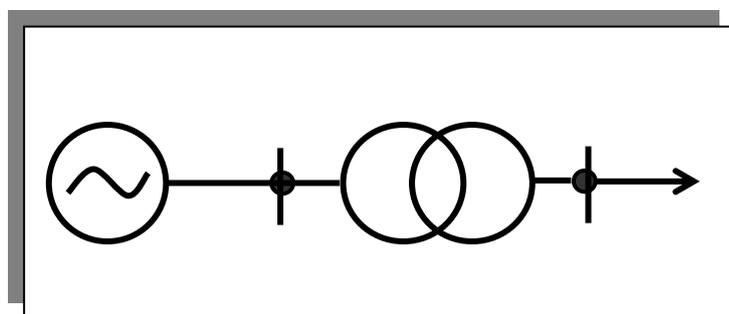


Т.Я. Окуловская, Т.Ю. Паниковская, В.А. Смирнов

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ



Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет–УПИ»

**Т.Я. Окуловская  
Т.Ю. Паниковская  
В.А. Смирнов**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Учебное пособие**

Научный редактор канд. техн. наук, доц. В.А.Шемпелев

Четвертое издание,  
переработанное и дополненное

Екатеринбург  
2006

УДК 621.311

ББК 31.27

Э 40

Рецензенты: главный специалист по информационным технологиям в энергетике технического отдела института «Уралэнергосетьпроект» ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» доц., канд. техн. наук. В.А. Липаткин, кафедра автоматизированных систем электроснабжения Российского государственного профессионально-педагогического университета (зав. кафедрой доц., канд. техн. наук С.В. Федорова).

**Окуловская Т.Я.**

**Э 40 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ:** учебное пособие / Т.Я. Окуловская, Т.Ю. Паниковская, В.А. Смирнов. 4-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. 85 с.

ISBN 5-321-00922-8

Предназначено для студентов всех форм обучения специальностей: 140204 – Электрические станции, 140205 – Электроэнергетические системы и сети, 140203 – Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, 140211 – Электроснабжение, изучающих дисциплины «Электромагнитные переходные процессы в электрических системах», «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

Приведены основные практические методы расчета токов коротких замыканий в сложных электрических системах. Рассмотрены примеры расчета для систем ограниченной сложности.

В приложениях к пособию изложены теоретические и физические аспекты анализа электромагнитных переходных процессов в электрических системах, который положен в основу рассмотренных практических методов. Даны наиболее сложные схемы замещения элементов электрических систем.

Подготовлено кафедрой «Автоматизированные электрические системы» и Учебно-научно-производственным предприятием «УПИ-Энерго».

Библиогр.: 7 назв. Табл. 6. Рис. 55. Прил. 4.

УДК 621.311

ББК 31.27

ISBN 5-321-00922-8

© Уральский государственный  
технический университет – УПИ, 1998  
© ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет – УПИ,  
переработка и дополнение, 2006

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение.....	3
1. Математические модели электрической системы и ее элементов, используемые в практических расчетах электромагнитных переходных процессов.....	7
1.1. Схема замещения ЭС.....	7
1.2. Приближенный учет нагрузки.....	11
1.3. Преобразование схемы замещения ЭС к простейшему виду.....	12
2. Симметричные короткие замыкания в электрических системах, питаемых от мощных источников.....	16
2.1. Трехфазное к.з. в разветвленных цепях.....	17
2.2. Порядок расчета тока к.з. в аварийной ветви.....	19
2.3. Определение периодической составляющей и ударного тока к.з.....	19
3. Практические расчеты трехфазного к.з. в сложных электрических системах с источниками конечной мощности.....	22
3.1. Допущения, применяемые при расчете токов к.з. в сложных ЭС.....	22
3.2. Расчет начального значения периодической составляющей (сверхпереходного тока) и ударного тока к.з.....	22
3.3. Определение изменения во времени периодической составляющей тока к.з. ....	27
3.4. Замыкание в распределительных сетях и системах электроснабжения.....	30
3.5. Учет изменения параметров проводников в сети.....	31
3.6. Тепловой спад тока к.з.....	31
3.7. Учет местных источников и нагрузок.....	32
4. Принципы исследования электромагнитных переходных процессов при однократном нарушении симметрии.....	35
4.1. Применение метода симметричных составляющих при анализе режимов с однократной несимметрией.....	35
4.2. Анализ однофазного короткого замыкания с использованием граничных условий в месте несимметрии $K^{(1)}$ , правило эквивалентности тока прямой последовательности.....	37
4.3. Параметры и схемы замещения элементов электрических систем для обратной и нулевой последовательностей.....	39
4.3.1. Синхронные машины.....	39
4.3.2. Асинхронные машины.....	41
4.3.3. Обобщенная нагрузка.....	41
4.3.4. Трансформаторы и автотрансформаторы.....	42
4.3.5. Воздушные линии электропередачи.....	44
4.3.6. Кабельные линии.....	47
4.4. Схемы замещения различных последовательностей.....	48
4.4.1. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей.....	48
4.4.2. Схема замещения нулевой последовательности.....	48
5. Практические методы расчета режимов электрических систем с однократной несимметрией.....	52
5.1. Учет изменения во времени тока несимметричного к.з.....	52
5.2. Распределение токов и напряжений по элементам ЭС.....	52
5.3. Сравнение различных видов к.з.....	53
6. Простое замыкание на землю.....	63
Библиографический список.....	65
Приложение 1.....	66
Приложение 2.....	69
Приложение 3.....	73
Приложение 4.....	79

## ВВЕДЕНИЕ

Основным объектом, изучаемым в дисциплине «Переходные процессы в электрических системах», является электрическая система.

Под электрической системой (ЭС) понимается совокупность электрических станций, электрических сетей и узлов потребления, объединенных единым процессом производства, передачи и распределения электрической энергии.

В любой ЭС могут быть выделены:

- силовые элементы (синхронные генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, выпрямители и инверторы, электрические двигатели и т.д.);
- элементы управления (коммутирующая аппаратура, силовые выключатели, устройства автоматики: автоматические регуляторы возбуждения, автоматические регуляторы скорости и т.п.);
- элементы защиты: разрядники, реакторы, предохранители.

Поведение электрической системы определяется ее **режимом** – состоянием, характеризуемым значениями мощностей, напряжений, частоты и других физических величин – **параметров режима**.

Режимы ЭС можно разделить на **установившиеся**, имеющие практически неизменные параметры, и **переходные** – с быстрыми изменениями параметров режима.

Переходные режимы связаны с **возникновением переходных процессов**, при которых происходит изменение электрического состояния элементов системы, обусловленное как естественными причинами, так и работой устройств автоматики.

В переходных процессах происходит закономерное изменение во времени одного или нескольких параметров режима в результате действия определенных причин, называемых **возмущающими воздействиями**.

Переходные процессы делятся на волновые, электромагнитные и электромеханические.

**В волновых переходных процессах** происходит локальное изменение электрического состояния системы, сопровождаемое резким увеличением электрического разряда в линиях электропередачи с повышением напряжения, связанного с атмосферными воздействиями. Они являются быстродействующими процессами: скорость изменения параметров  $10^3 - 10^8$  Гц. Опасность волновых переходных процессов заключается в появлении перенапряжений, приводящих к повреждению изоляции элементов ЭС и т.д.

Следует отметить, что при волновых переходных процессах не происходит изменения относительного положения роторов электрических машин и скорости их вращения.

**Электромеханические переходные процессы** являются низкочастотными. Скорость их протекания изменяется от  $10^{-1}$  до 50 Гц. Происходит изменение как электрических, так и механических параметров режима.

**Электромагнитные переходные процессы** возникают:

- при включении и отключении двигательных и других агрегатов;
- в результате коротких замыканий (к.з.) и простых замыканий;

- при местной несимметрии;
- при работе форсировки возбуждения, регуляторов возбуждения, автоматов гашения поля и т.п.;
- несинхронного включения синхронных машин (СМ).

Электромагнитные переходные процессы сопровождаются изменением электромагнитного состояния элементов ЭС. Механические параметры режима остаются неизменными. Скорость протекания от 50 до 150 Гц.

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов наиболее распространенными являются процессы, вызванные к.з.

Большая часть к.з. – дуговые, как правило, самоликвидирующиеся; реже – металлические, при которых фазы электроустановки соединяются между собой или с землей.

Последствия к.з. проявляются:

- в резком увеличении токов в ветвях системы, особенно в месте к.з.; в некоторых ветвях увеличение тока может быть небольшим;

- в значительном снижении напряжения в узлах ЭС; при трехфазном к.з. ( $K^{(3)}$ ) напряжение в точке к.з. снижается до нуля; при несимметричных к.з.

(двухфазное –  $K^{(2)}$ , однофазное –  $K^{(1)}$ , двухфазное на землю –  $K^{(1.1)}$ ) напряжение в точке к.з. частично сохраняется;

- в искажении симметрии напряжений и токов при несимметричных к.з., в результате которого увеличивается электромагнитное и электростатическое влияние линий электропередачи (ЛЭП) на линии связи и другие объекты;

- в тепловом действии токов к.з., приводящем к повреждению изоляции, спеканию контактов электроаппаратуры и т.д.;

- в динамическом действии токов к.з., в появлении механических усилий, повреждающих конструкции машин и аппаратов.

Необходимо отметить, что потребители (нагрузка) в ЭС очень чувствительны к снижению напряжения. Так, например, асинхронные двигатели (АД), составляющие до 50 % нагрузки, при снижении напряжения затормаживаются, что приводит к увеличению тока нагрузки и дальнейшему снижению напряжения на ее зажимах. Появляется опасность нарушения устойчивости параллельной работы электрических машин (ЭМ) в системе, которая в этом случае распадается на части, работающие несинхронно. В результате происходит длительное нарушение электроснабжения потребителей, приводящее к огромному материальному ущербу.

Подавляющее число к.з. (85 %), происходящих в ЭС, связано с замыканием на землю. Трехфазное к.з. является очень редким (5 %), но изучение процессов, происходящих при этом виде к.з., имеет первостепенное значение, поскольку последствия трехфазных к.з. являются самыми тяжелыми для ЭС.

Кроме того, применение метода симметричных составляющих позволяет определить величины токов и напряжений прямой последовательности любого

несимметричного к.з.  $(K^{(1)}, K^{(2)}, K^{(1.1)})$  как соответствующие величины при некоторых условных трехфазных замыканиях.

Существующие методы расчета и анализа электромагнитных переходных процессов при трехфазных к.з. можно разбить на две группы: аналитические и практические.

В основу аналитического метода расчета положен анализ электромагнитных процессов по уравнениям Парка–Горева. Он позволяет с высокой точностью определить величину тока при внезапном к.з. в начальный момент времени для простейшей системы, состоящей из одного синхронного генератора (СГ).

При переходе к схемам с несколькими генераторами задача точного расчета переходного процесса усложняется. Появляется необходимость учета возникающих качаний генераторов и поведения присоединенных нагрузок; изменения свободных токов в каждом из генераторов, связанных между собой. При наличии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) аналогичная связь имеется между приращениями вынужденных токов. Поэтому практическое применение аналитического метода весьма ограничено. Его можно рассматривать лишь как эталон для оценки других приближенных методов расчета.

При решении многих практических задач не требуется знания точных результатов, поэтому возможно использование приближенных инженерных методов, которые рассматриваются ниже.

Все расчеты переходных процессов при к.з. базируются на решении дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы при временных изменениях параметров режима.

Практический подход, применяемый для решения всех инженерных задач и использующий мгновенные значения параметров режима, позволяет перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим и тригонометрическим.

При нахождении значений токов к.з. в электрических системах необходимо выделять две различные ситуации:

– к.з. происходит в ЭС, имеющей мощные источники с режимом работы, не зависящим от режима работы электрической системы (исключение составляет режим к.з. вблизи источников);

– к.з. рассматривается в электрической системе, режим которой существенно влияет на режимы работы источников.

В первом случае источники имеют значительно большую мощность, нежели узлы потребления ими питаемые, или источники питания удалены от ЭС, в которой возникают различные виды к.з. (системы электроснабжения, распределительные сети и т.д.).

Во втором – источники и подключаемая к ним система имеют соизмеримые мощности или к.з. происходит в системообразующих сетях (вблизи шин электрических станций).

Несмотря на различие ситуаций, подходы к расчету токов к.з. в обоих случаях имеют много общего, основываются на одних и тех же понятиях и допущениях.

Гораздо более различны методы расчета симметричных  $(K^{(3)})$  и несимметричных  $(K^{(n)}, n = 1; 1, 1; 2)$  к.з. Последнее обстоятельство является определяющим при формировании структуры и методики изучения расчета и анализа электромагнитных переходных процессов в ЭС.

На первом этапе выделяются основные общие подходы, применяемые при расчетах всех видов к.з. На втором – детально рассматриваются практические методы расчета симметричных трехфазных к.з. И только затем – особенности расчета несимметричных к.з.

Учебное пособие написано при использовании действующих Государственных стандартов, а также Правил устройств электроустановок:

- ГОСТ 27514–87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ;
- ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Виды переходных процессов, происходящих в электрических системах. Их основные отличительные признаки.
2. Принцип возникновения электромагнитных переходных процессов.
3. Классификация видов коротких замыканий.
4. В чем проявляются основные последствия к.з.?
5. Обозначения к.з.
6. Основные методы расчета и анализа коротких замыканий.
7. Причины, заставляющие выделять при расчетах к.з. электрические системы, имеющие источники различной мощности.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ, Используемые В ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Рассматривается сложная электрическая система, содержащая генераторы, нагрузку, а также передающие и преобразующие элементы.

Предварительно необходимо сформулировать общие принципы, на основании которых решается задача расчета токов к.з. в ветвях ЭС и напряжений в ее узлах.

Математическая модель ЭС определяется по элементам, ее составляющим. По сравнению с расчетами установившихся режимов существенно меняются модели генераторных и нагрузочных узлов. Параметры остальных элементов остаются практически теми же.

#### **Схема замещения ЭС**

Составление схемы замещения электрической системы для расчета токов к.з. производится по общим принципам, сформулированным в расчетах нормальных установившихся режимов.

Дополнительно вводится ряд упрощений, которые составляют основные расчетные допущения.

#### Основные расчетные допущения

Под допущениями понимаются условия, предопределяющие учет или отказ от учета тех или иных характеристик элементов ЭС. Формулируются допущения исходя из поставленной задачи для конкретных условий.

К основным допущениям относятся следующие положения:

– рассматриваемая ЭС строго симметрична при  $K^{(3)}$ ;

– при расчетах токов короткого замыкания допускается:

1) не учитывать сдвиг по фазе ЭДС различных синхронных машин и изменение их частоты вращения, если продолжительность к.з. не превышает 0,5 с;

2) не учитывать межсистемные связи, выполненные с помощью электропередачи (вставки) постоянного тока;

3) 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;

4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

5) не учитывать ток намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов;

6) не учитывать влияние активных сопротивлений различных элементов исходной расчетной схемы на амплитуду периодической составляющей тока к.з., если активная составляющая результирующего эквивалентного сопротивления расчетной схемы относительно точки к.з. не превышает 30 % от индуктивной составляющей результирующего эквивалентного сопротивления;

7) приближенно учитывать затухание апериодической составляющей тока к.з., если исходная расчетная схема содержит несколько независимых контуров;

8) приближенно учитывать электроприемники, сосредоточенные в отдельных узлах исходной расчетной схемы;

9) принимать численно равными активное сопротивление и сопротивление постоянному току любого элемента исходной расчетной схемы.

Наиболее удаленную от расчетной точки к.з. часть электроэнергетической системы допускается представлять в виде одного источника энергии с неизменной по амплитуде ЭДС и результирующим эквивалентным индуктивным сопротивлением. ЭДС этого источника следует принимать равной среднему номинальному напряжению сети, связывающей удаленную и остальную части электроэнергетической системы, а его результирующее эквивалентное сопротивление  $X_c$  определять, исходя из известного тока  $I_c$  от эквивалентруемой части системы при к.з. в какой-нибудь узловой точке указанной сети:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}I_c};$$

– нагрузки в ЭС не учитываются или учитываются приближенно;

– как правило, не учитывается изменение во времени положений роторов СМ (не учитываются качания).

Приведенные выше допущения значительно облегчают выполнение оценочных (ручных) расчетов тока к.з. и составляют основу алгоритма программных средств.

#### Схемы замещения элементов электрической системы

**Источники питания** (синхронные генераторы и система) представляются как источники ЭДС за некоторыми сопротивлениями. Значения ЭДС и сопротивлений синхронных генераторов зависят от допущений, принятых при расчетах тока к.з.

Так, синхронный генератор, имеющий демпферные обмотки, представляется в схеме замещения, составленной для начального момента к.з. ( $t = 0$ ) сверхпереходной ЭДС  $E_0''$  за сверхпереходным сопротивлением  $x_d''$ . Если влияние демпферных обмоток не учитывается, то значение ЭДС и сопротивления принимается соответственно  $E'$  и  $x_d'$ .

**Параметры схемы замещения воздушных линий электропередачи** зависят от величины напряжения, при котором они работают в электрической системе. Как правило, не учитываются активные составляющие сопротивлений линий. Емкостные проводимости на землю учитываются для линий, работающих на напряжение 220 кВ и выше.

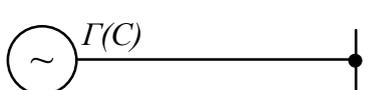
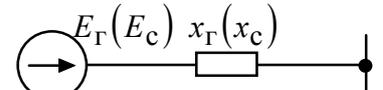
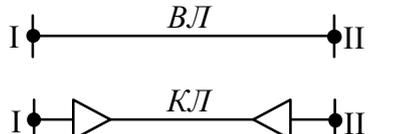
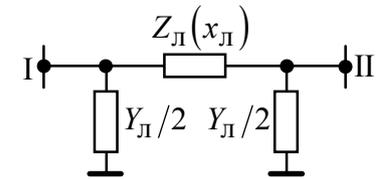
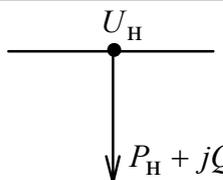
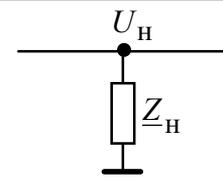
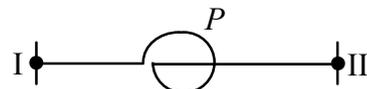
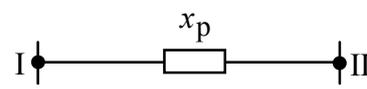
Для кабельных линий учет активного сопротивления обязателен.

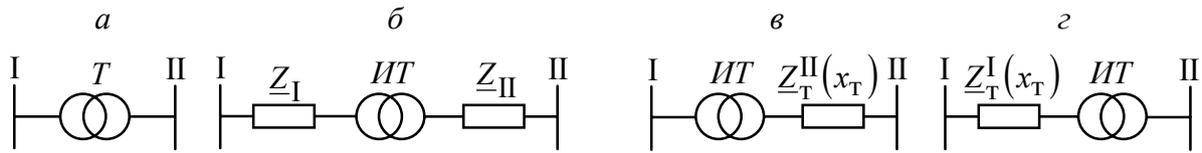
Схемы замещения источников питания линий электропередачи, нагрузки и реакторов обычного типа приведены в табл. 1.1.

В схеме замещения двухобмоточного трансформатора (рис. 1.1, б) имеется идеальный трансформатор (ИТ), отражающий наличие электромагнитной связи между двумя ступенями напряжения  $U_I$  и  $U_{II}$ .

Таблица 1.1

Схемы замещения элементов ЭС

Наименование элемента	Изображение на схеме	
	принципиальной	замещения
Источник питания - СГ, система бесконечной мощности		
Линии электропередачи: воздушные (ВЛ) кабельные (КЛ)		
Нагрузка		
Реакторы обычного типа		



**Рис. 1.1. Схемы двухобмоточного трансформатора:**  
 а - принципиальная; б - замещения; в-г - замещения с приведением параметров соответственно к ступени вторичного и первичного напряжения

Для исключения электромагнитной связи необходимо устранить идеальный трансформатор, т.е. привести элементы схемы к одной ступени напряжения. Последнее достигается пересчетом параметров вторичной ступени  $\underline{Z}_{II}$  к первичной  $\underline{Z}_{II}^I$  или пересчетом параметров первичной ступени  $\underline{Z}_I$  к вторичной  $\underline{Z}_I^{II}$ , осуществляемым через коэффициент трансформации, определяемый по формуле

$$k_T = \frac{U_{II}}{U_I} = \frac{I_I}{I_{II}}, \quad (1.1)$$

где  $U_I, I_I, U_{II}, I_{II}$  – действующие значения токов и напряжений первичной и вторичной ступеней (под напряжением вторичной ступени понимается низшее напряжение). После приведения параметров трансформатора к одной ступени напряжения:

$$\text{– к вторичной } \underline{Z}_I^{II} = \frac{U_I^{II}}{I_I^{II}} = \frac{U_I \cdot k_T}{I_I/k_T} = \frac{U_I}{I_I} \cdot k_T^2 = \underline{Z}_I \cdot k_T^2, \quad (1.2)$$

$$\text{– к первичной } \underline{Z}_{II}^I = \frac{U_{II}^I}{I_{II}^I} = \frac{U_{II}/k_T}{I_{II} \cdot k_T} = \frac{U_{II}}{I_{II}} \cdot \frac{1}{k_T^2} = \frac{\underline{Z}_{II}}{k_T^2}, \quad (1.3)$$

схемы замещения двухобмоточного трансформатора будут иметь вид, представленный на рис. 1.1, в, г.

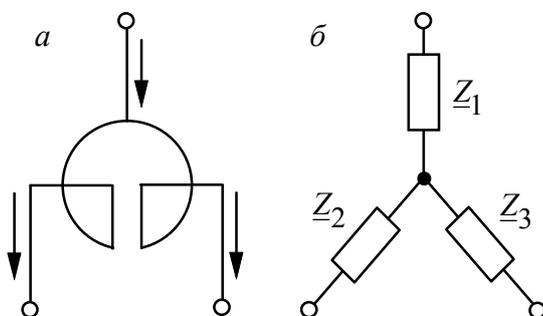
Сопrotивления трансформатора  $x_T^{I(II)}$  без учета намагничивающего тока в общем случае характеризуются сопротивлениями короткого замыкания  $u_k$

попарно взятых обмоток.

