0,079	1,232	0,639	0,0560
Пластмасса	35,0	25,0	0,509	0,081	2,645	0,346	0,0560
Пластмасса	35,0	35,0	0,509	0,081	2,035	0,325	0,0560
Алюминий	50,0	0,0	0,356	0,078	0,953	0,615	0,0430
Пластмасса	50,0	25,0	0,356	0,080	2,492	0,366	0,0430
Пластмасса	50,0	35,0	0,356	0,080	1,882	0,344	0,0430
Пластмасса	50,0	50,0	0,356	0,080	1,424	0,321	0,0430
Алюминий	70,0	0,0	0,254	0,076	0,797	0,568	0,0290
Пластмасса	70,0	35,0	0,254	0,078	1,780	0,364	0,0290
Пластмасса	70,0	50,0	0,254	0,078	1,322	0,331	0,0290
Пластмасса	70,0	70,0	0,254	0,078	1,017	0,311	0,0290
Алюминий	95,0	0,0	0,187	0,075	0,667	0,544	0,0270
Пластмасса	95,0	50,0	0,187	0,077	1,255	0,348	0,0270
Пластмасса	95,0	70,0	0,187	0,077	0,950	0,327	0,0270
Пластмасса	95,0	95,0	0,187	0,077	0,749	0,308	0,0270
Алюминий	120,0	0,0	0,148	0,074	0,559	0,533	0,0240
Пластмасса	95,0	95,0	0,187	0,077	0,749	0,308	0,0270
Алюминий	120,0	0,0	0,148	0,074	0,559	0,533	0,0240
Пластмасса	120,0	70,0	0,148	0,075	0,911	0,334	0,0240
Пластмасса	120,0	95,0	0,148	0,075	0,710	0,315	0,0240
Пластмасса	120,0	120,0	0,148	0,075	0,593	0,301	0,0240
Алюминий	150,0	0,0	0,119	0,074	0,464	0,521	0,0210
Пластмасса	150,0	95,0	0,119	0,075	0,681	0,328	0,0210
Пластмасса	150,0	120,0	0,119	0,075	0,564	0,314	0,0210
Пластмасса	150,0	150,0	0,119	0,075	0,475	0,301	0,0210
Алюминий	185,0	0,0	0,096	0,074	0,408	0,509	0,0210
Пластмасса	185,0	95,0	0,096	0,075	0,658	0,341	0,0210
Пластмасса	185,0	120,0	0,096	0,075	0,541	0,326	0,0210
Пластмасса	185,0	150,0	0,096	0,075	0,452	0,313	0,0210
Пластмасса	185,0	185,0	0,096	0,075	0,385	0,300	0,0210
Алюминий	240,0	0,0	0,074	0,073	0,329	0,506	0,0210
Пластмасса	240,0	120,0	0,074	0,075	0,519	0,341	0,0210
Пластмасса	240,0	150,0	0,074	0,075	0,430	0,327	0,0210
Пластмасса	240,0	185,0	0,074	0,075	0,363	0,314	0,0210
Пластмасса	240,0	240,0	0,074	0,075	0,297	0,299	0,0210