Схемы замещения многообмоточных трансформаторов приведены в прил. 1.

Сдвоенный реактор имеет (рис. 1.2) схему замещения в виде трехлучевой звезды, параметры которой выражаются через индуктивное сопротивление ветви  $X_L$ , замеряемое в отсутствие тока в другой ветви:

$$\underline{Z}_1 = -kX_L; \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = (1+k)X_L, \quad (1.4)$$



**Рис. 1.2. Принципиальная схема (а) и схема замещения (б) сдвоенного реактора**

где  $k$  – коэффициент, устанавливающий наличие электромагнитной связи между ветвями реактора. Значения величин  $X_L$  и  $k$  являются справочными данными [1, с. 501, табл. 17–5].

Приведение параметров схем замещения к одной ступени напряжения

Приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения, выбранной за основную, выполняется с целью облегчить расчеты за счет исключения трансформаторных связей. Существует два типа приведения: «точное» и по шкале средних напряжений [4]. В первом случае используются точные значения коэффициентов трансформации, имеющих в ЭС трансформаторов, во втором – значения средних коэффициентов трансформации, рассчитанные по средним напряжениям ступеней.

Рассмотрим на конкретном примере приведение параметров схемы замещения ЭС (рис. 1.3) к одной ступени напряжения, например, к ступени с напряжением  $U_{IV}$ .

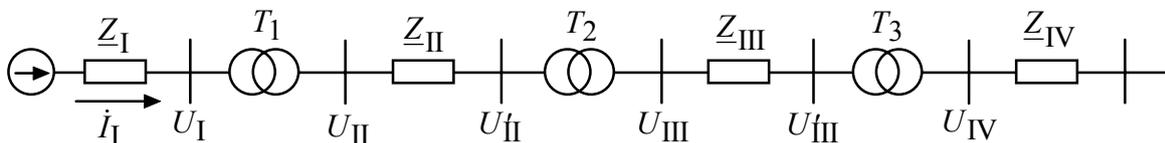


Рис. 1.3. Приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения по «точным» коэффициентам трансформации

Тогда при «точном» приведении «приведенное» значение величины ЭДС  $E_1^{IV}$  будет рассчитываться следующим образом:

$$E_1^{IV} = \overset{\circ}{E}_1 = E_1 \frac{U_{II}}{U_I} \frac{U_{III}}{U'_{II}} \frac{U_{IV}}{U'_{III}} = E_1 k_I k_{II} k_{III}, \quad (1.5)$$

где  $k_I = \frac{U_{II}}{U_I}$ ;  $k_{II} = \frac{U_{III}}{U'_{II}}$ ;  $k_{III} = \frac{U_{IV}}{U'_{III}}$  – точные значения коэффициентов трансформации.

При трансформации мощность на всех ступенях напряжения практически одинакова (потери мощности в трансформаторе малы, их можно не учитывать), поэтому при изменении напряжения в  $k$  раз ток изменяется в  $1/k$  раз.

Приведенное значение тока  $I_1^{IV}$  определяется по формуле

$$I_1^{IV} = \overset{\circ}{I}_1 = I_1 \cdot \frac{1}{k_I k_{II} k_{III}}. \quad (1.6)$$

Сопротивление первой ступени изменится в  $k^2$ :

$$\underline{Z}_I^{IV} = \overset{\circ}{Z}_I = \frac{\overset{\circ}{E}_1}{\overset{\circ}{I}_1} = \frac{E_1}{I_1} k_I^2 k_{II}^2 k_{III}^2 = \underline{Z}_I k_I^2 k_{II}^2 k_{III}^2.$$

Приближенное приведение по средним коэффициентам трансформации (рис. 1.4) значительно сокращает время расчетов. В последнем случае

«приведенные» значения ЭДС  $\overset{\circ}{E}_I$ , тока  $\overset{\circ}{I}_I$  и сопротивления  $\underline{\overset{\circ}{Z}}_I$  рассчитываются по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{\circ}{E}_I^{IV} = \overset{\circ}{E}_I = E_I \cdot \frac{U_{IIcp}}{U_{Icp}} \frac{U_{IIIcp}}{U_{IIcp}} \frac{U_{IVcp}}{U_{IIIcp}} = E_I \cdot \frac{U_{IVcp}}{U_{Icp}}, \\ \overset{\circ}{I}_I^{IV} = \overset{\circ}{I}_I = I_I \cdot \frac{U_{Icp}}{U_{IVcp}}, \\ \underline{\overset{\circ}{Z}}_I^{IV} = \underline{\overset{\circ}{Z}}_I = \underline{Z}_I \left( \frac{U_{IVcp}}{U_{Icp}} \right)^2. \end{array} \right. \quad (1.7)$$

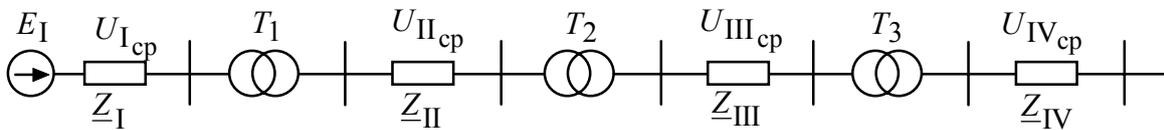


Рис. 1.4. Приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения по средним коэффициентам трансформации

#### Приближенный учет нагрузки

Если нагрузка ЭС состоит из постоянных сопротивлений, то ее учет не составляет трудностей. В схеме замещения она представлена постоянным полным сопротивлением  $\underline{Z}_H$ .

Однако большую часть нагрузки (до 50 %) составляют асинхронные двигатели, сопротивление которых зависит от величин напряжения  $U_H$  в узле. Эти зависимости нелинейны, и они затрудняют учет нагрузки.

Для упрощенных расчетов нагрузка может быть представлена постоянной реактивностью  $x_H = 1,2$ , которая отнесена к полной (в мегавольт-амперах, МВ·А) рабочей мощности нагрузки  $S_H$  и среднему номинальному напряжению ступени  $U_H$ , где присоединена данная нагрузка. Полезно определять величину сопротивления нагрузки в омах:

$$x_H = 1,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}. \quad (1.8)$$

При значительном количестве в составе нагрузки асинхронных двигателей, расположенных вблизи точки к.з., рекомендуется учитывать ее как некоторый источник с ЭДС  $E_H''$  и сопротивлением  $x_H''$ , рассчитываемым по формулам

$$E_H'' = 0,85 \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}}, \quad (1.9)$$

$$x_H'' = 0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}, \quad (1.10)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение в узле нагрузки;  $S_H$  – ее номинальная мощность; 0,85; 0,35 – относительные значения ЭДС и сопротивления типового узла нагрузки.

Преобразование схемы замещения ЭС к простейшему виду

Для приведения схемы замещения сложной ЭС, которая составляется на одну фазу, к простейшему виду (рис. 1.5) используется ряд дополнительных преобразований. К ним относятся:

- сложение последовательно соединенных сопротивлений;
- замена параллельно соединенных элементов одним эквивалентным;
- преобразование «треугольника» в «звезду» и «звезды» в «треугольник»;
- преобразование «звезды» с произвольным числом лучей в схему полного многоугольника.

Часто при выполнении расчетов приходится преобразовывать схему замещения ЭС, представленную на рис. 1.6.

В результате преобразования находится эквивалентная ЭДС  $\dot{E}_\Sigma$  и эквивалентное сопротивление  $\underline{Z}_\Sigma$ . Они рассчитываются по формулам вида

$$\dot{E}_\Sigma = \underline{Z}_\Sigma \cdot \sum_{k=1}^n \dot{E}_k \cdot \frac{1}{\underline{Z}_k}, \quad (1.11)$$

$$\underline{Z}_\Sigma = \left( \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)^{-1}, \quad (1.12)$$

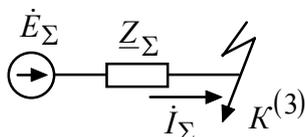


Рис. 1.5. Простейшая схема замещения сложной ЭС

где  $\dot{E}_k$ ,  $\underline{Z}_k$  – ЭДС и сопротивление  $k$ -й параллельной ветви;  $n$  – число параллельных ветвей.

Подобные преобразования в сложной схеме зачастую связаны с большими вычислительными трудностями, поэтому вводятся дополнительные упрощающие допущения:

- при выполнении расчетов не учитывается нагрузка, кроме двигательной, подключенной непосредственно к месту возникновения к.з.;
- синхронные генераторы, работающие на местную нагрузку, вводятся эквивалентной ЭДС  $\dot{E}_\Sigma = 1$ ; нагрузка не учитывается.

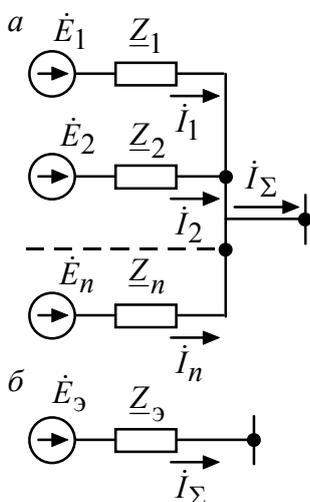


Рис. 1.6. Преобразование схемы замещения ЭС (а) к простейшему виду (б)

Для преобразованной схемы замещения (см. рис. 1.6) рассчитывается результирующая ЭДС системы  $\dot{E}_\Sigma$  и результирующее сопротивление  $\underline{Z}_\Sigma(x_\Sigma)$  относительно точки к.з.

Основной задачей расчета переходного процесса при к.з. является нахождение тока в аварийной ветви. Желательно, чтобы эта ветвь в преобразованиях не

участвовала, сохраняя свои параметры неизменными.

В заключение рассмотрим на примере электрической системы (рис. 1.7) основные принципы составления схемы замещения и определения ее параметров.

**Пример 1.1.** Для схемы электрической системы (рис. 1.7) составить схему замещения и рассчитать ее параметры с «точным» приведением их значений к одной ступени напряжения. При расчете учитывается наличие в нагрузочном узле асинхронной двигательной нагрузки.

*Исходные данные:*

- генератор ( $G$ ):  $S_H = 75 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_H = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $I_H = 4,125 \text{ кА}$ ;  $x_d'' = 0,215 \text{ Ом}$ ;  $\cos \varphi_H = 0,8$ ;
- система ( $C$ ):  $U_C = 230 \text{ кВ}$ ;
- трансформатор ( $T$ ):  $S_H = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $u_k = 10,5 \%$ ;  $U_{BH}/U_{HH} = 121/10,5 \text{ кВ}$ ;
- автотрансформатор ( $AT$ ):  $S_H = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $u_{KBH} = 34 \%$ ;  $u_{KBC} = 10 \%$ ;  $u_{KCH} = 22,5 \%$ ;  $U_{BH}/U_{CH}/U_{HH} = 230/121/11 \text{ кВ}$ ;
- линия электропередачи ( $L$ ):  $\ell = 120 \text{ км}$ ;  $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;
- нагрузка ( $H$ ):  $x_H'' = 0,35$ ;  $S_H = 60 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $E_H'' = 0,85$ ;  $U_H = 11 \text{ кВ}$ .

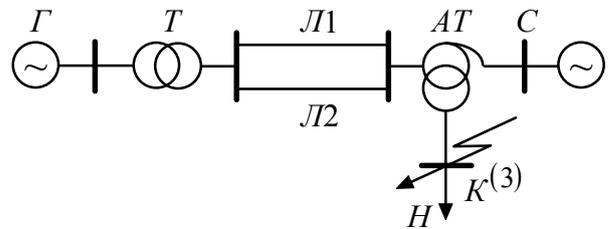


Рис. 1.7. Принципиальная схема ЭС

*Решение.* Схема замещения ЭС (рис. 1.8) составляется по схемам замещения отдельных ее элементов в порядке расположения их на принципиальной схеме для начального момента ( $t = 0$ ).

При составлении схемы замещения учитывались следующие допущения:

- синхронный генератор имеет демпферные обмотки и поэтому представлен сверхпереходными параметрами  $x_d''$  и  $E_0''$ ;

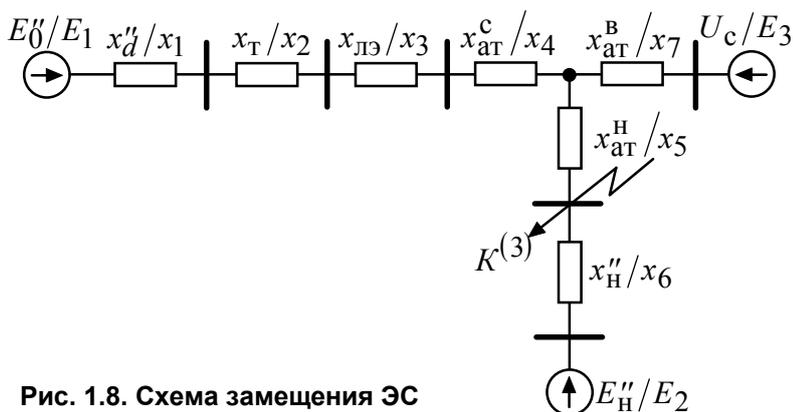


Рис. 1.8. Схема замещения ЭС

- у всех элементов не учитывались активные составляющие их сопротивлений;

- для линии электропередачи в виду отсутствия данных о ее конструктивном исполнении принято среднее значение удельного сопротивления

$x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;

- нагрузка ( $H$ ) представлена параметрами  $x_H''$  и  $E_H''$ ;
- сопротивление системы (источника бесконечной мощности) не учитывается;

– все параметры схемы замещения приводятся к одной ступени напряжения, на которой произошло к.з.  $K^{(3)}$ ,  $U = 11$  кВ.

На первом этапе рассчитываются значения коэффициентов трансформации трансформатора ( $T$ ):  $k_I = U_{\text{нн}}/U_{\text{вн}} = 10,5/121 = 0,087$  и автотрансформатора ( $AT$ ):  $k_{III} = 121/230 = 0,526$ ;  $k_{IV} = 11/230 = 0,048$ .

Для пересчета параметров генератора на напряжение ступени к.з. вводится дополнительный коэффициент трансформации  $k_{II} = 11/121 = 0,091$ .

Определяются параметры схемы замещения с одновременным их приведением к одной ступени напряжения  $U = 11$  кВ:

$$x_1 = x_d^{\circ} = x_d'' \cdot \frac{k_{II}^2}{k_I^2} = 0,215 \cdot \frac{0,091^2}{0,087^2} = 0,236 \text{ Ом};$$

$$x_2 = x_T^{\circ} = \frac{u_K}{100} \frac{U_H^2}{S_H} k_{II}^2 = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{80} \cdot 0,091^2 = 0,159 \text{ Ом};$$

$$x_3 = x_{лЭ}^{\circ} = \frac{x_0 \ell}{2} k_{II}^2 = \frac{0,4 \cdot 120}{2} \cdot 0,091^2 = 0,198 \text{ Ом};$$

$$x_4 = x_{ат}^c{}^{\circ} = \frac{u_{КВС} + u_{КСН} - u_{КВН}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_H} = \frac{10 + 22,5 - 34}{2 \cdot 100} \cdot \frac{11^2}{200} = -0,005 \text{ Ом};$$

$$x_5 = x_{ат}^H{}^{\circ} = \frac{u_{КСН} + u_{КВН} - u_{КВС}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_H} = \frac{22,5 + 34 - 10}{2 \cdot 100} \cdot \frac{11^2}{200} = 0,141 \text{ Ом};$$

$$x_7 = x_{ат}^B{}^{\circ} = \frac{u_{КВН} + u_{КВС} - u_{КСН}}{2 \cdot 100} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_H} = \frac{10 + 34 - 22,5}{2 \cdot 100} \cdot \frac{11^2}{200} = 0,065 \text{ Ом};$$

$$x_6 = x_H''{}^{\circ} = x_H''^{(*)} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_H} = 0,35 \cdot \frac{11^2}{60} = 0,706 \text{ Ом}.$$

Рассчитываются значения ЭДС источников и нагрузок:

$$E_1 = \overset{\circ}{E}''_0 = \sqrt{\left( U_H + I_H x_d'' \sin \varphi \right)^2 + \left( I_H x_d'' \cos \varphi \right)^2} \cdot \frac{k_{II}}{k_I} =$$

$$= \sqrt{\left( \frac{10,5}{\sqrt{3}} + 4,125 \cdot 0,215 \cdot 0,6 \right)^2 + \left( 4,125 \cdot 0,215 \cdot 0,8 \right)^2} \cdot \frac{0,091}{0,087} = 6,95 \text{ кВ};$$

$$E_2 = \overset{\circ}{E}''_H = 0,85 \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} = 0,85 \cdot \frac{11}{\sqrt{3}} = 5,39 \text{ кВ};$$

$$E_3 = \overset{\circ}{U}_c = \frac{U_c}{\sqrt{3}} \cdot k_{IV} = \frac{230}{\sqrt{3}} \cdot 0,048 = 6,35 \text{ кВ}.$$

Для дальнейшего использования удобно составить схему замещения ЭС с нанесенными значениями ее параметров (рис. 1.9).

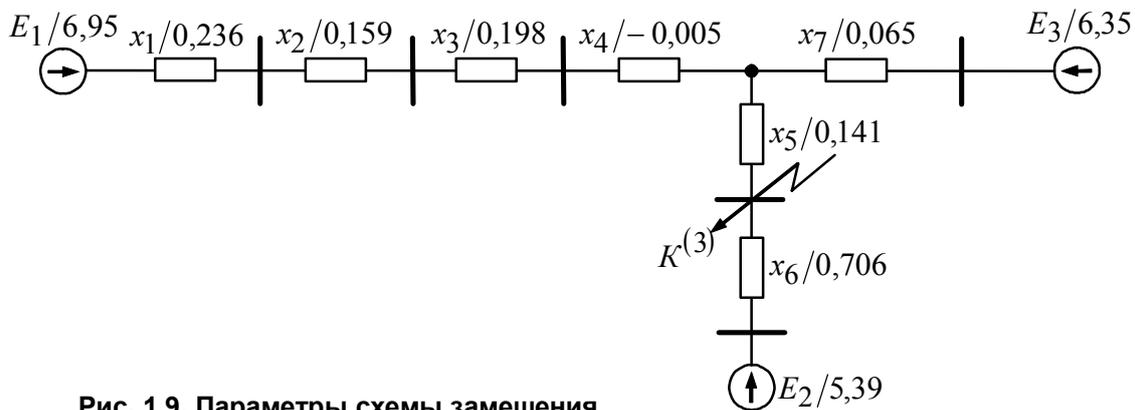


Рис. 1.9. Параметры схемы замещения

**Пример 1.2.** Преобразовать схему замещения (рис. 1.9) к простейшему виду относительно точки к.з. –  $K^{(3)}$ .

*Решение.* Последовательные этапы преобразования схемы замещения представлены на рис. 1.10. Сопротивления  $x_1, x_2, x_3, x_4$  соединены последовательно и заменяются одним:

$$x_8 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0,236 + 0,159 + 0,198 - 0,005 = 0,588 \text{ Ом.}$$

Ветви с источниками  $E_1$  и  $E_3$  заменяются одной эквивалентной с параметрами

$$x_9 = \frac{x_8 x_7}{x_8 + x_7} = 0,0585 \text{ Ом,}$$

$$E_9 = x_9 \left( \frac{E_1}{x_8} + \frac{E_3}{x_7} \right) = 0,0585 \cdot \left( \frac{6,95}{0,588} + \frac{6,35}{0,065} \right) = 6,41 \text{ кВ.}$$

Сопротивления  $x_9$  и  $x_5$  соединяются последовательно:

$$x_{10} = x_9 + x_5 = 0,0585 + 0,141 = 0,1995 \text{ Ом.}$$

По отношению к точке к.з. объединяются параллельно ветви с ЭДС  $E_9$  и  $E_2$ :

$$x_{\Sigma} = \frac{x_{10} x_6}{x_{10} + x_6} = \frac{0,1995 \cdot 0,706}{0,1995 + 0,706} = 0,156 \text{ Ом,}$$

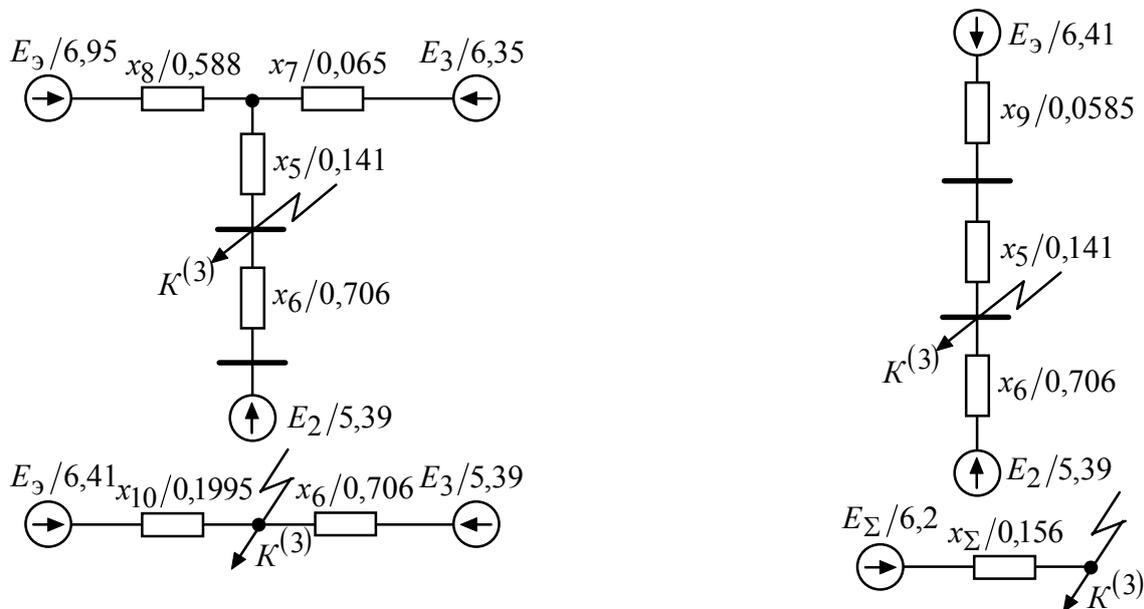


Рис. 1.10. Этапы преобразования схемы замещения ЭС

$$E_{\Sigma} = x_{\Sigma} \cdot \left( \frac{E_3}{x_{10}} + \frac{E_2}{x_6} \right) = 0,156 \cdot \left( \frac{6,41}{0,1995} + \frac{5,39}{0,706} \right) = 6,2 \text{ кВ.}$$

### Вопросы для самопроверки

1. Понятие «математической модели» электрической системы.
2. Схемы замещения основных элементов ЭС: генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т.д., используемые для расчетов к.з.
3. Основные расчетные допущения. Цель их применения.
4. Схема замещения двухобмоточного трансформатора.
5. Приведение параметров схем замещения к одной ступени напряжения: «точное» и «приближенное».
6. Схема замещения «сдвоенного» реактора.
7. Принципы объединения параллельно работающих источников в один эквивалентный.
8. Преобразование схемы замещения ЭС к простейшему виду.
9. Приближенный учет нагрузки.

### СИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ПИТАЕМЫХ ОТ МОЩНЫХ ИСТОЧНИКОВ

При возникновении симметричных трехфазных коротких замыканий  $K^{(3)}$  в ЭС происходит изменение (увеличение) токов во всех ее ветвях (наибольшее увеличение тока наблюдается в ветвях, расположенных вблизи точек к.з.). Напряжения в узлах ЭС снижаются (в точке к.з. напряжение равно нулю). Увеличение тока объясняется прежде всего изменением электрического состояния ЭС (уменьшением сопротивления). Кроме того, как показал аналитический анализ режимов к.з. в простейших цепях (прил. 2), в токе к.з. наряду с периодической (вынужденной) составляющей тока появляется аperiodическая (свободная) составляющая тока к.з., которая не только увеличивает мгновенное значение тока к.з., но и искажает его форму.

Таким образом, полный ток к.з. для простейшей системы (рис. 2.1), питаемой от мощного источника, определяется как

$$i_k(t) = i_{пк}(t) + i_{ак}(t), \quad (2.1)$$

где  $i_{пк}(t), i_{ак}(t)$  – соответственно периодическая и аperiodическая составляющие тока к.з.

Электрическая система произвольной сложности, содержащая только мощные источники, последовательными преобразованиями всегда может быть представлена в виде простейшей схемы замещения с эквивалентным источником, передающими элементами и эквивалентным потребителем.

Для такой системы расчет тока трехфазного к.з. ничем не отличается от расчета, приведенного в прил. 2.

Периодическая составляющая тока к.з. имеет неизменные амплитуду и фазу; аperiodическая составляющая затухает до нуля с постоянной времени  $\tau_{аэ}$ .

Трехфазное к.з. в разветвленных цепях

Рассматривается простейшая разветвленная цепь, содержащая две параллельные ветви (рис. 2.2). Без учета электромагнитного влияния цепей ток  $i_k(t)$  в точке к.з. определяется по методу наложения:

$$i_k(t) = i_{1к}(t) + i_{2к}(t) = i_{1пк}(t) + i_{2пк}(t) + i_{1ак}(t) + i_{2ак}(t), \quad (2.2)$$

где  $i_{1пк}(t), i_{2пк}(t)$  – периодические составляющие тока к.з. первой и второй ветвей;  $i_{1ак}(t), i_{2ак}(t)$  – аperiodические составляющие тока к.з. тех же ветвей.

Периодические составляющие тока к.з. рассчитываются по формуле

$$i_{\eta пк}(t) = \frac{U_m}{Z_{\eta к}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\eta к}), \quad \eta = 1, 2, \quad (2.3)$$

где  $Z_{\eta к}$  – модуль сопротивления первой и второй ветвей ( $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}$ ,  $Z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}$ ;  $\varphi_{\eta к}$  – аргументы при этих сопротивлениях ( $\varphi_{1к} = \arctg \frac{x_1}{r_1}$ ;

$\varphi_{2к} = \arctg \frac{x_2}{r_2}$ ,  $x_1 = \omega L_1$ ,  $x_2 = \omega L_2$ ).

Сумма периодических составляющих заменяется одной эквивалентной составляющей  $i_{пк}(t)$ :

$$i_{пк}(t) = i_{1пк}(t) + i_{2пк}(t) = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k), \quad (2.4)$$

где  $Z_k$  – модуль сопротивления  $Z_k = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$ ,  $\varphi_k = \arg Z_k$ .

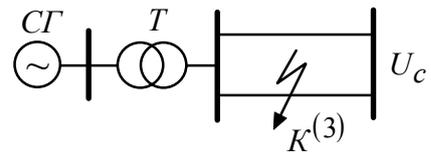


Рис. 2.1. Принципиальная схема простейшей ЭС

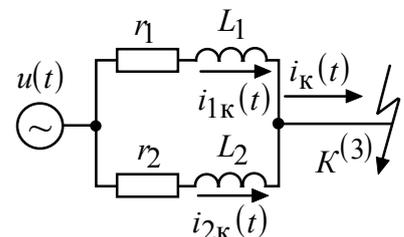


Рис. 2.2. Схема простейшей разветвленной цепи

Апериодические составляющие тока к.з. также можно заменить одной величиной  $i_{ак}(t)$  с эквивалентной постоянной времени  $\tau_{аэ}$ :

$$i_{ак}(t) = i_{1ак}(t) + i_{2ак}(t) = i_{1ак}(0) \cdot e^{-t/\tau_{a1}} + i_{2ак}(0) \cdot e^{-t/\tau_{a2}} = i_{ак}(0) \cdot e^{-t/\tau_{аэ}}, \quad (2.5)$$

где  $i_{1ак}(0), i_{2ак}(0), i_{ак}(0)$  – начальные значения соответствующих составляющих – определяются по начальным условиям;  $\tau_{1а} = L_1/r_1, \tau_{2а} = L_2/r_2$  – постоянные времени затухания апериодических составляющих тока к.з. первой и второй ветвей;

$$\tau_{аэ} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{x_{\Sigma_k}(r=0)}{r_{\Sigma_k}(x=0)} \quad \text{– эквивалентная постоянная времени; } x_{\Sigma_k}(r=0) \quad \text{–}$$

результатирующее реактивное сопротивление цепи относительно точки к.з., полученное в предположении равенства нулю всех активных составляющих сопротивлений;  $r_{\Sigma_k}(x=0)$  – результирующее относительно точки к.з. активное сопротивление цепи, рассчитанное при нулевых реактивных сопротивлениях.

Следует отметить, что выполняемая замена двух апериодических составляющих тока к.з. одной  $i_{ак}(t)$  дает приближенное значение, поскольку не учитывается неодновременность затухания этих составляющих. «Строгое» решение этого вопроса здесь (и в общем случае) может быть найдено операторным методом [2].

Если число ветвей произвольно, то расчет периодической составляющей тока к.з.  $i_{пк}(t)$  выполняется аналогично. Апериодические составляющие лучше находить для каждой ветви в отдельности, но можно заменить суммарной экспонентой, определенной из условия непрерывности тока в ветви при к.з.

Эквивалентная постоянная времени  $\tau_{аэ}$  рассчитывается на основании данных, приведенных в [3, с. 342, табл. 11–3], где имеются значения отношения  $x_{\Sigma}/r_{\Sigma}$  для характерных точек к.з. в электрических системах. Примеры этих отношений представлены в табл. 2.1.

**Т а б л и ц а 2 . 1**

*$x_{\Sigma}/r_{\Sigma}$  и  $k_y$  в сложных ЭС*

Место к.з. и характеристика электрической сети	Отношение $x_{\Sigma}/r_{\Sigma}$	Ударный коэффициент $k_y$
1. Сборные шины 6–10 кВ станций с генераторами мощностью 30–60 МВт	40–80	1,92–1,96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам станции по п. 1	20–60	1,85–1,95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А (в единице) и выше	30–60	1,89–1,95
4. То же с трансформаторами мощностью 30–100 МВ·А (в единице)	20–50	1,85–1,94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А (в единице и выше); сопротивление трансформаторов составляет 90 % и выше результирующего сопротивления до места к.з.	20–40	1,85–1,92
6. То же с трансформаторами мощностью 30–100 МВ·А (в единице)	15–30	1,81–1,89

## Порядок расчета тока к.з. в аварийной ветви

Для сложных ЭС расчет тока трехфазного к.з. в аварийной ветви выполняется следующим образом:

- формулируются основные расчетные допущения, дающие возможность пользоваться упрощенными представлениями о переходных процессах;
- в соответствии с целевым назначением расчета определяются расчетные условия;
- в зависимости от принятых допущений составляется схема замещения ЭС и определяются параметры ее элементов;
- при необходимости исключаются «трансформаторные» связи между отдельными элементами, в частности выполняется приведение параметров схемы замещения к одной ступени напряжения;
- схема замещения последовательными преобразованиями приводится к простейшему виду – неразветвленной цепи;
- определяется периодическая составляющая тока к.з., значение эквивалентной постоянной времени аperiodической составляющей тока к.з., предполагается, что начальное значение аperiodической составляющей в одной из фаз аварийной ветви максимально;
- рассчитывается ударный ток к.з. в выделенной фазе аварийной ветви;
- при необходимости находится распределение тока к.з. в схеме замещения ЭС.

## Расчетные условия

В зависимости от цели расчета электромагнитных переходных процессов расчетные условия могут быть весьма разнообразными. Например, для выбора электрооборудования необходимо определять максимальный ток в месте к.з., для настройки релейной защиты и системной автоматики – минимальное значение тока к.з. и т.д.

Определение периодической составляющей и ударного тока к.з.

Периодическая составляющая тока к.з. для преобразованной схемы замещения ЭС (рис. 2.3) находится по формуле

$$I_{\Sigma_k} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}(Z_{\Sigma})}. \quad (2.5)$$

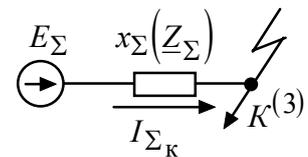


Рис. 2.3. Эквивалентная (результатирующая) схема замещения сложной ЭС

Максимальное значение тока к.з. – ударный ток к.з.  $i_y$  – определяется как

$$i_y = \sqrt{2} k_y I_{\Sigma_k}, \quad (2.6)$$

где  $k_y = 1 + e^{-0,01/\tau_{aэ}}$  и  $\tau_{aэ} = \frac{1}{\omega} \frac{x_{\Sigma_k}(r=0)}{r_{\Sigma_k}(x=0)}$ .

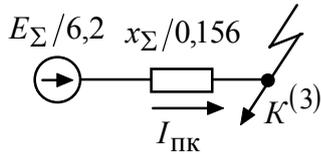


Рис. 2.4. Преобразованная схема замещения сложной ЭС

**Пример 2.1.** Для электрической системы, схема которой приведена в примере 1.1, рассчитать значение периодической составляющей тока к.з., апериодическую составляющую и ударный ток к.з. Считается, что оба источника являются источниками бесконечной мощности.

*Решение.* Используем из примера 1.2 расчетные значения параметров преобразованной к простейшему виду схемы замещения ЭС (рис. 2.4):

$$E_{\Sigma} = 6,2 \text{ кВ}; \quad x_{\Sigma} = 0,156 \text{ Ом.}$$

Значение периодической составляющей тока к.з. определяется как  $I_{\text{ПК}} = E_{\Sigma} / x_{\Sigma} = 6,2 / 0,156 = 39,74 \text{ кА}$ .

Расчет апериодической составляющей и ударного тока к.з. дает следующие значения:

$$i_{\text{ак}}(t) = i_{\text{ак}}(0) \cdot e^{-t/\tau_{\text{аз}}} = \sqrt{2} I_{\text{ПК}} \cdot e^{-t/\tau_{\text{аз}}} = \sqrt{2} \cdot 39,74 \cdot e^{-t/0,096} = 56,2 \cdot e^{-t/0,096} \text{ кА,}$$

$$i_{\text{у}} = \sqrt{2} I_{\text{ПК}} \left(1 + e^{-0,01/\tau_{\text{аз}}}\right) = \sqrt{2} \cdot 39,74 \cdot \left(1 + e^{-0,01/0,096}\right) = 106,8 \text{ кА.}$$

Значение  $\tau_{\text{аз}} = 0,096$  рассчитано по данным табл. 2.1 для случая к.з. у сборных шин вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 30 МВ·А (в единице) и выше.

Имеем  $x_{\Sigma} / r_{\Sigma} = 15 \dots 30$ . По верхней оценке  $x_{\Sigma} / r_{\Sigma} = 30$ , тогда

$$\tau_{\text{аз}} = x_{\Sigma} / (r_{\Sigma} \omega) = 30 / 314 = 0,096 \text{ с.}$$

Распределение периодической составляющей тока к.з. по ветвям схемы определяется по развернутой схеме сети (рис. 2.5) следующим образом.

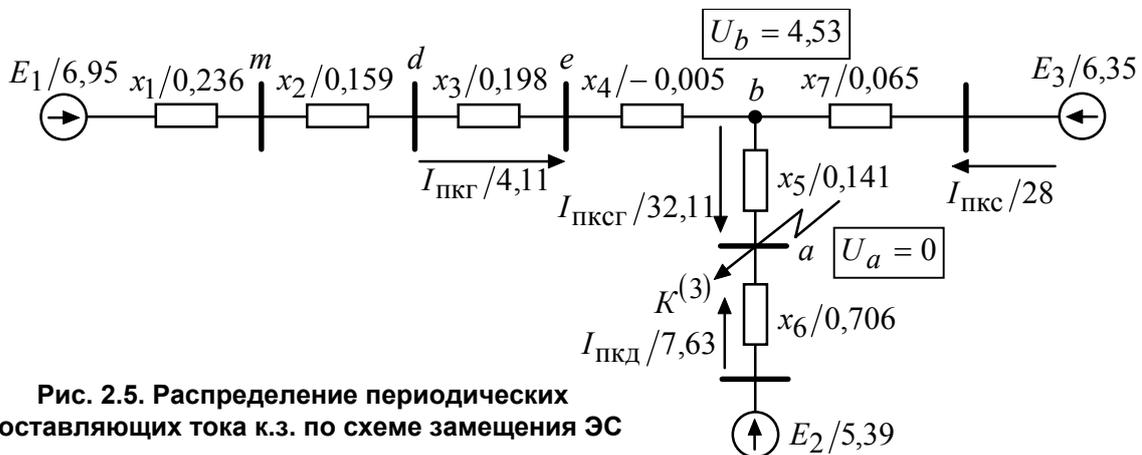


Рис. 2.5. Распределение периодических составляющих тока к.з. по схеме замещения ЭС

В точке к.з. напряжение  $U_a = 0$ .

Периодические составляющие тока к.з.:

– двигательной нагрузки  $I_{\text{ПКД}} = E_2 / x_6 = 5,39 / 0,706 = 7,63 \text{ кА}$ ;

– источников (см. рис. 1.10)  $I_{\text{ПКСГ}} = E_3 / x_{10} = 6,41 / 0,1995 = 32,11 \text{ кА}$ .

Напряжение в точке  $b$ :  $U_b = I_{\text{ПКСГ}} x_5 = 32,11 \cdot 0,141 = 4,53 \text{ кВ}$ .

Периодические составляющие тока к.з.:

– от системы  $I_{\text{ПКС}} = (E_3 - U_b) / x_7 = (6,35 - 4,53) / 0,065 = 28 \text{ кА}$ ;

– генератора  $I_{\text{ПКГ}} = (E_1 - U_b) / x_8 = (6,95 - 4,53) / 0,588 = 4,11 \text{ кА}$ .

На рис. 2.6 приведено значение периодических составляющих тока к.з. и напряжений в узлах сети с учетом наличия трансформаторных связей.

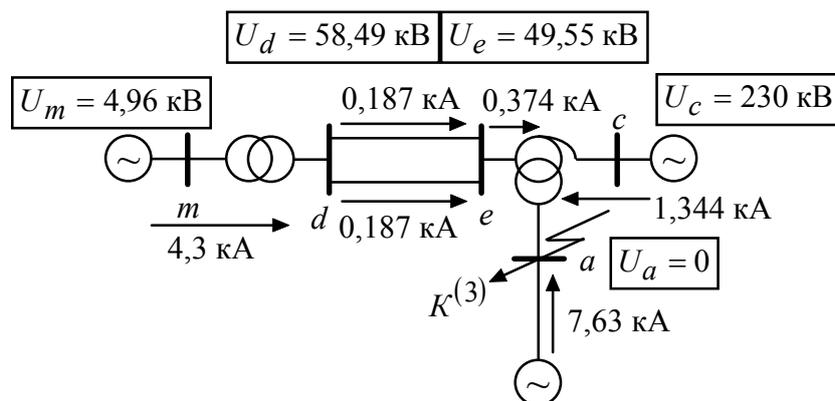


Рис. 2.6. Распределение периодических составляющих тока к.з. в ветвях ЭС

В точке к.з. «а»  $U_a = 0$ . Ток от двигательной нагрузки, расположенной на ступени низшего напряжения равен  $I_{\text{ПКД}} = 7,63 \text{ кА}$ .

Напряжение системы  $U_c = 230 \text{ кВ}$  и ток

$$I_{\text{ПКС}} = I_{\text{ПКС}} k_{\text{IV}} = 28 \cdot 0,048 = 1,344 \text{ кА}.$$

Напряжения в точках  $e$ ,  $d$  и  $m$ :

$$U_e = \left( U_b + \overset{\circ}{I}_{\text{ПКГ}} x_4 \right) / k_{\text{II}} = (4,53 - 0,005 \cdot 4,11) / 0,091 = 49,55 \text{ кВ};$$

$$U_d = U_e + \overset{\circ}{I}_{\text{ПКГ}} x_3 / k_{\text{II}} = 49,55 + 4,11 \cdot 0,198 / 0,091 = 58,49 \text{ кВ};$$

$$U_m = \left( U_d + \overset{\circ}{I}_{\text{ПКГ}} x_2 / k_{\text{II}} \right) k_{\text{I}} = (58,49 + 4,11 \cdot 0,159 / 0,091) \cdot 0,087 = 5,71 \text{ кВ}.$$

Приближенные значения периодических составляющих тока к.з.:

– генератора  $I_{\text{ПКГ}} = \overset{\circ}{I}_{\text{ПКГ}} k_{\text{II}} / k_{\text{I}} = 4,11 \cdot 0,091 / 0,087 = 4,3 \text{ кА}$ ;

– в линиях  $I_{\text{ПКЛ}} = \overset{\circ}{I}_{\text{ПКГ}} k_{\text{I}} / 2 = 4,11 \cdot 0,091 / 2 = 0,187 \text{ кА}$ .

### Вопросы для самопроверки

1. Какие составляющие имеются в полном токе к.з.?
2. Определение периодической составляющей тока в точке к.з. в сложной ЭС.
3. Приближенный расчет аperiodической составляющей тока к.з.
4. Определение эквивалентной постоянной времени затухания  $\tau_{\text{аэ}}$  аperiodической составляющей тока к.з. в сложной ЭС.
5. Порядок расчета тока к.з. в аварийной ветви.
6. Что такое расчетные условия?
7. Расчет ударного тока к.з.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТРЕХФАЗНОГО К.З. В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСТОЧНИКАМИ КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Основное требование, которому должен удовлетворять практический метод, заключается в простоте его применения. Однако простота метода может быть несовместима с точностью расчета, поскольку чем проще метод, тем на большем числе допущений он основан.

При практических методах наиболее строго определяется значение тока к.з. в начальный момент короткого замыкания, т.е. сверхпереходный ток  $I''_к$ . Погрешность расчета составляет 5 %. Если рассчитать ток в произвольный момент времени, то точность расчета существенно уменьшается и погрешность может достигать 10–15 % в аварийной ветви. Для остальных ветвей схемы ошибка вычислений оказывается обычно большей. Она растет по мере удаления от точки к.з. и увеличения времени переходного процесса.

Допущения, применяемые при расчете токов к.з. в сложных ЭС

При практических расчетах тока трехфазного к.з. в электрических системах с источниками конечной мощности используются все введенные ранее допущения (глава 2) и применяют дополнительные:

– закон изменения периодической составляющей тока  $i_{пк}(t)$ , установленный для изолированно работающей синхронной машины (СМ) (прил. 3), распространяется на случай сложной ЭС с несколькими синхронными и другими электрическими машинами;

– аperiodическая составляющая тока к.з.  $i_{ак}(t)$  учитывается приближенно;

– роторы синхронных и асинхронных машин в ЭС считаются строго симметричными, их параметры по продольной и поперечной осям одинаковы, поэтому можно отказаться от рассмотрения переходного процесса отдельно по осям  $d$  и  $q$ .

В результате применения этих допущений при расчете тока к.з. можно руководствоваться следующими положениями:

– изменение во времени ЭДС, напряжений и токов рассматривается без разложения на составляющие по осям  $d$  и  $q$ ;

– вследствие симметричности роторов СМ в токе к.з. будут отсутствовать составляющие двойной частоты  $i_{2\omega}(t)$ .

Расчет начального значения периодической составляющей (сверхпереходного тока) и ударного тока к.з.

При расчете начального значения периодической составляющей  $I''_{пк}$  тока к.з. все СМ (генераторы, двигатели, синхронные компенсаторы) вводятся в схему замещения сверхпереходными ЭДС  $E''_0$  и сверхпереходными сопротивлениями  $x''$  (рис. 3.1).

Значения  $E''_0$  и  $x''$  определяются и для всех асинхронных машин (АМ), а также для обобщенной нагрузки (ОН), в которую входят мелкие и крупные двигатели, печная нагрузка и т.д.

Для электрических машин эти величины могут быть получены аналитически [1], а для обобщенной нагрузки – по экспериментальным данным.

Так, для СМ сверхпереходное сопротивление  $x''$  можно оценить, зная значения сверхпереходных сопротивлений по продольной  $x''_d$  и поперечной  $x''_q$  осям, как среднее между ими (среднеарифметическое или среднегеометрическое).