## Сопротивления кабелей напряжением 1 кВ с алюминиевыми жилами

Материал оболочки	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>		Сопротивление, мОм				
	фазной	нулевой	$R_{\text{фог}}$	$X_{\text{фог}}$	$R_{\text{ног}}$	$X_{\text{ног}}$	$R_{\text{квит}}$
Пластмасса	2,5	2,5	11,760	0,107	47,040	0,427	0,0850
Пластмасса	4,0	2,5	7,350	0,099	42,630	0,430	0,0850
Пластмасса	4,0	4,0	7,350	0,099	29,400	0,396	0,0850
Алюминий	6,0	0,0	4,900	0,088	6,124	0,833	0,0850
Пластмасса	6,0	4,0	4,900	0,093	26,950	0,401	0,0850
Пластмасса	6,0	6,0	4,900	0,093	19,600	0,373	0,0850
Алюминий	10,0	0,0	2,940	0,087	4,071	0,759	0,0850
Пластмасса	10,0	6,0	2,940	0,092	17,640	0,402	0,0850
Пластмасса	10,0	10,0	2,940	0,092	11,760	0,367	0,0850
Алюминий	16,0	0,0	1,837	0,082	2,785	0,702	0,0850
Пластмасса	16,0	10,0	1,837	0,086	10,657	0,375	0,0850
Пластмасса	16,0	16,0	1,837	0,086	7,349	0,344	0,0850
Алюминий	25,0	0,0	1,176	0,082	1,956	0,676	0,0640
Пластмасса	25,0	10,0	1,176	0,085	9,996	0,400	0,0640
Пластмасса	25,0	16,0	1,176	0,085	6,688	0,368	0,0640
Пластмасса	25,0	25,0	1,176	0,085	4,704	0,339	0,0640
Алюминий	35,0	0,0	0,840	0,079	1,563	0,639	0,0560
Пластмасса	35,0	10,0	0,840	0,081	9,660	0,409	0,0560
Пластмасса	35,0	16,0	0,840	0,081	6,352	0,376	0,0560
Пластмасса	35,0	25,0	0,840	0,081	4,368	0,346	0,0560
Пластмасса	35,0	35,0	0,840	0,081	3,360	0,325	0,0560
Алюминий	50,0	0,0	0,588	0,078	1,185	0,615	0,0430
Пластмасса	50,0	16,0	0,588	0,080	6,100	0,397	0,0430
Пластмасса	50,0	25,0	0,588	0,080	4,116	0,366	0,0430
Пластмасса	50,0	35,0	0,588	0,080	3,108	0,344	0,0430
Пластмасса	50,0	50,0	0,588	0,080	2,352	0,321	0,0430
Алюминий	70,0	0,0	0,420	0,076	0,963	0,568	0,0290
Пластмасса	70,0	25,0	0,420	0,078	3,948	0,377	0,0290
Пластмасса	70,0	35,0	0,420	0,078	2,940	0,354	0,0290
Пластмасса	70,0	50,0	0,420	0,078	2,184	0,331	0,0290
Пластмасса	70,0	70,0	0,420	0,078	1,680	0,311	0,0290
Алюминий	95,0	0,0	0,309	0,075	0,789	0,544	0,0270
Пластмасса	95,0	35,0	0,309	0,077	2,829	0,372	0,0270
Пластмасса	95,0	50,0	0,309	0,077	2,073	0,348	0,0270
Пластмасса	95,0	70,0	0,309	0,077	1,569	0,327	0,0270
Пластмасса	95,0	95,0	0,309	0,077	1,237	0,308	0,0270
Алюминий	120,0	0,0	0,245	0,074	0,656	0,533	0,0240
Пластмасса	120,0	35,0	0,245	0,075	2,765	0,380	0,0240
Пластмасса	120,0	50,0	0,245	0,075	2,009	0,356	0,0240
Пластмасса	120,0	70,0	0,245	0,075	1,505	0,334	0,0240
Пластмасса	120,0	95,0	0,245	0,075	1,173	0,315	0,0240
Пластмасса	120,0	120,0	0,245	0,075	0,980	0,301	0,0240
Алюминий	150,0	0,0	0,196	0,074	0,541	0,521	0,0210
Пластмасса	150,0	50,0	0,196	0,075	1,960	0,371	0,0210
Пластмасса	150,0	70,0	0,196	0,075	1,456	0,348	0,0210