Для АМ при оценке  $x''_0$  используют пусковой ток  $I_{\text{п}}$ , значение которого обычно дается отнесенным к номинальным условиям:

$$x''_0 = 1/I_{\text{п}(\ast)},$$

где  $I_{\text{п}(\ast)} = I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ .

При учете обобщенной нагрузки

$$x''_{\text{н}} = 0,35 U_{\text{н}}^2 / S_{\text{н}}, \quad (3.1)$$

где  $U_{\text{н}}$ ,  $S_{\text{н}}$  – номинальные значения напряжения и мощности нагрузочного узла; 0,35 – относительное (к номинальным данным) значение сверхпереходного сопротивления узла обобщенной нагрузки.

Любой «машинный» элемент ЭС характеризуется в нормальном (рабочем) режиме значением напряжения на его зажимах  $U_0$ , величиной фазного тока  $I_0$ , коэффициентом мощности  $\cos \varphi_0$ .

В начальный момент к.з. его сопротивление мгновенно меняется, становясь равным сверхпереходному значению  $x''$ , поэтому векторная диаграмма (рис. 3.1), соответствующая началу переходного процесса, позволяет найти значение ЭДС  $E''_0$ :

$$E''_0 = \sqrt{(U_0 \pm x'' I_0 \sin \varphi_0)^2 + (x'' I_0 \cos \varphi_0)^2}. \quad (3.2)$$

В формуле (3.2) знак «+» в первой скобке берется для электрической машины, выдающей реактивную мощность (синхронный генератор, перевозбужденные синхронные двигатель или компенсатор); знак «-» используется для ЭМ, принимающих реактивную мощность из сети (недовозбужденные синхронные двигатель или компенсатор, асинхронный двигатель).

В практических расчетах значение  $E''_0$  часто определяется приближенно по формуле

$$E''_0 = U_0 + x'' I_0 \sin \varphi_0. \quad (3.3)$$

В табл. 3.1 [1, с. 133, табл. 6.1] приведены величины  $x''_{\ast}$  и  $E''_{0\ast}$  для различных видов электрических машин. Для практического использования

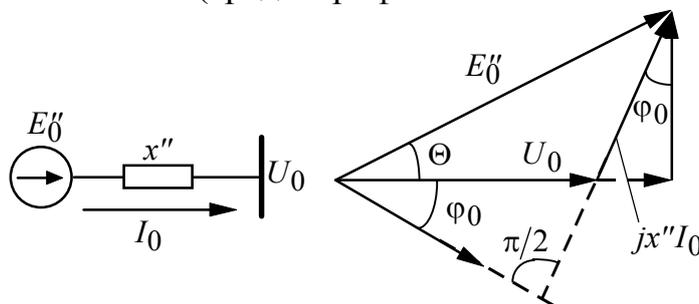


Рис. 3.1. Схема замещения и векторная диаграмма «машинного» элемента ЭС

данных табл. 3.1 необходимо пересчитать табличные величины  $E_0''$ , кВ, и  $x''$ , Ом, по формулам

$$E_0'' = E_{0*}'' U_H,$$

$$x'' = x_*'' U_H^2 / S_H,$$

где  $U_H$ ,  $S_H$  – номинальные напряжение и мощность соответствующего машинного элемента.

**Таблица 3.1**

Значения  $x''$  и  $E_0''$  для «машинных» элементов ЭС

«Машинные» элементы ЭС	$x_*''$	$E_{0*}''$
1. Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
2. То же мощностью 100–500 МВт	0,20	1,13
3. Гидрогенераторы с демпферными обмотками	0,20	1,13
4. То же без демпферных обмоток	0,27	1,18
5. Синхронный двигатель	0,20	1,10
6. Синхронный компенсатор	0,20	1,20
7. Асинхронный двигатель	0,20	0,90
8. Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Для расчета периодической составляющей тока к.з. в начальный момент времени (*сверхпереходного тока*  $I_{ПК}''$ ) схема замещения ЭС обычным образом преобразуется к простейшему виду – неразветвленной цепи с параметрами  $E_{\Sigma}''$ ,  $x_{\Sigma}''$ . Величина тока  $I_{ПК}''$  находится по формуле

$$I_{ПК}'' = E_{\Sigma}'' / x_{\Sigma}'' , \quad (3.4)$$

где  $I_{ПК}''$  – действующее значение сверхпереходного тока.

При учете активных составляющих сопротивлений элементов ЭС:

$$I_{ПК}'' = E_{\Sigma}'' / Z_{\Sigma} , \quad (3.5)$$

где  $Z_{\Sigma}$  – модуль полного результирующего сопротивления преобразованной схемы замещения ЭС.

В практических расчетах сверхпереходный ток к.з. рассчитывается и по формуле вида

$$I_{ПК}'' = U_{ко} / x_{\Sigma}'' , \quad (3.6)$$

где  $U_{ко}$  – напряжение предшествующего режима в точке к.з.

Точность расчета по любой из приведенных выше формул оказывается достаточной.

**При вычислении ударного тока к.з.** в сложной ЭС можно рассматривать три характерных случая.

1. *Короткое замыкание в удаленной точке ЭС.* Электрически удаленной считается точка, расположенная в устройствах и в сети повышенного напряжения электрических станций и подстанций, в распределительных

устройствах низкого напряжения без синхронных компенсаторов, за линейными реакторами электростанций и подстанций. При к.з. в удаленной точке ударный ток к.з. определяется по формуле

$$i_y = \sqrt{2} I''_{\text{пк}} k_y, \quad (3.7)$$

где  $k_y = 1 + e^{-0,01/\tau_{\text{аэ}}}$  – ударный коэффициент,  $\tau_{\text{аэ}} = \frac{1}{\omega} \frac{x_{\Sigma}(r=0)}{r_{\Sigma}(x=0)}$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока к.з.

Для расчета значений  $x_{\Sigma}$  и  $r_{\Sigma}$ , определяемых для схем соответственно при отсутствии активных и реактивных сопротивлений, используются данные таблиц 3.2 и 3.3.

**Т а б л и ц а 3 . 2**  
*Примеры отношений  $x/r$  для типовых элементов ЭС*

Типовые элементы ЭС	$x/r$
1. Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	50–85
2. То же мощностью 100–500 МВт	100–140
3. Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40–60
4. То же без демпферных обмоток	60–90
5. Трансформаторы мощностью 5–30 МВ·А	7–17
6. То же мощностью 60–500 МВ·А	20–50
7. Реакторы 6–10 кВ до 1000 А	15–70
8. То же 1500 А и выше	40–80
9. Воздушные линии	2–8
10. Трехжильные кабели 6–10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением $3 \times 95 - 3 \times 185 \text{ мм}^2$	0,2–0,8
11. Обобщенная нагрузка	2,5

**Т а б л и ц а 3 . 3**  
*Определение  $\tau_a$  и  $k_y$  для различных точек к.з.*

Место возникновения к.з.	$\tau_a, c$	$k_y$
1. Турбогенераторы 100–1000 МВт	0,4–0,54	1,975–1,98
2. Блоки «турбогенератор-трансформатор», МВт:		
100–200	0,26	1,965
300	0,32	1,977
500	0,35	1,983
800	0,30	1,967
3. Система, связанная с шинами, где рассматривается к.з., воздушными линиями, кВ:		
220–330	0,03–0,04	1,717–1,780
500–750	0,06–0,08	1,850–1,895

В первой из них для каждого элемента ЭС определяется отношение  $x/r$  и в схему, ранее составленную для реактивных сопротивлений, вводится соответствующее значение  $r$  [1, с. 132, табл. 6–2].

Во втором случае  $r_{\Sigma}(x=0)$  учитывается приближенно. В таблице даются значения  $\tau_a$  и  $k_y$  для к.з. в характерных точках ЭС.

2. *Короткое замыкание вблизи генератора.* При возникновении к.з. на вводах генераторов или блоков генератор-трансформатор, на сборных шинах устройств генераторного напряжения электрическая система рассматривается относительно точки к.з. как два эквивалентных источника (рис. 3.2):

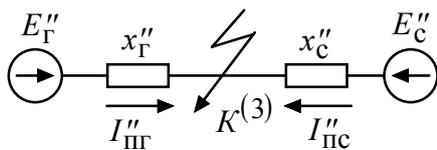


Рис. 3.2. Расчетная схема для определения  $i_y$  при к.з. вблизи генератора

– генератор (или несколько генераторов), подключенный непосредственно к точке к.з.;

– оставшаяся часть – система.

Ударный ток в этом случае определяется по формуле

$$i_y = \sqrt{2} (I''_{ПГ} k_{yГ} + I''_{УС} k_{пс}), \quad (3.8)$$

где  $I''_{ПГ}$ ,  $I''_{пс}$  – начальные значения периодических составляющих тока к.з. генератора и системы соответственно;  $k_{yГ}$ ,  $k_{yС}$  – ударные коэффициенты для генератора и системы.

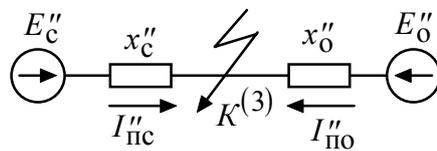


Рис. 3.3. Расчетная схема для определения  $i_y$  при к.з. вблизи узлов двигательной нагрузки

Значение ударного коэффициента  $k_{yГ}$  определяется с учетом затухания аperiodической составляющей тока генератора  $\tau_a$ , а  $k_{yС} = 1 + e^{-0,01/\tau_{ас}}$ .

3. *Короткое замыкание вблизи узлов двигательной нагрузки.* К подобному типу к.з. относятся короткие замыкания в распределительных устройствах собственных нужд электрических станций, в распределительных устройствах с напряжением 6–20 кВ с крупными двигателями. В этом случае для расчета  $i_y$  в схеме замещения ЭС выделяется ветвь, содержащая двигатель (или группу двигателей), подключенный непосредственно к точке к.з. (рис. 3.3).

Ударный ток к.з.:

$$i_y = \sqrt{2} (k_{yС} I''_{пс} + k_{yО} I''_{по}), \quad (3.9)$$

где  $I''_{по} = E''_О/x''_О$  – начальное значение периодической составляющей тока к.з. от двигателя.

При определении  $k_{yО}$  надо иметь в виду, что в двигателях периодическая и аperiodическая составляющие затухают практически одновременно, поэтому учитывается затухание обеих составляющих. Значение  $k_{yО}$  существенно зависит от величины активной мощности двигателя (рис. 3.4). Обычно

принимают среднее значение  $k_{y0}$  [1, с. 138], соответствующее средней кривой на рис. 3.4. Для обобщенной нагрузки:  $k_{yон} = 1$ .

Определение изменения во времени  
периодической составляющей тока к.з.

При приближенных расчетах токов к.з. для определения действующего значения периодической составляющей тока к.з. от синхронных генераторов в произвольный момент времени при радиальной расчетной схеме следует применять метод типовых кривых. Типовые кривые показывают изменение во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока к.з. от генератора в произвольный и начальный моменты времени:

$$\gamma_t = I_{пт_t} / I''_{го} = f(t), \quad (3.10)$$

где  $I_{пт_t}$  и  $I''_{го}$  – значение периодической составляющей тока к.з. генератора в произвольный момент времени и ее начальное значение.

Типовые кривые построены для разных удаленностей точки к.з. от выводов статорной обмотки синхронной машины. Электрическая удаленность точки к.з. от СМ характеризуется отношением действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент к.з. к его номинальному току:

$$I^*_{го} = I''_{го} / I_{гном} = var. \quad (3.11)$$

Расчетные кривые используются при определении периодической составляющей тока к.з. для различных групп турбогенераторов с учетом современной тенденции оснащения генераторов разных типов определенными системами возбуждения. На рис. 3.5 представлены типовые кривые для турбогенераторов:

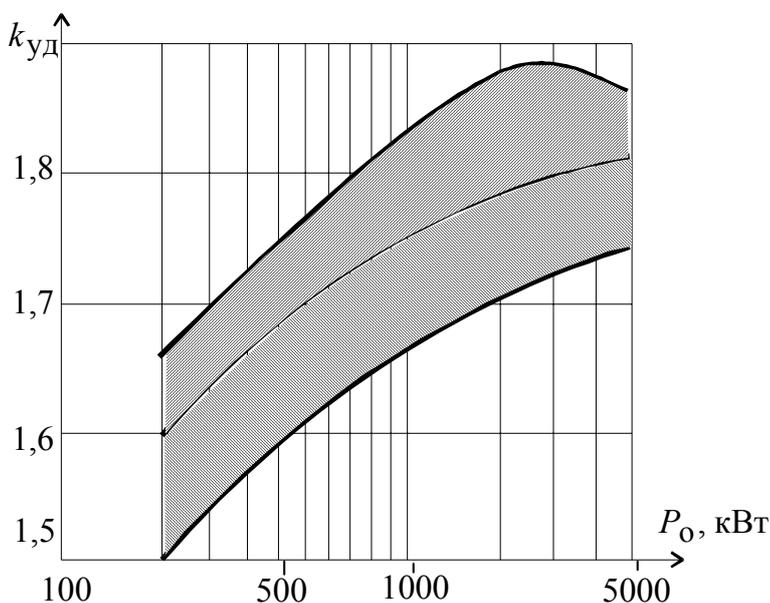


Рис. 3.4. Значение ударного коэффициента для асинхронного двигателя

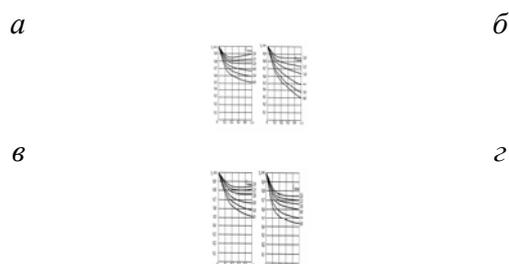
– с тиристорной независимой системой возбуждения (рис.3.5, а) – генераторы типов ТВВ–300–2ЕУЗ, ТВВ–500–2ЕУЗ, ТВВ–800–2ЕУЗ, ТГВ–300–2УЗ, ТГВ–800–2УЗ;

– с тиристорной системой параллельного самовозбуждения (рис. 3.5, б) – ТВФ–100–2УЗ, ТВФ–100–2ЕУЗ, ТВФ–120–2УЗ, ТВВ–160–2ЕУЗ, ТВВ–167–2УЗ, ТВВ–200–2АУЗ, ТВВ–220–2УЗ, ТВВ–220–2ЕУЗ, ТГВ–200–2УЗ, ТЗВ–220–2ЕУЗ, ТЗВ–320–2ЕУЗ;

– с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения (рис. 3.5, в) – ТВФ–63–2ЕУЗ, ТВФ–63–2УЗ, ТВФ–110–2ЕУЗ;

– с диодной бесщеточной системой возбуждения (рис.3.5, г) – ТВВ–1000–2УЗ и ТВВ–1200–2УЗ.

Все кривые получены с учетом насыщения стали статора, насыщения путей рассеяния статора, вызванного аperiodической составляющей тока статора, эффекта вытеснения токов в контурах ротора и регулирования частоты вращения ротора турбины. При этом предполагается, что до к.з. генератор работал в номинальном режиме.



**Рис. 3.5. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока к.з. от турбогенераторов с системами возбуждения:**  
тиристорной независимой (а); тиристорной системой самовозбуждения (б);  
диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения (в);  
диодной бесщеточной (г)

Типовые кривые учитывают изменение действующего значения периодической составляющей тока к.з., если отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент к.з. к его номинальному току равно или больше двух. При меньших значениях этого отношения следует считать, что действующее значение периодической составляющей тока к.з. не изменяется во времени  $I_{пт} = I''_{го} = \text{const}$ .

**Порядок использования расчетных кривых.** Расчет действующего значения периодической составляющей тока к.з. от синхронного генератора в произвольный (фиксированный) момент времени с использованием метода типовых кривых рекомендуется вести в следующем порядке:

– по исходной расчетной схеме составить эквивалентную схему замещения для определения начального значения периодической составляющей тока к.з. (п. 3.2). В схеме замещения синхронную машину следует представить сверхпереходным сопротивлением и сверхпереходной ЭДС, далее с помощью преобразований привести схему к простейшему виду и определить действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент к.з.;

– используя формулу (3.11) определить значение величины  $I_{*го}$ , характеризующей электрическую удаленность расчетной точки к.з. от синхронной машины;

– исходя из типа генератора и его системы возбуждения, выбрать соответствующие типовые кривые и по найденному значению  $I_{*го}$  выбрать

необходимую кривую (при этом допустима линейная экстраполяция в области смежных кривых);

– по выбранной кривой для заданного момента времени определить коэффициент  $\gamma_t$ ;

– определить искомое значение периодической составляющей тока к.з. от синхронной машины в заданный момент времени

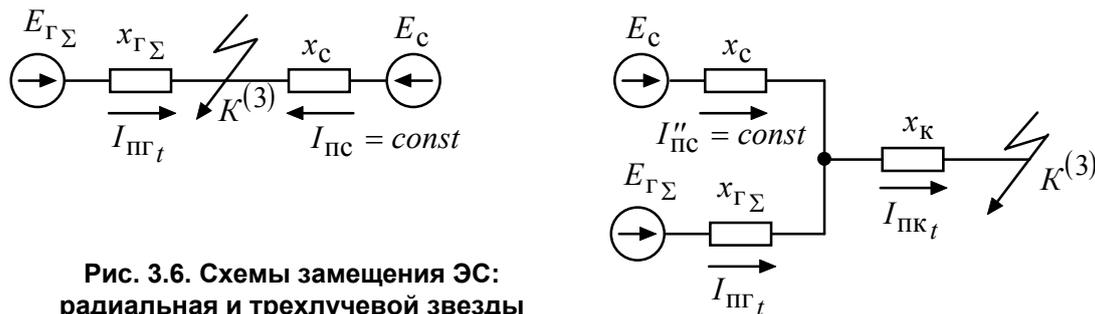
$$I_{пг_t} = \gamma_t \cdot I''_{го}. \quad (3.12)$$

Номинальный ток генератора рассчитывается по формуле

$$I_{г_ном} = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_{ср.кз} \cos \varphi_{ном}}, \quad (3.13)$$

где  $P_H$  – номинальная мощность СМ (или суммарная мощность группы машин);  $U_{ср.кз}$  – среднее номинальное напряжение той ступени напряжения, где произошло к.з.;  $\cos \varphi_{ном}$  – номинальный коэффициент мощности.

В результате эквивалентирования может быть получено два вида схемы замещения ЭС (рис. 3.6).



**Рис. 3.6. Схемы замещения ЭС: радиальная и трехлучевой звезды**

Для радиальной схемы замещения ЭС периодическая составляющая полного тока к.з.  $I_{пк_t}$  в точке к.з. находится как сумма двух слагаемых:

$$I_{пк_t} = I_{пг_t} + I''_{пс}. \quad (3.14)$$

Схема, представленная в виде трехлучевой звезды, рассматривается в следующем порядке. Для каждого генератора по основным кривым определяется значение периодической составляющей тока к.з. в произвольный момент времени. Периодическая составляющая тока к.з. в точке к.з. определяется как

$$I_{пк_t} = \sum_{i=1}^n I_{пг_{ti}} + I''_{пс}, \quad (3.15)$$

где  $n$  – число ветвей, содержащих генераторы.

## Замыкание в распределительных сетях и системах электроснабжения

Распределительные сети выполняются на напряжении 3–35 кВ. Системы электроснабжения имеют напряжение 1 кВ и ниже, в них электрическая энергия доводится непосредственно до потребителя.

Распределительные сети отделены от основных сетей двумя и более ступенями трансформации, поэтому режим работы распределительных сетей практически не влияет на режим основной ЭС.

При расчете к.з. в распределительных сетях учитывается ряд особенностей.

В расчетах к.з., как правило, напряжения в точках примыкания распределительных сетей могут считаться постоянными.

В распределительных сетях широко представлены кабельные линии, воздушные линии малых сечений, воздушные линии со стальными проводами, что приводит к необходимости учета активных сопротивлений таких линий. Более того, при достаточной продолжительности к.з. увеличение активного сопротивления проводника может вызвать заметное снижение тока к.з. Особенно сильно этот эффект проявляется на участках воздушной линии со стальными проводами, параметры которых в большой степени зависят от величины тока, протекающего по ним.

Системы электроснабжения находятся в еще большей зависимости от генераторов системы, что позволяет считать напряжение в узле, от которого питаются эти установки, неизменным.

При расчетах токов к.з. в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ принимают следующие допущения:

1) использовать упрощенные методы расчетов, если их погрешность не превышает 10 %;

2) максимально упрощать и эквивалентировать всю внешнюю сеть по отношению к месту к.з. и индивидуально учитывать только автономные источники электроэнергии и электродвигатели, непосредственно примыкающие к месту к.з.;

3) не учитывать ток намагничивания трансформаторов;

4) не учитывать насыщение магнитных систем электрических машин;

5) принимать коэффициенты трансформации трансформаторов равными отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения сетей, которые связывают трансформаторы. При этом следует использовать следующую шкалу средних номинальных напряжений: 37; 24; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,4; 0,23;

6) не учитывать влияние синхронных и асинхронных электродвигателей или комплексной нагрузки, если их суммарный номинальный ток не превышает 1 % начального значения периодической составляющей тока в месте к.з., рассчитанного без учета электродвигателей или комплексной нагрузки.

Токи к.з. могут достигать огромных величин из-за малых сопротивлений сетей, поэтому при расчетах требуется учитывать ряд дополнительных факторов:

– активные сопротивления шин, контактов, трансформаторов тока, первичные обмотки которых включены в силовые цепи и т.д.;

- явление теплового спада тока к.з.;
- увеличение времени отключения тока к.з. из-за многоступенчатости защиты, установленной в весьма разветвленных цепях.

Учет изменения параметров проводников в сети

В распределительных сетях для линий, выполненных из ферромагнитных материалов (например, стальные провода марки ПС), активное и реактивное сопротивления являются функциями параметров режима, т.е. их величина зависит от тока, протекающего по проводу:

$$r = f_1(I) \text{ и } x_{\text{вн}} = f_2(I).$$

Здесь под  $x_{\text{вн}}$  понимается внутренняя часть реактивного сопротивления, соответствующая доле магнитного потока, которая замыкается по самому проводнику. Зависимость параметров цепи ( $r$ ,  $x$ ) от параметров режима ( $I$ ) обуславливает нелинейный характер распределительных сетей.

Характеристики  $r = f_1(I)$  и  $x_{\text{вн}} = f_2(I)$  стандартизованы. Можно расчет сети выполнять приближенно. При токе  $I = 100 \dots 200$  А используют средние значения активных, полных реактивных и полных сопротивлений соответствующих проводов [1, с. 441, табл. 17–1]. При токе, большем 200 А, суммарное реактивное сопротивление проводов резко падает, поэтому приближенно  $x \approx 0,5$  Ом/км.

Активное сопротивление сети должно подсчитываться с учетом теплового спада тока к.з.

Тепловой спад тока к.з.

В начальный момент к.з. ток достигает значительной величины. Повышается температура проводника, что вызывает увеличение его активного сопротивления, приводящего к уменьшению тока к.з. Расчет тока к.з. в этом случае проводится следующим образом.

Для момента времени  $t = 0$  рассчитывается значение сверхпереходного тока к.з.  $I''_{\text{пк}}$  и определяется значение температуры нагрева проводника, увеличение его активного сопротивления и вызванное этим уменьшение тока к.з.

Для простейшей сети (рис. 3.7), в которой происходит трехполюсное к.з. определены:

- $x_c$  – реактивное сопротивление сети;
- $x_{\text{п}}$  – реактивное сопротивление провода;

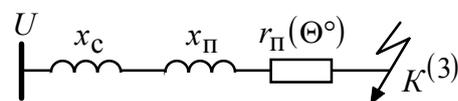


Рис. 3.7. Схема простейшей сети

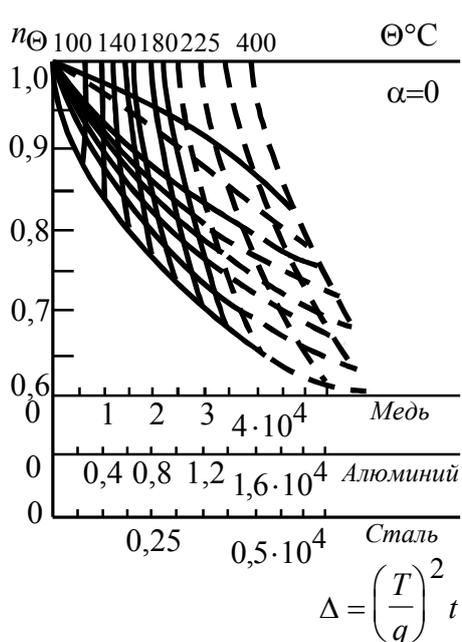


Рис. 3.8. Диаграмма для учета теплового спада тока к.з.

–  $r_{\Pi}(\Theta^{\circ})$  активное сопротивление провода, зависящее от температуры  $\Theta^{\circ}$ . Периодическая составляющая тока к.з. находится для момента времени  $t$  по формуле

$$I_{\text{ПК}t} = n_{\Theta} I''_{\text{ПК}}, \quad (3.16)$$

где  $n_{\Theta}$  – коэффициент, учитывающий тепловой спад тока к.з. ( $n_{\Theta} < 1$ ). Его значение можно подсчитать аналитически из уравнения теплового баланса

$$n_{\Theta} \equiv \frac{1}{(I''_{\text{ПК}}/q)^2 t}, \quad (3.17)$$

где  $q$  – площадь поперечного сечения проводника;  $t$  – время к.з. Зависимость  $n_{\Theta}$  для разных проводников приведена на рис. 3.8.

#### Учет местных источников и нагрузок

В местной сети имеются свои источники питания. Для расчета таких сетей можно применять все ранее изученные методы, учитывая ряд особенностей:

- в точках присоединения распределительной сети к основной сети системы напряжение можно считать практически постоянным при любых нарушениях режима распределительной сети; таким образом, при наличии местных источников следует рассматривать простейшую схему с двумя генераторными ветвями – система и местный источник;

- если в качестве местного источника рассматриваются шины генераторного напряжения достаточно крупных электростанций, то напряжение на этих шинах при нарушении режима в распределительной сети также можно считать приблизительно постоянным, поскольку все линии, отходящие от шин генераторного напряжения, обычно реагируются в целях уменьшения токов к.з.; появляется большое сопротивление  $x_L$  в схеме питания распределительной сети, за которым напряжение считается постоянным;

- при анализе распределения токов в ветвях системы электроснабжения обычно используют метод наложения, рассматривая аварийный режим как результат наложения собственно аварийного режима на нормальный режим; при этом для оценки собственно аварийного режима исходят из схем замещения, составленных для сверхпереходного режима;

- наличие батарей статических конденсаторов, предназначенных для генерации реактивной мощности  $Q$  (увеличение  $\cos\phi$ ): существуют специальные схемы включения конденсаторов, когда в цепи конденсаторной батареи имеется значительная индуктивность, специально включаемая для ограничения токов или как средство фильтрации высших гармоник; в этом случае конденсаторную батарею надо учитывать как независимый источник тока к.з.; при малой индуктивности между точкой к.з. и батареей, ее влиянием

на ток к.з. можно пренебречь, поскольку ток от батареи быстро снижается до нуля.

**Пример 3.1.** Рассчитать значения сверхпереходного и ударного токов к.з. в точке короткого замыкания. Определить величину сверхпереходного тока в каждой ветви схемы замещения электрической системы (рис. 3.9), составленной для начального момента к.з. ( $t = 0$ ).

*Исходные данные.* Параметры схемы замещения приведены на рис. 3.9.

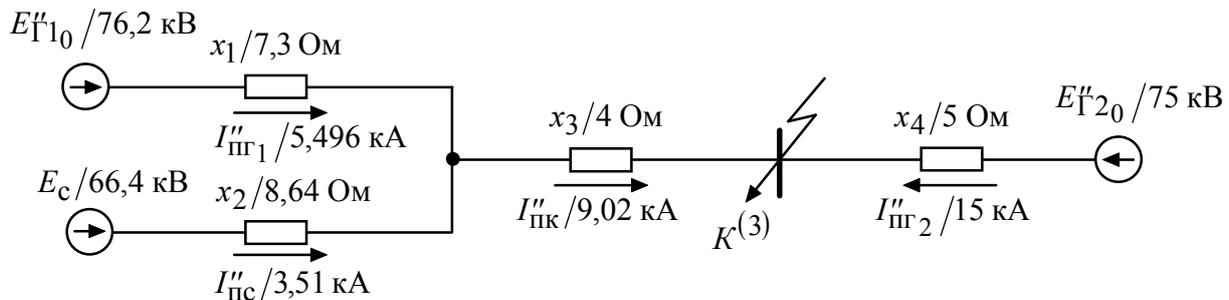


Рис. 3.9. Схема замещения ЭС

*Решение.* Схема замещения преобразуется к простейшему виду (рис. 3.10):

$$x_5 = x_3 = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} = \frac{7,3 \cdot 8,64}{7,3 + 8,64} = 3,96 \text{ Ом};$$

$$E_3 = x_3 \left( \frac{E''_{Г10}}{x_1} + \frac{E_c}{x_2} \right) = 3,96 \cdot \left( \frac{76,2}{7,3} + \frac{66,4}{8,64} \right) = 71,8 \text{ кВ};$$

$$x_6 = x_5 + x_3 = 3,96 + 4 = 7,96 \text{ Ом}.$$

Сверхпереходный ток определяется как

$$I''_{ПК1} = E_3 / x_6 = 71,8 / 7,96 = 9,02 \text{ кА};$$

$$I''_{ПК2} = E''_{Г20} / x_4 = 75 / 5 = 15 \text{ кА}.$$

Значение сверхпереходного тока в точке к.з.:

$$I''_{ПК} = I''_{ПК1} + I''_{ПК2} = 9,02 + 15 = 24,02 \text{ кА}.$$

Ударный ток рассчитывается по схеме замещения ЭС, представленной на рис. 3.10. Первый генераторный источник удален от точки к.з. и при расчете  $i_y$  объединяется с системой:

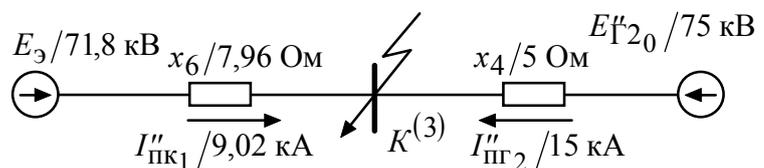


Рис. 3.10. Преобразованная схема замещения ЭС

$$i_y = \sqrt{2} \left( I''_{ПК1} k_{yc} + I''_{ПК2} k_{yГ2} \right) = \sqrt{2} \cdot (9,02 \cdot 1,799 + 15 \cdot 1,965) = 64,38 \text{ кА},$$

где  $k_{yc} = 1 + e^{-0,01/\tau_{ac}} = 1,779$ ,  $k_{yГ2} = 1,965$  – ударный коэффициент, определенный по табл. 3.3 для генератора мощностью 100–200 МВт;  $\tau_{ac} = 0,04$  с – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к.з. от

системы, связанной с точкой к.з. воздушными линиями напряжением 220–330 кВ.

Распределение сверхпереходного тока к.з. по ветвям схемы:

– напряжение в точке  $a$  (рис. 3.9):  $U_a = I''_{пк1} \cdot x_3 = 9,02 \cdot 4 = 36,08$  кВ;

– сверхпереходный ток от первого генератора

$$I''_{пк1} = (E''_{г10} - U_a) / x_1 = (76,2 - 36,08) / 7,3 = 5,456 \text{ кА};$$

– сверхпереходный ток от системы

$$I''_{пс} = (E_c - U_a) / x_2 = (66,4 - 36,08) / 8,64 = 3,51 \text{ кА}.$$

**Пример 3.2.** Для схемы ЭС, рассмотренной в примере 3.1, определить ток в точке к.з. в момент расхождения дугогасительных контактов выключателя  $t = 0,2$  с.

*Исходные данные.* Для генераторов системы дополнительно задано:  $I_{н.г1} = 4,33$  кА, тип ТВФ–63–2УЗ;  $I_{н.г2} = 5,67$  кА, тип ТВВ–160–2ЕУЗ.

*Решение.* Для определения значения периодической составляющей тока к.з. от второго генератора используются типовые кривые (см. рис. 3.5, б). Номер кривой выбирается по типу системы возбуждения генератора и соотношению

$$I''_{пг2} / I_{н.г2} = 15 / 5,67 = 2,64 > 2.$$

Для момента времени  $t = 0,2$  с –  $\gamma_t = 0,74$  и

$$I_{пг2t} = I''_{пг2} \gamma_t = 15 \cdot 0,74 = 11,1 \text{ кА}.$$

Для первого генератора выбор номера кривой производится аналогично: по типу системы возбуждения генератора и соотношению

$$I''_{пг1} / I_{н.г1} = 5,45 / 4,33 = 1,26 < 2.$$

Полученное отношение действующего значения периодической составляющей тока генератора в начальный момент к.з. к его номинальному току меньше двух, поэтому

$$I_{пг1t} = I''_{пг1} = 5,45 \text{ кА}.$$

Суммарное значение периодической составляющей тока к.з. в точке к.з. для момента времени  $t = 0,2$  с (в соответствии с выражением 3.15):

$$I_{пкt} = I''_{пс} + I_{пг1t} + I_{пг2t} = 3,51 + 5,45 + 11,1 = 20,06 \text{ кА}.$$

Апериодическая составляющая тока к.з.

$$\begin{aligned} i_{a(t=0,2\text{с})} &= \sqrt{2}(I''_{пс} + I''_{пг1}) \cdot e^{-0,2/\tau_{a1}} + \sqrt{2}I''_{пг2} \cdot e^{-0,2/\tau_{a2}} = \\ &= \sqrt{2} \cdot (3,51 + 5,45) \cdot e^{-0,2/1,717} + \sqrt{2} \cdot 15 \cdot e^{-0,2/1,965} = 11,24 + 19,11 = 30,35 \text{ кА}, \end{aligned}$$

где  $\tau_{a1}$  – постоянная времени для системы, связанной воздушными линиями с точкой к.з. (табл. 3.3);  $\tau_{a2}$  – постоянная времени для блока «турбогенератор – трансформатор» мощностью 100–200 МВт.

### Вопросы для самопроверки

1. Как изменяется ток к.з. в сложных ЭС, имеющих источники различной мощности?
2. Какими схемами замещения представляются «машинные» элементы ЭС в начальный момент к.з.?
3. Расчет начального значения периодической составляющей тока к.з.
4. Основные случаи определения ударного тока к.з.
5. Расчетные кривые. Порядок их использования для расчета изменения во времени периодической составляющей тока к.з.
6. Особенности расчета к.з. и замыканий в распределительных сетях и системах электроснабжения.
7. Влияние параметров режима на параметры элементов ЭС.
8. Явление теплового спада тока к.з.
9. Учет местных источников при расчетах тока к.з.

## ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОКРАТНОМ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ

подавляющее большинство режимов ЭС связано с возникновением несимметрии. Несимметрия может быть поперечной (замыкания, короткие замыкания) и продольной (изменения сопротивления элементов в фазах – обрыв, отключение и т.п.). В этом разделе внимание уделено режимам с однократной несимметрией, т.е. таким режимам, при которых несимметричным становится только один элемент (одна точка), а вся остальная часть ЭС остается симметричной.

### Применение метода симметричных составляющих при анализе режимов с однократной несимметрией

Для анализа несимметричных режимов электрических установок пользуются методом симметричных составляющих, из которого следует, что

$$\dot{F}_A = \dot{F}_{A0} + \dot{F}_{A1} + \dot{F}_{A2}; \dot{F}_B = \dot{F}_{B0} + \dot{F}_{B1} + \dot{F}_{B2}; \dot{F}_C = \dot{F}_{C0} + \dot{F}_{C1} + \dot{F}_{C2}, \quad (4.1)$$

где  $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$  – несимметричные фазные величины;  $\dot{F}_{A0}, \dot{F}_{A1}, \dots, \dot{F}_{C2}$  – симметричные составляющие фаз (рис. 4.1, а).

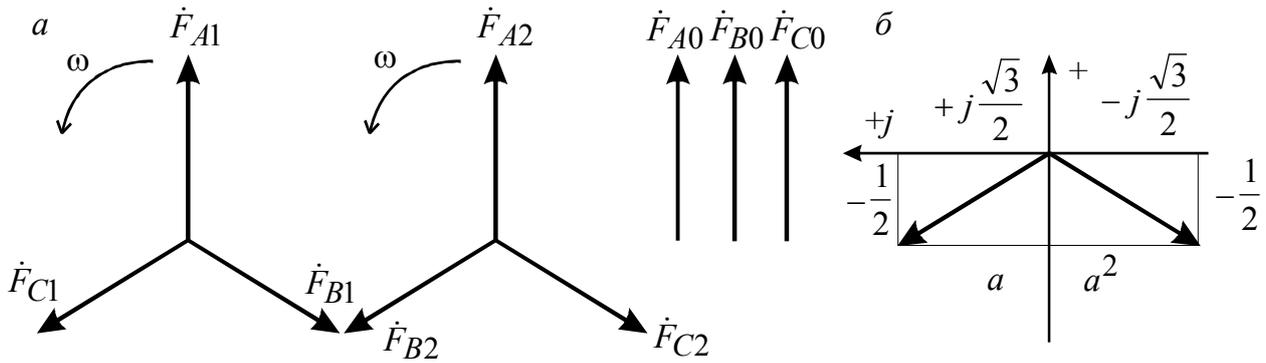


Рис. 4.1. Трехфазная система векторов симметричных составляющих (а) и вращающие векторы (б)

Запись (4.1) можно упростить, если ввести вращающие векторы (рис. 4.1, б)

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j\rho}; \quad a^2 = e^{j2\rho} = e^{-j\rho};$$

$$F_{B1} = a^2 F_{A1}; \quad F_{B2} = a F_{A2}; \quad F_{C1} = a F_{A1}; \quad F_{C2} = a^2 F_{A2}.$$

Тогда в матричной форме:

$$F_f = \mathbf{S} F_s, \quad (4.2)$$

где  $F_f$  – вектор фазных величин;  $\mathbf{S}$  – матрица коэффициентов симметричных составляющих;  $F_s$  – вектор симметричных составляющих.

Используя обратное преобразование, можно получить

$$F_s = \mathbf{S}^{-1} F_f, \quad (4.3)$$

где  $\mathbf{S}^{-1}$  – обратная матрица коэффициентов:

$$\mathbf{S} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix}. \quad (4.4)$$

Из рассмотренной физической картины протекания несимметричного переходного процесса в СМ становится ясно, что непосредственное применение метода симметричных составляющих в приведенной здесь форме невозможно. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что токи различных последовательностей оказываются связанными между собой через бесконечный спектр гармоник. Полный спектр гармоник токов в СМ возникает в результате несимметрии токов основной гармоники в фазах и несимметрии самой СМ.

В связи с указанными трудностями в практических расчетах обычно довольствуются лишь учетом основных гармоник токов и напряжений, что в большинстве случаев является приемлемым с точки зрения допустимой погрешности.

Если известны сопротивления электроустановки токам различных последовательностей, т.е. известны так называемые сопротивления  $\underline{Z}_1$  – прямой,  $\underline{Z}_0$  – нулевой,  $\underline{Z}_2$  – обратной последовательностей, то можно для точки несимметрии записать:

$$\Delta\dot{U}_0 = \underline{Z}_0\dot{I}_0; \quad \Delta\dot{U}_1 = \underline{Z}_1\dot{I}_1; \quad \Delta\dot{U}_2 = \underline{Z}_2\dot{I}_2. \quad (4.5)$$

При учете в (4.5) источников в уравнения следует ввести ЭДС соответствующих последовательностей. Известно, что в СМ возникают ЭДС всех последовательностей: обратной  $\dot{E}_2$  и нулевой  $\dot{E}_0$ , являющихся реакцией СМ на протекание в статоре токов нулевой  $\dot{I}_0$  и обратной  $\dot{I}_2$  последовательностей. Таким образом, ЭДС  $\dot{E}_0$  и  $\dot{E}_2$  удобнее учитывать в форме падения напряжения. При этом принято считать, что АРВ всех СМ реагируют только на основную гармонику, т.е. включены через фильтр прямой последовательности.

Итак, для режима с поперечной несимметрией можно записать:

$$\dot{U}_0 = 0 - \underline{Z}_{0\Sigma}\dot{I}_0; \quad \dot{U}_1 = \dot{E}_{1\Sigma} - \underline{Z}_{1\Sigma}\dot{I}_1; \quad \dot{U}_2 = 0 - \underline{Z}_{2\Sigma}\dot{I}_2, \quad (4.6)$$

где  $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$  и  $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$  – симметричные составляющие напряжений и токов в точке несимметрии;  $\dot{E}_{1\Sigma}$  – результирующая ЭДС прямой последовательности;  $\underline{Z}_{0\Sigma}, \underline{Z}_{1\Sigma}, \underline{Z}_{2\Sigma}$  – результирующие сопротивления нулевой, прямой и обратной последовательностей относительно точки несимметрии. При продольной несимметрии  $\dot{U}$  заменяется на  $\Delta\dot{U}$ .

Поскольку уравнения для различных последовательностей независимы друг от друга, то при определении ЭДС и эквивалентных сопротивлений можно составлять три схемы замещения для каждой из последовательностей в отдельности.

Уравнения для прямой последовательности содержат  $\dot{E}_{1\Sigma}$ , поэтому ток  $\dot{I}_1$  течет от источника ЭДС в точку несимметрии. Токи же  $\dot{I}_0$  и  $\dot{I}_2$  текут из точки несимметрии.

Анализ однофазного короткого замыкания с использованием граничных условий в месте несимметрии  $K^{(1)}$ . Правило эквивалентности тока прямой последовательности

Рассмотрим использование математического аппарата, предложенного в предыдущем параграфе, на примере однофазного металлического к.з. (рис. 4.2). Предполагается, что к.з. произошло в фазе  $A$ , так как общепринято фазу  $A$  всегда ставить в особые условия.

Запишем граничные условия:

$$\dot{i}_{кВ}^{(1)} = \dot{i}_{кС}^{(1)} = 0; \quad \dot{U}_{кА}^{(1)} = 0. \quad (4.7)$$

В точку к.з. ток протекает только из поврежденной фазы, а напряжения не равны нулю в фазах  $B$  и  $C$ . В соответствии с (4.1) и (4.7) для фазы  $A$ :

$$\dot{U}_{кА}^{(1)} = \dot{U}_0^{(1)} + \dot{U}_1^{(1)} + \dot{U}_2^{(1)}. \quad (4.8)$$

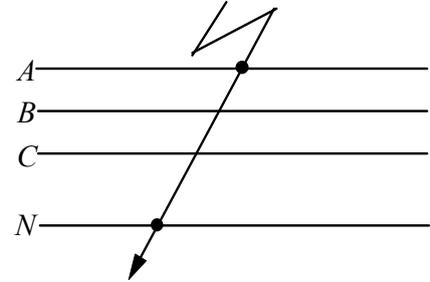


Рис. 4.2. Схема однофазного короткого замыкания на землю  $K^{(1)}$

Индекс  $k$  для симметричных составляющих будем опускать. Используя (4.3), получим еще одно условие:

$$\dot{i}_0^{(1)} = \dot{i}_1^{(1)} = \dot{i}_2^{(1)} = \frac{1}{3} \dot{i}_{кА}^{(1)}. \quad (4.9)$$

Далее, подставив вместо  $\dot{i}_0^{(1)}$  и  $\dot{i}_2^{(1)}$  ток  $\dot{i}_1^{(1)}$ , просуммируем отдельно левые и правые части уравнений Кирхгофа (4.6), получим

$$0 = \dot{E}_{1\Sigma}^{(1)} - \dot{i}_1^{(1)} (\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma}), \quad (4.10)$$

$$\dot{i}_1^{(1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}^{(1)}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{0\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma}} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}^{(1)}}{\underline{Z}_{1\Sigma} + \underline{Z}_{\Delta}^{(1)}}, \quad (4.11)$$

где  $\underline{Z}_{\Delta}^{(1)} = \underline{Z}_{0\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma}$ .