Материал оболочки	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>		Сопротивление, мОм				
	фазной	нулевой	$R_{\text{лиог}}$	$X_{\text{лиог}}$	$R_{\text{лиог}}$	$X_{\text{лиог}}$	$R_{\text{конт}}$
Пластмасса	150,0	95,0	0,196	0,075	1,124	0,328	0,0210
Пластмасса	150,0	120,0	0,196	0,075	0,931	0,314	0,0210
Пластмасса	150,0	150,0	0,196	0,075	0,784	0,301	0,0210
Алюминий	185,0	0,0	0,159	0,074	0,471	0,509	0,0210
Пластмасса	185,0	50,0	0,159	0,075	1,923	0,385	0,0210
Пластмасса	185,0	70,0	0,159	0,075	1,419	0,361	0,0210
Пластмасса	185,0	95,0	0,159	0,075	1,087	0,341	0,0210
Пластмасса	185,0	120,0	0,159	0,075	0,894	0,326	0,0210
Пластмасса	185,0	150,0	0,159	0,075	0,747	0,313	0,0210
Пластмасса	185,0	185,0	0,159	0,075	0,636	0,300	0,0210
Алюминий	240,0	0,0	0,122	0,073	0,377	0,506	0,0210
Пластмасса	240,0	95,0	0,122	0,075	1,050	0,356	0,0210
Пластмасса	240,0	120,0	0,122	0,075	0,857	0,341	0,0210
Пластмасса	240,0	150,0	0,122	0,075	0,710	0,327	0,0210
Пластмасса	240,0	185,0	0,122	0,075	0,599	0,314	0,0210
Пластмасса	240,0	240,0	0,122	0,075	0,489	0,299	0,0210

Таблица П3.5

### Параметры распределительных и магистральных шинпроводов

Тип	$I_{\text{ном}}$ А	$R_l$ , мОм/м	$X_l$ , мОм/м	$R_0$ , мОм/м	$X_0$ , мОм/м	$R_{\text{конт}}$ мОм/контакт
ШРА-73	250	0,21	0,21	0,570	0,84	0,009
ШРА-73	400	0,15	0,17	0,636	0,662	0,006
ШРА-73	630	0,10	0,13	0,586	0,622	0,004
КЗШ-0,4	1000	0,0243	0,117	0,2014	0,5220	0,004
ШМА-4	1250	0,0332	0,0176	0,0882	0,0689	0,003
ШМА-4	1600	0,0304	0,0161	0,0744	0,0590	0,003
ШМА-4	2500	0,0166	0,0088	0,0530	0,0413	0,003
ШМА-4	3200	0,0152	0,008	0,0447	0,0354	0,002
ШМА-68Н	2500	0,02	0,02	0,230	0,158	0,002
ШМА-68Н	4000	0,013	0,015	0,223	0,15	0,001

Таблица П3.6

### Сопротивления расцепителей и контактов автоматических выключателей

$I_{\text{ном}}$ А	$R_{\text{расц}}$ мОм	$X_{\text{расц}}$ мОм	$R_{\text{конт}}$ мОм
0,8	2340	9490	5
1,0	1710	3550	5
1,2	942	2120	5
1,6	730	1330	5
2,0	411	940	5
2,5	305	530	5
3,2	173	330	5
4,0	121	230	5
5,0	65	140	5

$I_{\text{ном}}$ А	$R_{\text{расц}}$ мОм	$X_{\text{расц}}$ мОм	$R_{\text{конт}}$ мОм
20,0	7	17	5
25,0	5	10	5
50,0	5,5	2,7	1,3
70,0	2,35	1,3	1,0
100,0	1,3	0,85	0,75
140,0	0,74	0,55	0,65
200,0	0,36	0,28	0,6
400,0	0,15	0,1	0,4
600,0	0,12	0,084	0,25

Окончание табл. 113.6

Ином, А	Ррасц, мОм	Храсц, мОм	Рконт, мОм
6,0	51	80	5
8,0	36	60	5
10,0	24	40	5
12,5	14	20	5
16,0	8	18	5

Ином, А	Ррасц, мОм	Храсц, мОм	Рконт, мОм
1000,0	0,1	0,08	0,1
1600,0	0,06	0,05	0,05
2500,0	0,06	0,05	0,05
4000,0	0,06	0,05	0,05

Таблица 113.7

**Сопротивления контактов рубильников, магнитных пускателей и контакторов**

$I_{ном}$ , А	$R_{конт}$ , мОм
100,0	0,5
200,0	0,4
400,0	0,2
600,0	0,15

$I_{ном}$ , А	$R_{конт}$ , мОм
1000,0	0,08
1600,0	0,04
2500,0	0,04

Таблица 113.8

**Сопротивления плавких предохранителей**

$I_{ном}$ , А	$R_{вст}$ , мОм	$R_{конт}$ , мОм
2,0	200,0	0,186
4,0	70,0	0,186
6,0	33,3	0,186
10,0	16,0	0,186
16,0	10,6	0,186
20,0	7,5	0,186
25,0	5,76	0,186
35,0	3,59	0,186
50,0	2,28	0,186
63,0	1,56	0,186
80,0	1,22	0,186
100,0	0,85	0,186
120,0	0,63	0,132