Ток в поврежденной фазе в месте к.з.:

$$\dot{i}_{кА}^{(1)} = 3\dot{i}_1^{(1)}. \quad (4.12)$$

Определим ток и напряжения других последовательностей по (4.6):

$$\begin{aligned} \dot{i}_2^{(1)} &= \dot{i}_0^{(1)} = \dot{i}_1^{(1)}; \\ \dot{U}_0^{(1)} &= -\underline{Z}_{0\Sigma} \dot{i}_1^{(1)} = -\underline{Z}_{0\Sigma} \dot{i}_0^{(1)}; \\ \dot{U}_1^{(1)} &= \dot{E}_{1\Sigma}^{(1)} - \underline{Z}_{1\Sigma} \dot{i}_1^{(1)} = \underline{Z}_{\Delta}^{(1)} \dot{i}_1^{(1)}; \\ \dot{U}_2^{(1)} &= -\underline{Z}_{2\Sigma} \dot{i}_1^{(1)} = -\underline{Z}_{2\Sigma} \dot{i}_2^{(1)}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Если в схеме ЭС преобладают реактивные сопротивления, то можно принять  $\underline{Z}_{1\Sigma} = jx_{1\Sigma}$ ;  $\underline{Z}_{2\Sigma} = jx_{2\Sigma}$ ;  $\underline{Z}_{0\Sigma} = jx_{0\Sigma}$ . Соответствующие изменения произойдут и в (4.11)–(4.13).

Построим для случая чисто индуктивной схемы векторные диаграммы (рис. 4.3). Чтобы получить напряжения в фазах, достаточно воспользоваться преобразованием (4.3).

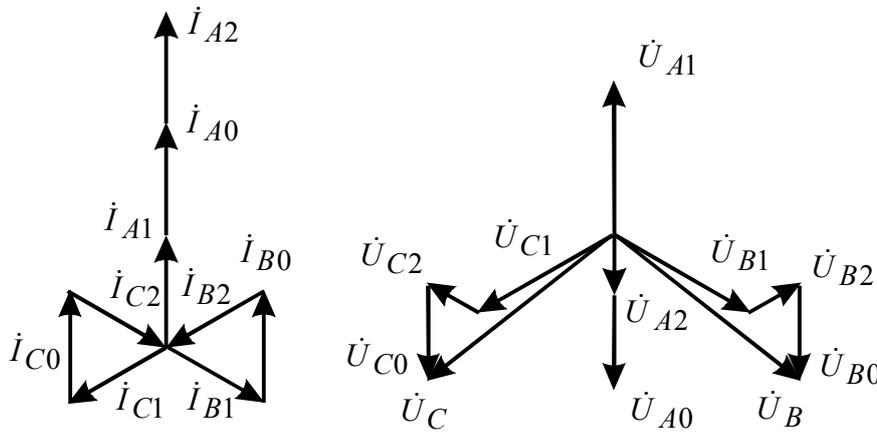


Рис. 4.3. Векторные диаграммы токов и напряжений при металлическом к.з.  $K^{(1)}$

Обратим внимание на выражение (4.11), которое отражает важнейшее свойство тока прямой последовательности.

**Правило эквивалентности тока прямой последовательности** заключается в том, что ток прямой последовательности для любого вида однократной несимметрии (продольной или поперечной) всегда определяется в соответствии с выражением (4.11). Другими словами, ток прямой последовательности любого несимметричного к.з. определяется так же, как ток трехфазного к.з., только удаленного по сравнению с  $K^{(3)}$  на сопротивление  $Z_{\Delta}^{(n)}$ .

При расчетах токов и напряжений в точке несимметрии для различных видов несимметрии ( $n$ ) величина  $\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$  определяется формулой, которая приведена ниже.

Вид несимметрии	$K^{(1)}$	$K^{(1.1)}$	$K^{(2)}$	$L^{(1)}$	$L^{(1.1)}$	$L^{(Z)}$
$\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$	$\underline{Z}_{0\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma}$	$(\underline{Z}_{0\Sigma}^{-1} + \underline{Z}_{2\Sigma}^{-1})^{-1}$	$\underline{Z}_{2\Sigma}$	$(\underline{Z}_{0\Sigma}^{-1} + \underline{Z}_{2\Sigma}^{-1})^{-1}$	$\underline{Z}_{0\Sigma} + \underline{Z}_{2\Sigma}$	$(\underline{Z}_{0\Sigma}^{-1} + \underline{Z}_{2\Sigma}^{-1} + 3\underline{Z}^{-1})^{-1}$

Здесь  $L^{(1)}$  и  $L^{(1.1)}$  – обрыв одной и двух фаз соответственно;  $L^{(Z)}$  – увеличение сопротивления в фазе на величину  $Z$ . Зная выражения для  $\underline{Z}_{\Delta}^{(n)}$  по (4.11), можно построить схемы соединения последовательностей (рис. 5.2 и 5.5), из которых легко получаются соотношения для вычисления остальных токов и напряжений симметричных составляющих.

Параметры и схемы замещения элементов электрических систем  
для обратной и нулевой последовательностей

Разделим условно элементы на три группы.

1. Элементы, у которых фазы не имеют электромагнитной связи между собой. В таком случае выполняется условие  $x_0 = x_1 = x_2$ ;  $r_0 = r_1 = r_2$ .

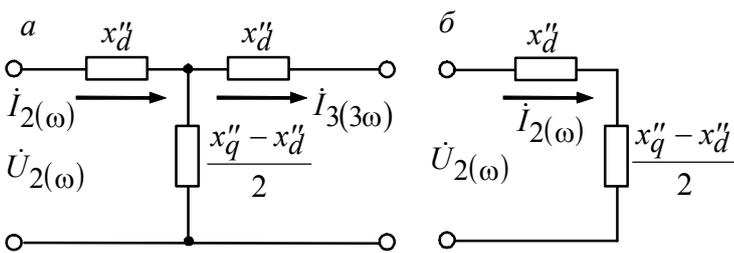
2. Элементы, имеющие электромагнитно связанные фазы, неподвижные относительно друг друга. В этом случае  $x_1 = x_2$ ,  $r_1 = r_2$ . Сопротивления нулевой последовательности могут значительно отличаться от сопротивлений прямой последовательности.

3. Элементы, с электромагнитно связанными между собой и перемещающимися относительно друг друга (коэффициенты связи – переменные величины) фазами. В этом случае сопротивления всех последовательностей различны.

Синхронные машины

Токи обратной последовательности потекут в обмотках СМ, если к зажимам подключить источник напряжения обратной последовательности. Магнитный поток, возникающий при этом, вызовет в статоре нечетные гармоники тока. Картина протекания тока обратного следования фаз будет определяться конкретным видом к.з., внешним сопротивлением и другими системными факторами. Иными словами, индуктивность обратной последовательности зависит от внешних условий работы. Рассмотрим несколько конкретных случаев.

1. Напряжение обратной последовательности подведено от источника бесконечной мощности. В СМ возникают высшие гармоники поля. Известно, что сопротивление  $x_2$  может быть определено из схемы замещения, соответствующей рис. 4.4, а, с учетом третьей гармоники следующим образом:



**Рис. 4.4. Схема замещения для определения  $x_2$  СМ при питании от источника бесконечной мощности**

$$x_2 = \frac{\dot{U}_2(\omega)}{\dot{I}_2(\omega)} = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''}. \quad (4.14)$$

2. Источник напряжения обратной последовательности расположен за дополнительным внешним сопротивлением  $x$ ; в таком случае сопротивление всей цепи составляет

$$x_{2\Sigma} = \frac{2(x_d'' + x)(x_q'' + x)}{x_d'' + x_q'' + 2x}. \quad (4.15)$$

На долю непосредственно СМ придется сопротивление

$$x_2 = x_{2\Sigma} - x = \frac{2x_d''x_q'' + x(x_d'' + x_q'')}{x_d'' + x_q'' + 2x}, \quad (4.16)$$

которое в явной форме зависит от внешних условий. В реальных ЭС достаточно часто встречается ситуация, когда СМ значительно удалены от точки к.з. Это значит, что приближенно можно считать  $x \rightarrow \infty$ :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x''_d x''_q + x(x''_d + x''_q)}{x''_d + x''_q + 2x} = \frac{x''_d + x''_q}{2}. \quad (4.17)$$

Последнее выражение соответствует схеме на рис. 4.4, б. Как видно, третья гармоника отсутствует.

3. Напряжение обратной последовательности подведено от источника конечной мощности. Следовательно, в статоре СМ будет присутствовать полный спектр нечетных гармоник поля. Схема замещения в этом случае будет бесконечной (рис. 4.5). Результирующее сопротивление схемы составит:

$$x_2 = \sqrt{x''_d \cdot x''_q}. \quad (4.18)$$

Если рассматривать СМ с симметричным ротором, т.е.  $x''_d = x''_q$ , то во всех вариантах получим  $x_2 = x''_d$ . При расчетах, проводимых без учета демпферных обмоток, в полученные формулы (4.18) следует подставить  $x'_d$  вместо  $x''_d$  и  $x_q$  вместо  $x''_q$ .

В практических расчетах для СМ без демпферных обмоток рекомендуется принимать  $x_2 = 1,45 x'_d$ , для СМ с демпферными обмотками  $x_2 = 1,22 x''_d$ . Если к.з. удалено от СМ, т.е.  $x \neq 0$ , можно принимать  $x_2 = x''_d$ .

Токи нулевой последовательности потекут в СМ только в том случае, если заземлена нейтраль. При протекании по обмоткам статора СМ с заземленной

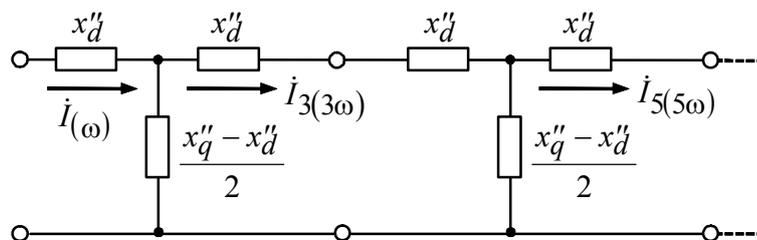


Рис. 4.5. Схема замещения для определения  $x_2$  СМ при наличии источника бесконечной мощности

нейтралью токи нулевой последовательности создают одинаковые по величине и совпадающие во времени магнитные потоки. Поскольку фазные обмотки статора сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ , результирующий поток в рашотке машины можно

считать равным нулю. Значит, сопротивление нулевой последовательности СМ определяется лишь полями рассеяния, которые зависят от конструктивных особенностей обмоток, и колеблется в широких пределах:

$$x_0 = (0,19 \dots 0,6) x''_d. \quad (4.19)$$

Предположим, что в нормальном режиме асинхронный двигатель (АД) работает со скольжением  $s_H$ . По отношению к магнитному потоку обратного следования фаз этот режим будет характеризоваться скольжением  $s = 2 - s_H$ . Следовательно, сопротивление  $x_2$  для АД можно определить как сопротивление при  $s = 2 - s_H$ .

Зависимость, изображенная на рис. 4.6, иллюстрирует примерный характер изменения относительного сопротивления АД в функции скольжения.

С увеличением  $s$  сопротивление вначале резко уменьшается, а затем остается практически неизменным. Отмеченное свойство позволяет с достаточной степенью точности считать, что  $x_{0(s=1)} \approx x_{0(s=2-s_H)}$ . Следовательно, сопротивление обратной последовательности равно пусковому сопротивлению АД:

$$x_2 = x_{0(s=1)} = x_k = U_H / I_{\text{пуск}} \quad (4.20)$$

Реактивное сопротивление АД нулевой последовательности определяется конструкцией обмоток. Поэтому для различных двигателей, как и для СМ, величины  $x_0$  резко различаются. Численное значение параметра либо берется по паспортным данным, либо получается экспериментальным путем.

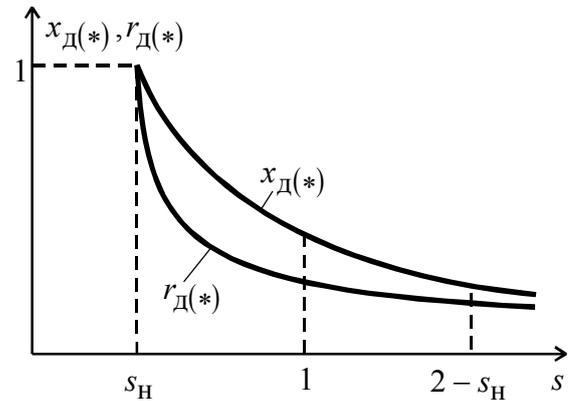


Рис. 4.6. Относительное изменение сопротивлений АД

#### Обобщенная нагрузка

Крупные узлы нагрузки ЭС обычно содержат большой перечень различных видов потребителей, поэтому сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от структуры приемников электроэнергии, их характеристик в конкретном узле.

В упрощенных практических расчетах рекомендуется использовать следующие данные:

- для узлов с напряжением  $U_H = 6 - 10$  кВ  $z_{2(*)} = 0,18 + j0,24$ ;
- для узлов с напряжением  $U_H = 35$  кВ  $z_{2(*)} = 0,14 + j0,36$ .

Если активные сопротивления в расчете не учитываются, то  $x_{2(*)} = 0,35$  и  $x_{2(*)} = 0,45$  соответственно напряжению.

Сопротивление нулевой последовательности обобщенной нагрузки в первую очередь определяется трансформаторами. Схемы соединения их обмоток обычно таковы, что токи нулевой последовательности в нагрузку не попадают.

Обмотки трансформаторов имеют электромагнитную связь, но все контуры неподвижны. Следовательно, для этих элементов выполняются условия  $x_2 = x_1$  и  $r_2 = r_1$ .

Сопроотивления нулевой последовательности зависят, в первую очередь, от схем соединения обмоток трансформатора. Возможно несколько вариантов:

1. Первичная обмотка соединена по схеме «звезда» с заземленной нейтралью, вторичная – по схеме «треугольник».

Предположим, что несимметрия возникла с первичной стороны (рис. 4.7, а). Магнитные оси первичных фазных обмоток, соединенные «звездой», не имеют пространственного сдвига, поэтому три тока (также не сдвинутые в пространстве относительно друг друга) протекают по всем трем фазам в нейтраль, где они суммируются. При этом забираемая трансформатором мощность расходуется на намагничивание ( $x_{\mu_0}$ ) и передается во вторичную обмотку. Поскольку вторичные фазные обмотки соединены по схеме «треугольник», их магнитные оси сдвинуты в пространстве на угол  $120^\circ$ , следовательно, и токи, индуцируемые в обмотке II, оказываются сдвинутыми на тот же угол. Замыкаясь по треугольнику, равные по величине токи в сумме дают ноль. Это условие в однолинейной схеме замещения аналогично закорачиванию сопротивления  $x_{II}$

(рис. 4.7, б). В остальную часть схемы токи из треугольника не вытекают.

Следует добавить, что в обмотке I токи будут протекать только при выполнении двух условий: во-первых, цепь для  $\dot{I}_{I_0}$  должна быть замкнута через заземленную нейтраль; во-вторых, должны протекать токи либо по обмотке II, либо в цепи намагничивания (через  $x_{\mu_0}$ ).

Рассмотрим прежнюю схему соединения, но возьмем точку несимметрии со стороны обмотки II (рис. 4.8). Так как напряжения, приложенные к зажимам обмоток II, совпадают по величине и фазе, токи в обмотках не потекут. Следовательно, трансформатор в этом случае обладает бесконечно большим сопротивлением.

Вернемся к первоначальной схеме соединения обмоток и заземлим нейтраль через реактор (рис. 4.9, а). В нейтрали протекает ток  $\dot{I}_N = 3\dot{I}_{I_0}$ . Для того чтобы учесть этот факт, в однолинейную схему замещения вводится сопротивление реактора  $3x_p$  (рис. 4.9, б) и сопротивление нулевой последовательности равно

$$x_0 = x_1 + 3x_p + \left( \frac{1}{x_{II}} + \frac{1}{x_{\mu_0}} \right)^{-1}.$$

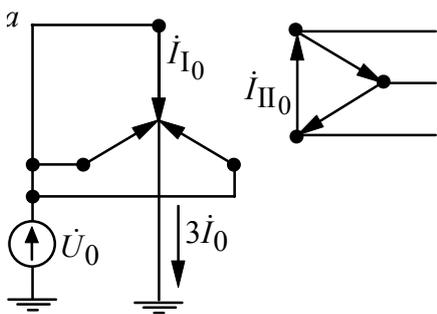


Рис. 4.7. Схемы соединения обмоток трансформатора «звезда-треугольник» (а) и схема замещения при несимметрии со стороны первичной обмотки (б)

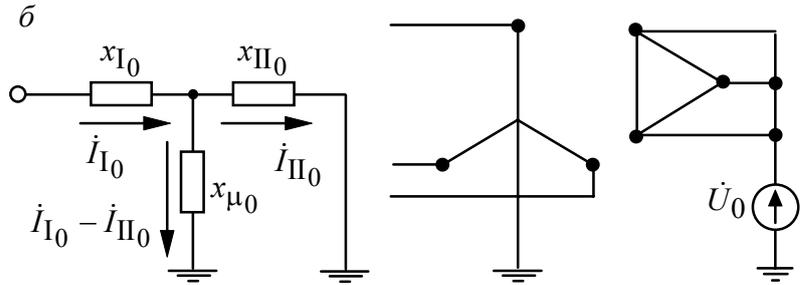


Рис. 4.8. Схема соединения обмоток при несимметрии со стороны вторичной обмотки

2. Первичная и вторичная обмотки соединены по схеме «звезда»–«звезда» с заземленными нейтральями. Предположим, что несимметрия возникла со стороны обмотки I (рис. 4.10). Ток  $\dot{I}_{II0}$  будет протекать только в том случае, если обеспечены соответствующие условия в остальной части ЭС, т.е.  $x_{0C} \neq \infty$ . В противном случае схема замещения разрывается в точке *A*.

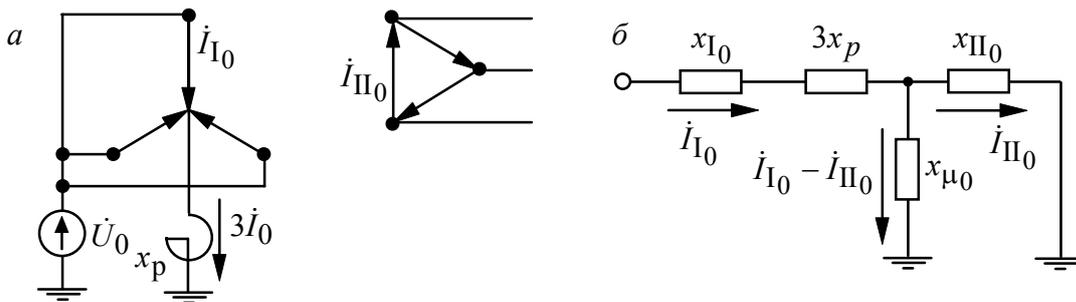


Рис. 4.9. Схемы соединения обмоток (а) и замещения (б) трансформатора при заземлении нейтрали через реактор

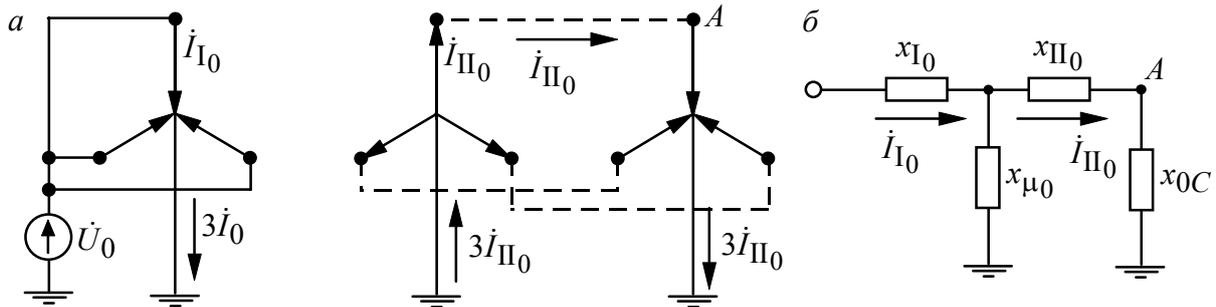


Рис. 4.10. Схемы соединения обмоток «звезда»–«звезда» (а) и замещения (б) трансформатора

Коренное отличие автотрансформаторов от трансформаторов в наличии электрической связи между первичной и вторичной обмотками. Выпускаются автотрансформаторы с тремя обмотками, причем нейтраль первичной и вторичной обмоток глухо заземлена, а обмотка III соединена по схеме «треугольник» (рис. 4.11, а). Схема замещения будет такой же, как у трехобмоточного трансформатора (рис. 4.11, б), однако ток в нейтрали

$\dot{I}_N = 3(\dot{I}_{I_0} - \dot{I}_{II_0})$  и токи  $\dot{I}_{I_0}$ ,  $\dot{I}_{II_0}$  вычисляются каждый на своей ступени напряжения.

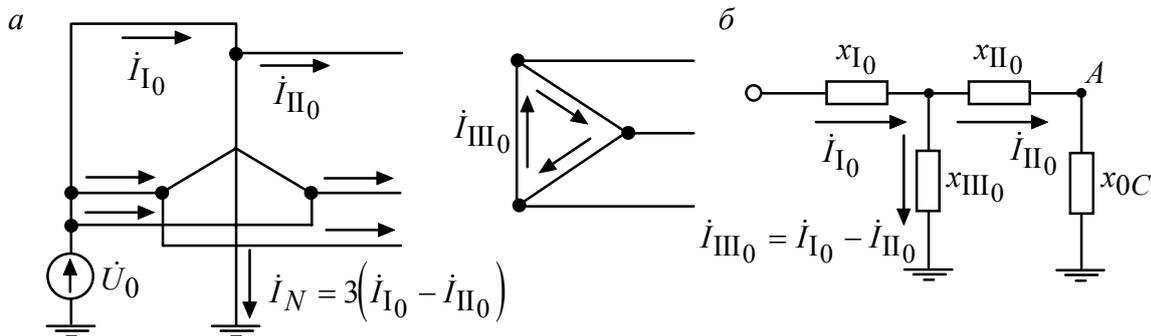


Рис. 4.11. Схемы соединения обмоток (а) и замещения (б) автотрансформатора

### Воздушные линии электропередачи

Воздушные линии (ВЛ) – элементы с постоянными коэффициентами связи, т.е.  $z_2 = z_1$ .

Сопротивление нулевой последовательности ВЛ зависит от пути протекания тока нулевой последовательности. Поскольку три вектора тока в фазах совпадают по величине и направлению, то для их замыкания нужен еще один проводник – четвертый. Таковым служат все попутные проводники: земля, рельсы, тросы и т.п. Из-за отсутствия фазового сдвига между названными векторами оказывается значительным влияние на сопротивление нулевой последовательности взаимоиндукции соседних фаз и параллельных цепей.

Рассмотрим влияние названных факторов, предположив, что размеры участка земли, где протекает ток, не ограничены и электрическая проводимость земли постоянна.

Учет влияния земли основан на том, что распределение тока в земле подчиняется закону, аналогичному закону растекания тока в массивных

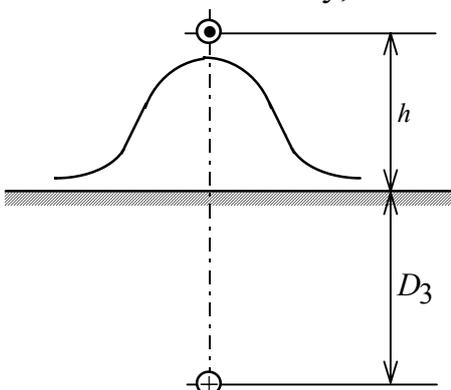


Рис. 4.12. Однопроводная линия «провод-земля»

проводниках. Представим однопроводную линию переменного тока с обратным проводом в виде земли (рис. 4.12). Индуктивность такой линии может быть определена как индуктивность некоторой двухпроводной линии с расстоянием пролегания второго провода  $D_3$ . Это расстояние носит название эквивалентной глубины возврата тока через землю и определяется по формуле

$$D_3 = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \lambda \cdot 10^{-7}}}, \quad (4.21)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $\lambda$  – удельная проводимость земли,  $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ .

Величина  $D_3$  колеблется в пределах от 90 (сухая земля) до 3000 м (морская вода). Для зоны Урала  $D_3 = 935$  м. Поскольку  $h \ll D_3$ , то  $D_3$  обычно не

учитывается. Индуктивное сопротивление такой линии можно вычислить по формуле

$$x_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{R_3}, \quad (4.22)$$

где  $R_3$  – эквивалентный радиус провода, зависит от конструкции, материала и т.п., лежит в пределах 0,8–0,95 от истинного радиуса  $R$ .

Если ВЛ с расщепленными проводами, то вводится среднегеометрический радиус

$$\rho_{\text{ср}} = \sqrt[n]{R_3 a_{\text{ср}}^{n-1}}, \quad (4.23)$$

где  $n$  – коэффициент расщепления;  $a_{\text{ср}}$  – среднегеометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Активное сопротивление  $r$  зависит не только от сопротивления провода  $r_{\text{п}}$ , но и от активного сопротивления земли  $r_3$ :  $r = r_{\text{п}} + r_3$ .

Сопротивление земли определяется по величине потерь активной мощности в земле. Из приближенного выражения (4.24) при  $f = 50$  Гц:

$$r_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4} = 0,05 \text{ Ом/км} \quad (4.24)$$

следует, что активное сопротивление земли зависит от частоты переменного тока, но не зависит от проводимости. Это объясняется тем, что с изменением проводимости меняется и плотность тока, а активные потери остаются практически постоянными.

Степень влияния фаз друг на друга для трехфазной линии с полным циклом транспозиции проводов учитывается сопротивлением взаимной индукции. Это сопротивление определяется между фазами при возврате тока через землю в соответствии с выражением

$$z_M = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}}, \quad (4.25)$$

где  $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{AB} d_{BC} d_{CA}}$  – среднегеометрическое расстояние между проводами;  $d_{AB}, d_{BC}, d_{CA}$  – истинные расстояния между проводами.

Если токи нулевой последовательности во всех трех фазах совпадают, то полное сопротивление трехфазной ВЛ

$$z_0 = z_L + z_M + z_M = r_{\text{п}} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{D_{\text{ср}}^2 R_3}}. \quad (4.26)$$

Известно, что сопротивление ВЛ току прямой последовательности

$$z_1 = r_{\text{п}} + j0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{R_3}. \quad (4.27)$$

Сравнивая (4.26) и (4.27), легко сделать вывод, что сопротивление нулевой последовательности ВЛ всегда превосходит сопротивление прямой последовательности.

Учет влияния параллельных цепей, по всей видимости, еще увеличит сопротивление нулевой последовательности ВЛ.

Рассмотрим двухцепную ВЛ, у которой обе цепи подключены к общим шинам (рис. 4.13).

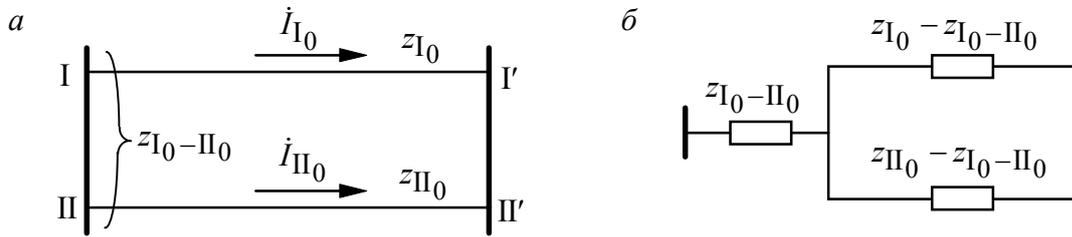


Рис. 4.13. Двухцепная ВЛ (а) и ее схема замещения (б)

Параметры схемы замещения вычисляются следующим образом:

$$z_{I_0-II_0} = 3 \cdot \left( 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{I-II_{cp}}} \right); \quad (4.28)$$

$$D_{I-II_{cp}} = \sqrt[9]{d_{AA}d_{AB}d_{AC}d_{BA}d_{BB}d_{BC}d_{CA}d_{CB}d_{CC}}.$$

Здесь  $D_{I-II_{cp}}$  – среднегеометрическое расстояние между фазами;  $d_{AA}, \dots, d_{CC}$  – действительное расстояние между фазами.

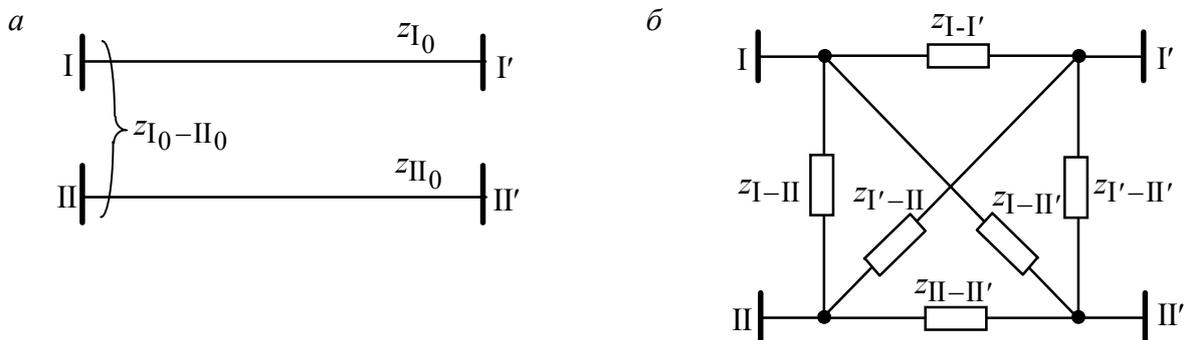


Рис. 4.14. Двухцепная ВЛ (а) и ее схема замещения (б) при подключении цепей к различным шинам

Эту же схему замещения можно использовать, если к одним шинам подключен только один конец цепей. Если оба конца подключены к разным шинам, приходится использовать схему замещения в виде четырехугольника (рис. 4.14) с параметрами

$$z_{ij} = f(z_{I_0}, z_{II_0}, z_{I_0-II_0}).$$

Выражения в явной форме для вычисления параметров можно получить, записав уравнения Кирхгофа через параметры  $z_{ij}$ ,  $z_{I_0}$ ,  $z_{II_0}$ ,  $z_{I_0-II_0}$  и разрешив полученную систему уравнений относительно  $z_{ij}$ .

Учет влияния тросов возможен по методике, подобной методике учета параллельных цепей. Тросы используются как средства грозозащиты и поэтому должны обеспечивать замкнутый контур для волны перенапряжений. В связи с

этим тросы либо заземляются на каждой опоре, либо их подвешивают на изоляторах и заземляют с одной стороны. С другой стороны трос подключается к земле через разрядник.

Если грозозащитный трос ВЛ заземлен, то в несимметричном режиме по нему потечет ток, равный  $I_T = 3I_{T0}$ , в соответствии со схемой на рис. 4.15. Если подсчитать эквивалентное сопротивление для нулевой последовательности, то получим:

$$z_0^{п-т} = z_{л0} - z_{пт0} + \frac{z_{пт0}(z_{т0} - z_{пт0})}{z_{т0}} = z_{л0} - \frac{z_{пт0}^2}{z_{т0}}. \quad (4.29)$$

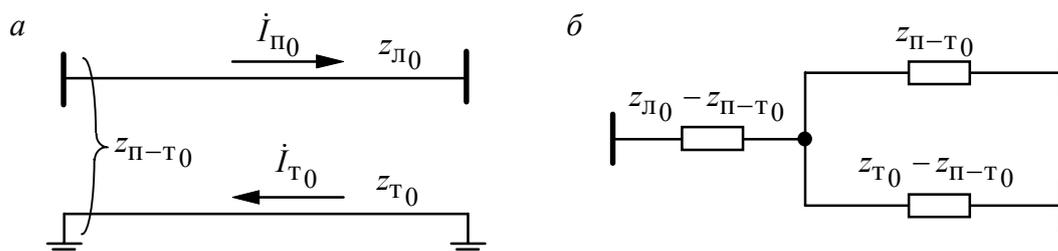


Рис. 4.15. Одноцепная линия с заземленным тросом (а) и ее схема замещения (б)

Из выражения (4.29) следует, что наличие заземленного троса снижает сопротивление нулевой последовательности ВЛ. Величина влияния зависит от типа троса: стальной, плохо проводящий, хорошо проводящий.

Для упрощенных практических расчетов можно использовать коэффициент  $k = \frac{x_0}{x_1}$ , приближенные значения которого следующие:

одноцепная линия без троса .....	3,5;
то же, но со стальным тросом .....	3,0;
то же, но с хорошо проводящим тросом .....	2,0;
двухцепная линия без троса .....	5,5;
то же, но со стальным тросом .....	4,2;
то же, но с хорошо проводящим тросом .....	3,0.

#### Кабельные линии

Так же как для ВЛ,  $z_1 = z_2$ . Интерес представляет только сопротивление нулевой последовательности. Кабельные линии (КЛ) прокладывают на небольшой глубине, поэтому при определении параметров можно использовать те же принципы, что и для ВЛ. Оболочка кабеля, как правило, заземлена по его концам и в ряде промежуточных точек. В этом смысле влияние оболочки кабеля напоминает влияние троса. Однако распределение тока между оболочкой и землей зависит от таких условий, как качество прокладки кабеля, сопротивления заземлений, параметры оболочки кабеля и т.п., поэтому получение достоверного значения сопротивления нулевой последовательности достаточно затруднено. В ориентировочных практических расчетах можно принять  $r_0 = 10 r_1$  и  $x_0 \approx (3,5 \dots 4,6) x_1$ .

### Схемы замещения различных последовательностей

Для того чтобы рассчитать несимметричный режим ЭС, нужно знать параметры, которые определяются из схем замещения соответствующих последовательностей.

#### Схемы замещения прямой и обратной последовательностей

Схема замещения прямой последовательности, а также схемы замещения генераторных и нагрузочных узлов, те же, что и при симметричном трехфазном к.з.

Пути протекания токов обратной последовательности аналогичны путям протекания прямой, поэтому структурно схема замещения обратной последовательности повторяет схему замещения прямой последовательности. Исключение составляют генераторные и нагрузочные узлы, сопротивления которых считаются постоянными по величине. ЭДС обратной последовательности всех генераторных узлов условно считаются равными нулю. Началом обеих схем замещения считается точка нулевого потенциала, которая объединяет свободные концы генераторных и нагрузочных ветвей. Конец схемы – точка несимметрии, причем при продольной несимметрии имеется две точки конца. Поскольку в точке несимметрии в переходном режиме имеется остаточное напряжение, которое можно разложить на симметричные составляющие, то в точках конца подключаются напряжения  $\dot{U}_1$  или  $\dot{U}_2$  для поперечной несимметрии и  $\Delta\dot{U}_1$  или  $\Delta\dot{U}_2$  для продольной.

#### Схема замещения нулевой последовательности

В силу особенности протекания токов нулевой последовательности схема замещения нулевой последовательности существенно отличается от схемы замещения прямой последовательности. Различие, в первую очередь, определяется схемами замещения ВЛ и трансформаторов. Параметры всех элементов считаются постоянными, ЭДС нулевой последовательности принимается равной нулю. В точку несимметрии подключается  $\dot{U}_0$  или  $\Delta\dot{U}_0$ , в зависимости от вида несимметрии.

Составление схемы нулевой последовательности начинается от точки несимметрии по тем путям, где протекание токов возможно, т.е. учитываются ветви, где имеется хотя бы одна заземленная нейтраль. В случае продольной несимметрии протекание токов нулевой последовательности возможно не только по нейтралям, но и по контурам, параллельным источнику  $\Delta\dot{U}_0$ .

Началом схемы считается точка нулевого потенциала, концом – точка несимметрии. Если продольная несимметрия возникла в сети с изолированными нейтралями, то понятие «начало схемы» теряет смысл, поскольку точка нулевого потенциала будет перемещаться в зависимости от режима.

**Пример 4.1.** Для ЭС, схема которой изображена на рис. 4.16, составить схемы замещения и получить результирующие ЭДС и сопротивления

для прямой, обратной и нулевой последовательностей при возникновении поперечной несимметрии в точке  $M$ .

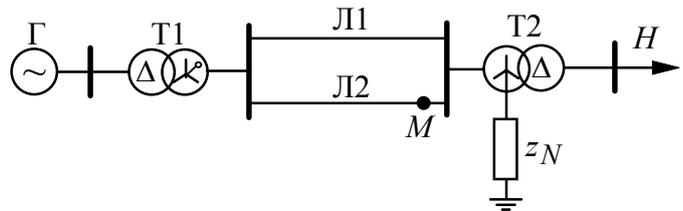


Рис. 4.16. Схема электрической сети

*Решение.* Используя схемы замещения отдельных элементов, построим схему замещения прямой последовательности (рис. 4.17). В общем случае  $E_{\Gamma}(t)$  и  $x_{\Gamma}(t)$  – функции времени. Для момента времени  $t = 0$   $E_{\Gamma} = E_{\Gamma}''$ ,  $x_{\Gamma} = x_{\Gamma}''$ . Точкой  $H1$  обозначено начало схемы,  $K1$  – конец схемы. После преобразования получим эквивалентное сопротивление и эквивалентную ЭДС в соответствии с рис. 4.17, б.

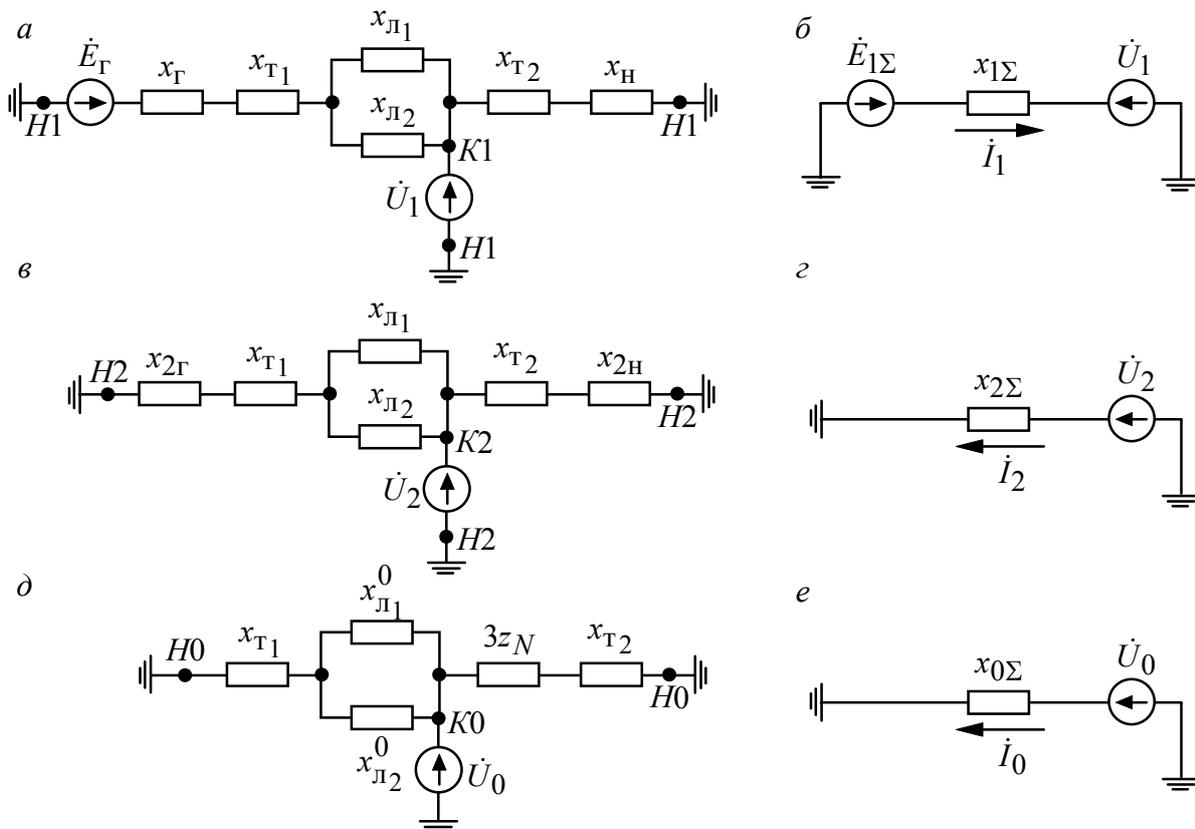


Рис. 4.17. Схемы замещения прямой (а, б), обратной (в, г) и нулевой (д, е) последовательностей при поперечной несимметрии

$$x_{1\Sigma} = \left[ \left( x_{T2} + x_H \right)^{-1} + \left( x_{\Gamma} + x_{T1} + \left( \frac{1}{x_{L1}} + \frac{1}{x_{L2}} \right)^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (4.30)$$

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \frac{\dot{E}_{\Gamma} x_{1\Sigma}}{x_{\Gamma} + x_{T1} + \left( \frac{1}{x_{L1}} + \frac{1}{x_{L2}} \right)^{-1}} + \frac{0 \cdot x_{1\Sigma}}{x_{T2} + x_H}. \quad (4.31)$$

Составим схему замещения обратной последовательности с учетом того, что генератор и нагрузка заместятся сопротивлениями  $x_{2Г}$  и  $x_{2Н}$  (рис. 4.17). Если генератор достаточно далеко от точки к.з., то отличаем  $x_{2Г}$  от  $x_{Г}''$  можно пренебречь. В результате преобразования получим эквивалентные величины (рис. 4.17, з):

$$x_{2\Sigma} = \left[ \left( x_{Г2} + x_{Н2} \right)^{-1} + \left( x_{2Г} + x_{Т1} + \left( \frac{1}{x_{Л1}} + \frac{1}{x_{Л2}} \right)^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (4.32)$$

Схема замещения нулевой последовательности изображена на рис. 4.17, д, ее эквивалент – на рис. 4.17, е. В результате имеем

$$x_{0\Sigma} = \left[ \left( x_{Т1} + \frac{x_{Л1}^0 \cdot x_{Л2}^0}{x_{Л1}^0 + x_{Л2}^0} \right)^{-1} + \left( 3z_N + x_{Г2} \right)^{-1} \right]^{-1}. \quad (4.33)$$

Предположим, что в точке  $M$  возникла продольная несимметрия. Схема замещения прямой последовательности для этого случая изображена на рис. 4.18, а. Для удобства преобразуем схему в форму, как на рис. 4.18, б, а затем получим эквивалент (рис. 4.18, в) с параметрами

$$x_{1\Sigma} = x_{Л2} + \left[ \frac{1}{x_{Л1}} + \left( x_{Г2} + x_{Н} + x_{Г} + x_{Т1} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (4.34)$$

$$\dot{E}_{1\Sigma} = \frac{\dot{E}_{Г} x_{Л1}}{x_{Г2} + x_{Н} + x_{Г} + x_{Т1} + x_{Л1}}.$$

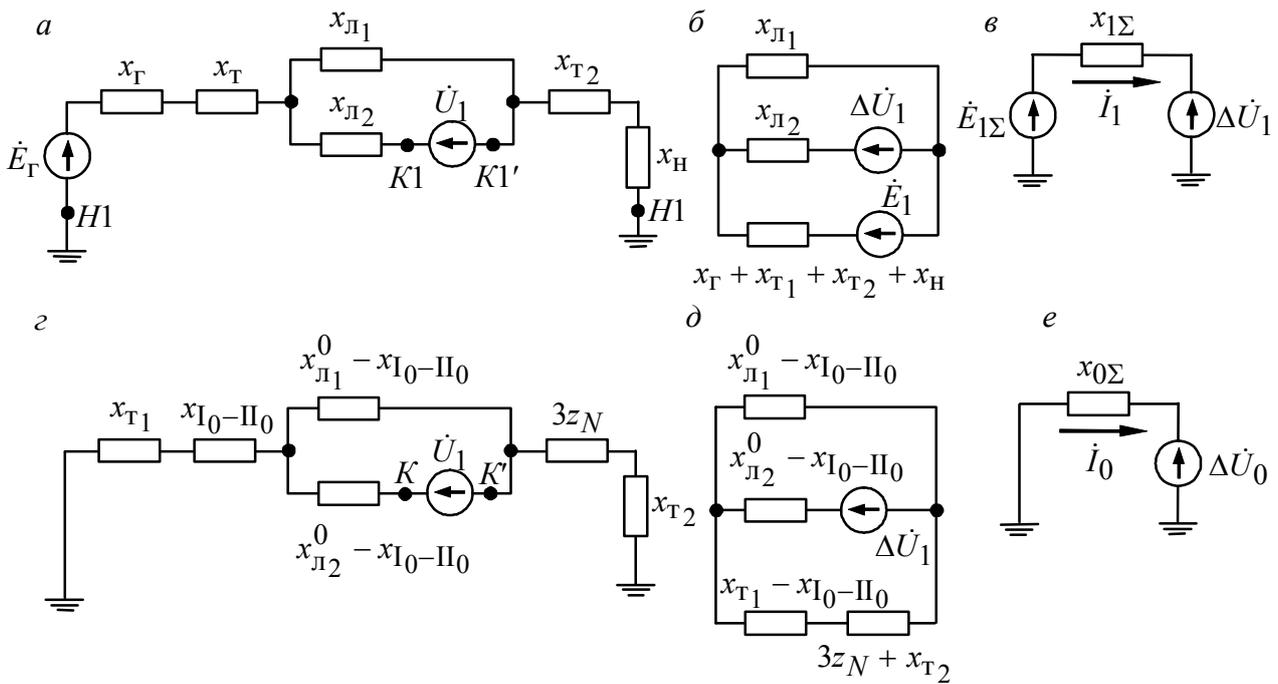


Рис. 4.18. Схемы замещения прямой (а, б, в) и нулевой (г, д, е) последовательности при продольной несимметрии

Для обратной последовательности предположим, что  $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma}$ . Схема нулевой последовательности приведена на рис. 4.18, г. Как видно, отличие от случая поперечной несимметрии заключается в применении трехэлементной схемы замещения ВЛ. Используя известный прием, можно получить промежуточную схему (рис. 4.18, д) и эквивалент (рис. 4.18, е):

$$x_{0\Sigma} = x_{L2}^0 - x_{I-II}^0 + \left( \left( x_{L1}^0 - x_{I-II}^0 \right)^{-1} + \left( x_{T1} + x_{II-I}^0 + 3z_N + x_{T2} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (4.35)$$

Из схемы (рис. 4.18, д) следует, что даже при разомкнутых нейтралях трансформаторов путь для тока нулевой последовательности сохранится через параллельную цепь ВЛ.