$I_{ном}$ , А	$R_{вст}$ , мОм	$R_{конт}$ , мОм
150,0	0,50	0,132
200,0	0,41	0,132
200,0	0,39	0,132
250,0	0,29	0,132
250,0	0,29	0,132
300,0	0,24	0,037
300,0	0,23	0,037
350,0	0,21	0,037
400,0	0,16	0,037
400,0	0,15	0,037
500,0	0,13	0,027
600,0	0,10	0,027

Таблица 113.9

**Сопротивления трансформаторов тока**

$I_{ном}$ , А	Сопротивления $R_1$ и $X_1$ , мОм, при классе точности			
	1,0		3,0	
	$R_1$	$X_1$	$R_1$	$X_1$
20	42	67	19	17
30	20	30	8,2	8
40	11	17	4,8	4,2
50	7	11	3	2,8
75	3	4,8	1,3	1,2
100	1,7	2,7	0,75	0,7
150	0,75	1,2	0,33	0,3
200	0,42	0,67	0,19	0,17
300	0,2	0,3	0,088	0,08
400	0,11	0,17	0,05	0,04
500	0,05	0,07	0,02	0,02

Параметры схемы замещения асинхронных двигателей

Параметр	Значения параметров электродвигателей типов							
	A-52-2	A-72-2	A-92-2	АО-62-4	АО-73-4	АО-94-4	A-101-6M	A-101-6M
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	10	40	125	10	28	100	100	320
$s_{\text{ном}}, \%$	3,65	2,35	1,65	2,66	2,66	2	1,5	1,5
$\eta_{\text{ном}}, \%$	87,5	90	92	87,5	90	92	92,4	94,5
$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,89	0,91	0,92	0,88	0,88	0,9	0,89	0,9
$I_{* \text{ II}}$	6,5	5,5	5,5	6,5	7	6,5	5,75	5,7
$M_{* \text{ II}}$	1,6	1,1	1	1,3	1,4	1,2	1,4	1,4
$b_{\text{ном}}^{\text{отп.ед.}}$	2,4	2,4	2,2	2,3	2,3	2,3	2,1	2,4

Таблица ПЗ.11

ЭДС и удельные сопротивления новых полностью заряженных аккумуляторов, при температуре электролита 25 °С

Тип аккумулятора	$C_{10}, \text{А}\cdot\text{ч}$	$E_{\text{акс}}, \text{В}$	$R_{\text{уд}}, \text{мОм}\cdot\text{А}\cdot\text{ч}$
3GroE75 – 18GroE450	75 – 450	2,0	93
5GroE500 26GroE2600	500 2600	2,0	150
xOpzS300L.A – xOpzS420L.A	300 – 420	2,05	210
xOpzS600L.A xxOpzS1200L.A	600 - 1200	2,05	257
Vb2305 – Vb2312	250 – 600	2,0	130
Vb2407 Vb2420	700 2000	2,0	172
Vb6114 – Vb6116, Vb4117, Vb4118	128 – 224	2,0	115
СК	36 – 5328	2,0	180

Таблица ПЗ.12

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
$E_{\text{акс}}, \text{В}$	2,0	2,0	2,0	1,93	1,93	1,93
$R_{\text{акс}}, \text{мОм}$	5,0	6,25	7,25	7,05	8,75	10,5

*Учебное издание*

**Крючков Иван Петрович  
Старшинов Владимир Алексеевич  
Гусев Юрий Павлович  
Пираторов Михаил Васильевич**

# **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Учебник**

**Редактор О.А. Панова  
Компьютерная верстка Л.А. Маматовой  
Дизайн обложки Д.А. Николасвой**

---

Подписано в печать 12.04.2018    Формат 60×90/16  
Бумага мелованная                      Печать офсетная                      Гарнитура Таймс  
Усл.печ. л. 24,75                              Тираж 350 экз.                              Заказ № 893

---

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.