### Вопросы для самопроверки

1. Основные соотношения между фазными величинами и симметричными составляющими.
2. Соотношение между симметричными составляющими токов и напряжений в точке несимметрии.
3. Правило эквивалентности тока прямой последовательности.
4. Причины, определяющие различие сопротивлений элементов ЭС токам обратной и нулевой последовательностей по сравнению с прямой последовательностью.
5. Параметры обратной последовательности СМ.
6. Схемы замещения нулевой последовательности трансформаторов.
7. Параметры и схемы замещения нулевой последовательности ЛЭП.
8. Порядок составления схем различных последовательностей.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОДНОКРАТНОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ

В практических расчетах несимметричных режимов используются те же допущения, что и при анализе симметричного трехфазного к.з. Составляются схемы замещения последовательностей, на основании которых вычисляются эквивалентные параметры. Далее на основе правила эквивалентности прямой последовательности рассчитывается ток прямой последовательности (4.11) для начального момента времени  $t = 0$ . Определение апериодической составляющей тока к.з. производится по аналогии с  $K^{(3)}$ , но зависит от вида несимметрии, а активные и реактивные сопротивления определяются по формулам

$$\begin{aligned}x_{\Sigma}^{(n)} &= x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}, \\r_{\Sigma}^{(n)} &= r_{1\Sigma} + r_{\Delta}^{(n)}.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Определение токов и напряжений других последовательностей осуществляется по формулам, получаемым из универсальной схемы соединения последовательностей. Поскольку напряжения при несимметричном к.з. в узлах ЭС выше, чем при  $K^{(3)}$ , уровень подпитки нагрузкой снижается, поэтому желательно учитывать только нагрузку, подключенную к точке к.з.

Учет изменения во времени тока несимметричного к.з.

Известно, что ток прямой последовательности в точке к.з. определяется точно так же, как ток трехфазного к.з., но за дополнительным сопротивлением  $z_{\Delta}$ . Это сопротивление вычисляется путем параллельно-последовательного включения эквивалентных сопротивлений обратной  $z_{2\Sigma}$  и нулевой  $z_{0\Sigma}$  последовательностей исследуемой ЭС. Таким образом, сопротивление  $z_{\Delta}$  остается неизменным во времени, а закон изменения тока прямой последовательности полностью определяется функциями  $z_{1\Sigma}(t)$  и  $E_{1\Sigma}(t)$ , как при  $K^{(3)}$ . Следовательно, методы, применимые к расчету изменения тока  $I_K^{(3)}$  во времени, применимы к расчету  $I_{K1}^{(n)}$ . Таким образом, для расчета изменения во времени тока прямой последовательности можно пользоваться типовыми кривыми.

Токи и напряжения остальных последовательностей определяются из уже известных соотношений для любого момента времени как функции тока прямой последовательности (4.13). Зная симметричные составляющие, легко вычислить токи и напряжения в фазах.

Распределение токов и напряжений по элементам ЭС

Для того чтобы определить величины токов в ветвях и напряжений в узлах ЭС в несимметричном режиме, нужно знать соответствующие им симметричные составляющие, т.е. получить распределение токов и напряжений в схемах соответствующих симметричных составляющих. Поскольку токи и

напряжения в точке несимметрии вычисляются достаточно просто, то для момента времени  $t = 0$  распределение токов и напряжений может быть получено обычным образом, т.к. параметры схем последовательностей известны. Таким же путем получается распределение в произвольный момент времени для токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей. В данном случае можно строго использовать метод коэффициентов токораспределения.

Сложнее обстоит дело с прямой последовательностью, так как она содержит переменные во времени ЭДС и сопротивления. В этом случае поступают так же, как и при трехфазном к.з., т.е. используют расчетные кривые 1975 г.

Рассчитывая фазные величины, следует также иметь в виду, что при трансформации симметричные составляющие последовательностей поворачиваются на различные углы, зависящие от схем соединения трансформаторов. Другими словами, необходимо учитывать комплексные коэффициенты трансформации для токов

$$k_1 = ke^{-j30N}, \quad k_2 = ke^{j30N}, \quad (5.2)$$

где  $k_1$  – для прямой последовательности;  $k_2$  – для обратной последовательности;  $N$  – группа соединений;  $k$  – модуль коэффициента трансформации.

Сравнение различных видов к.з.

Предположим, что короткие замыкания различных видов происходят поочередно в одной и той же точке ЭС и при одинаковых начальных условиях. Тогда на основании анализа универсальной схемы соединения последовательностей и табл. 5.1 можно записать

$$z_{\Delta}^{(3)} < z_{\Delta}^{(1.1)} < z_{\Delta}^{(2)} < z_{\Delta}^{(1)}, \quad \dot{I}_1^{(3)} > \dot{I}_1^{(1.1)} > \dot{I}_1^{(2)} > \dot{I}_1^{(1)}. \quad (5.3)$$

Следовательно, 
$$\dot{U}_1^{(3)} < \dot{U}_1^{(1.1)} < \dot{U}_1^{(2)} < \dot{U}_1^{(1)}. \quad (5.4)$$

**Т а б л и ц а 5 . 1**

Сравнение величин  $z_{\Delta}^{(n)}$  и  $m^{(n)}$  при различных видах к.з.

В и д к . з .	$z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
$K^{(1)}$	$z_{0\Sigma} + z_{2\Sigma}$	3
$K^{(2)}$	$z_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
$K^{(1.1)}$	$\left( \frac{1}{z_{0\Sigma}} + \frac{1}{z_{2\Sigma}} \right)^{-1}$	$a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$K^{(3)}$	0	1

Постоянные времени затухания апериодической составляющей тока к.з. от генератора с демпферными обмотками связаны выражением

$$T'_d = T_f \cdot \frac{x'_{d\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}{x_{d\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (5.5)$$

откуда вытекают неравенства

$$T'_d{}^{(1)} > T'_d{}^{(2)} > T'_d{}^{(1.1)} > T'_d{}^{(3)}. \quad (5.6)$$

Следовательно, апериодическая составляющая наиболее быстро затухает при трехфазном к.з.

Как известно, увеличение внешнего сопротивления  $x_{\Delta}^{(n)}$  приводит к замедлению работы АРВ у СМ. Однако в несимметричных режимах снижение напряжения меньше, чем при  $K^{(3)}$ , за счет  $z_{\Delta}^{(n)}$ . В результате процесс восстановления

напряжения происходит быстрее, чем при  $K^{(3)}$ . Таким образом, чем больше дополнительная индуктивность  $x_{\Delta}^{(n)}$ , тем медленнее протекает переходный процесс в СМ, но быстрее наступает нормальный режим по напряжению.

Введем коэффициент  $m^{(n)}$ , определяемый через соотношение токов  $m^{(n)} = \left| \dot{I}_K^{(n)} \right| / \left| \dot{I}_{K1}^{(n)} \right|$ . Для различных видов к.з. его значения сведены в табл. 5.1. На основании имеющихся данных попробуем оценить диапазон изменения токов различных к.з. по отношению к  $K^{(3)}$ . Введем

$$K_{(n-3)} = \frac{\dot{I}_K^{(n)}}{\dot{I}_K^{(3)}} = m^{(n)} \cdot \frac{\dot{I}_{K1}^{(n)}}{\dot{I}_K^{(3)}} = m^{(n)} \cdot \frac{1}{1 + z_{\Delta}^{(n)} / z_{1\Sigma}}. \quad (5.7)$$

Предположим, что возникло металлическое к.з.  $K^{(1)}$  на зажимах СМ с заземленной нейтралью. Сопротивление  $z_{0\Sigma}$  в этом случае пренебрежимо мало, а соотношение между  $z_{1\Sigma}$  и  $z_{2\Sigma}$  зависит от текущего  $t$ . Если принять  $t = 0$ , то  $x_{2\Sigma} \approx x_d''$ ,  $x_{2\Sigma} / x_{1\Sigma} = 1$ , т.е.  $K_{(1-3)} = 3/2$ . Если принять  $t = \infty$ , то  $x_{2\Sigma} \approx x_d''$ ,  $x_{1\Sigma} \approx x_d$ ,  $x_{2\Sigma} / x_{1\Sigma} \approx 0$  и  $K_{(1-3)} = 3$ . В случае изолированной нейтрали –  $K_{(1-3)} = 0$ .

Отдалим к.з., тогда  $x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$  и  $K_{(1-3)} = \frac{3}{2 + x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma}}$ . Характер изменения коэффициента  $K_{(1-3)}$  при увеличении соотношения  $x_{0\Sigma} / x_{1\Sigma}$  приведен на рис. 5.1.

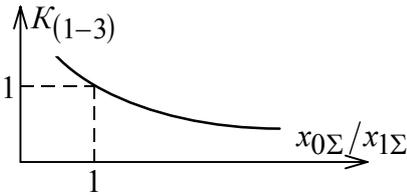


Рис. 5.1. Характер изменения соотношения  $K_{(1-3)}$

Рассмотрим двухфазное к.з. на землю. При этом

$$K_{(1.1-3)} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} + \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) x_{1\Sigma}}}. \quad (5.8)$$

Предположим, что к.з. отдалено. Если  $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$ , то  $K_{(1-3)} = \sqrt{3}$ . При изменении  $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$   $K_{(1.1-3)} = \sqrt{3}/2$ , следовательно, диапазон изменения коэффициента  $K_{(1.1-3)}$

$$\sqrt{3}/2 \leq K_{(1.1-3)} \leq \sqrt{3}. \quad (5.9)$$

Пределы изменения  $K_{(2-3)}$  получаются те же, что и для  $K_{(1.1-3)}$ .

Практический интерес представляет также соотношение между токами в земле при  $K^{(1)}$  и  $K^{(1.1)}$ :

$$K_3 = \frac{|i_3^{(1)}|}{|i_3^{(1.1)}|} = \frac{x_{1\Sigma} x_{2\Sigma} + x_{1\Sigma} x_{0\Sigma} + x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma} x_{2\Sigma} + x_{2\Sigma}^2 + x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}. \quad (5.10)$$

Предположим, что к.з. отдалено, и примем  $x_{1\Sigma} = x_{2\Sigma}$ , тогда

$$K_3 = \frac{x_{2\Sigma}^2 + 2x_{1\Sigma} x_{0\Sigma}}{2x_{1\Sigma}^2 + x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}. \quad (5.11)$$

Устремляя поочередно  $x_{0\Sigma}$  к 0 и  $\infty$ , получим соответственно  $K_3 = 1/2$  и  $K_3 = 2$ .

Следовательно,

$$1/2 \leq K_3 \leq 2. \quad (5.12)$$

Как видно, величина соотношения определяется сопротивлениями  $x_{1\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$ . Токи  $i_3^{(1.1)}$  и  $i_3^{(1)}$  будут равны при  $x_{1\Sigma} = x_{0\Sigma}$ .

**Пример 5.1.** После преобразования схем всех трех последовательностей, построенных для анализа поперечной несимметрии в некоторой ЭС, получили эквиваленты, изображенные на рис. 5.2.

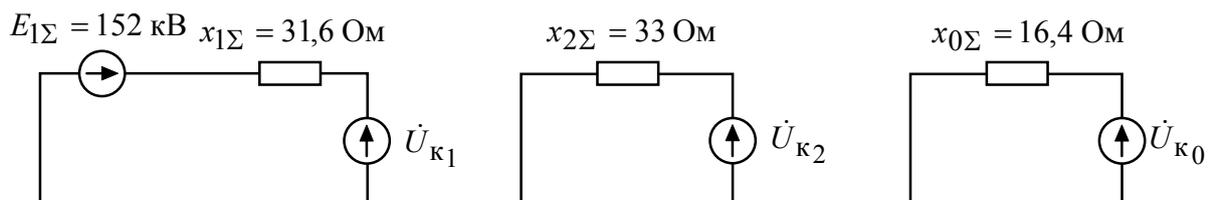


Рис. 5.2. Эквиваленты схем последовательностей

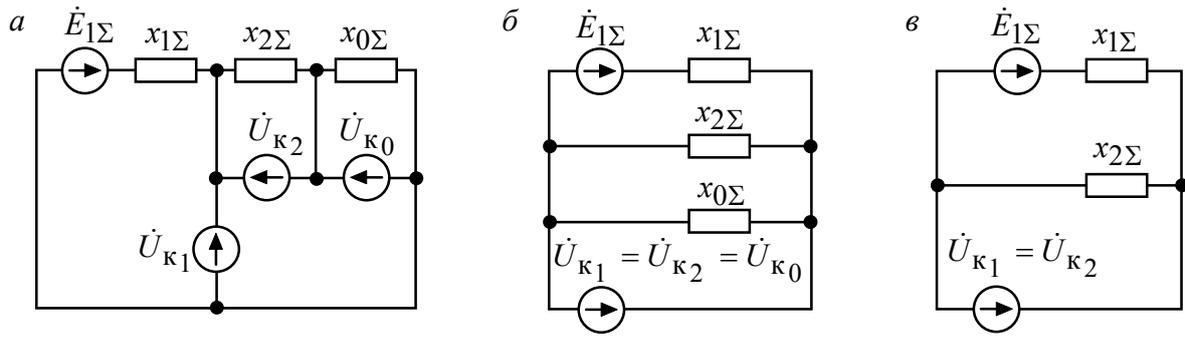


Рис. 5.3. Схемы соединения последовательностей для  $K^{(1)}$  (а),  $K^{(1.1)}$  (б),  $K^{(2)}$  (в)

Определить токи и напряжения в точке к.з. в фазах для случаев  $K^{(1)}$ ,  $K^{(1.1)}$  и  $K^{(2)}$ .

При анализе режимов используем схемы соединения последовательностей, изображенные на рис. 5.3.

*Однофазное короткое замыкание на землю.* В соответствии со схемой рис. 5.2, а

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 33 + 16,4 = 49,4 \text{ Ом};$$

$$i_{к1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_1}{j(x_{2\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)})} = \frac{152}{j(31,6 + 49,4)} = \frac{152}{j81} = -j1,88 \text{ кА};$$

$$i_{к2}^{(1)} = i_{к0}^{(1)} = i_{к1}^{(1)} = -j1,88 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{к1}^{(1)} = i_{к1}^{(1)} \cdot jx_{\Delta}^{(1)} = -j1,88 \cdot j49,4 = 92,87 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{к2}^{(1)} = -i_{к2}^{(1)} \cdot jx_{2\Sigma} = j1,88 \cdot j33 = -62,07 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{к0}^{(1)} = -i_{к0}^{(1)} \cdot jx_{0\Sigma} = j1,88 \cdot j16,4 = -30,8 \text{ кВ}.$$

**Фазные величины:**

$$i_A^{(1)} = i_{к0}^{(1)} + i_{к1}^{(1)} + i_{к2}^{(1)} = 3i_{к1}^{(1)} = 3 \cdot (-j1,88) = -j5,64 \text{ кА};$$

$$i_B^{(1)} = i_{к0}^{(1)} + a^2 i_{к1}^{(1)} + a i_{к2}^{(1)} = 3i_{к1}^{(1)} = (1 + a^2 + a) i_{к1}^{(1)} = \left( -1 - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) i_{к1}^{(1)} \equiv 0;$$

$$i_C^{(1)} \equiv 0;$$

$$\dot{U}_A^{(1)} = \dot{U}_{к0}^{(1)} + \dot{U}_{к1}^{(1)} + \dot{U}_{к2}^{(1)} = 92,87 - 62,07 - 30,8 = 0;$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_B^{(1)} &= \dot{U}_{K_0}^{(1)} + a^2 \dot{U}_{K_1}^{(1)} + a \dot{U}_{K_2}^{(1)} = -30,8 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 92,87 - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 62,07 = \\ &= -46,2 - j134,2 = 141,9 \angle -108,9^\circ \text{ кВ};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_C^{(1)} &= \dot{U}_{K_0}^{(1)} + a \dot{U}_{K_1}^{(1)} + a^2 \dot{U}_{K_2}^{(1)} = -30,8 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 92,87 - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 62,07 = \\ &= -46,2 + j134,2 = 141,9 \angle 108,9^\circ \text{ кВ}.\end{aligned}$$

*Двухфазное замыкание на землю.* В соответствии со схемой рис. 5.2, б

$$x_{\Delta}^{(1.1)} = \left(\frac{1}{x_{1\Sigma}} + \frac{1}{x_{2\Sigma}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{33} + \frac{1}{16,4}\right)^{-1} = 10,96 \text{ Ом};$$

$$i_{K_1}^{(1.1)} = \frac{152}{j(31,6 + 10,96)} = -j3,57 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{K_1}^{(1.1)} = i_{K_1}^{(1.1)} \cdot jx_{\Delta}^{(1.1)} = -j3,57 \cdot j10,96 = 39,13 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{K_0}^{(1.1)} = \dot{U}_{K_2}^{(1.1)} = \dot{U}_{K_1}^{(1.1)} = 39,13 \text{ кВ};$$

$$i_{K_2}^{(1.1)} = \frac{-\dot{U}_{K_2}^{(1.1)}}{jx_{2\Sigma}} = \frac{-39,13}{j33} = -j1,19 \text{ кА};$$

$$i_{K_0}^{(1.1)} = \frac{-\dot{U}_{K_0}^{(1.1)}}{jx_{0\Sigma}} = \frac{-39,13}{j16,4} = j2,38 \text{ кА}.$$

**Фазные величины:**

$$i_A^{(1.1)} = -j3,57 + j1,19 + j2,38 \equiv 0;$$

$$\begin{aligned}i_B^{(1.1)} &= j2,38 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-j3,57) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j1,19 = \\ &= -4,12 + j3,57 = 5,45 \angle 139,1^\circ \text{ кА};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_C^{(1.1)} &= j2,38 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-j3,57) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j1,19 = \\ &= 4,12 + j3,57 = 5,45 \angle 40,9^\circ \text{ кА};\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{K_A}^{(1.1)} = 3\dot{U}_{K_1}^{(1.1)} = 3 \cdot 39,13 = 117,4 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(1.1)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(1.1)} = 0.$$

Двухфазное замыкание. В соответствии со схемой рис. 5.2, в

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 33 \text{ Ом};$$

$$\dot{i}_{\kappa 1}^{(2)} = \frac{152}{j(31,6 + 33)} = -j2,35 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_{\kappa 1}^{(2)} = \dot{i}_{\kappa 1}^{(2)} \cdot jx_{\Delta}^{(2)} = -j2,35 \cdot j33 = 77,6 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{\kappa 2}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa 1}^{(2)} = 77,6 \text{ кВ};$$

$$\dot{i}_{\kappa 2}^{(2)} = \frac{-\dot{U}_{\kappa 2}^{(2)}}{jx_{2\Sigma}} = \frac{-77,6}{j33} = j2,35 \text{ кА} = -\dot{i}_{\kappa 1}^{(2)}.$$

Фазные величины:

$$\dot{i}_A^{(2)} \equiv 0;$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_B^{(2)} &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \dot{i}_{\kappa 1}^{(2)} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \dot{i}_{\kappa 2}^{(2)} = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \dot{i}_{\kappa 1}^{(2)} = \\ &= -j\sqrt{3} \dot{i}_{\kappa 1}^{(2)} = -j2,35 \cdot (-j\sqrt{3}) = -4,07 \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{i}_C^{(2)} = -\dot{i}_B^{(2)} = 4,07 \text{ кА};$$

$$\dot{U}_A^{(2)} = \dot{U}_{\kappa 1}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa 2}^{(2)} = 2 \dot{U}_{\kappa 1}^{(2)} = 77,6 \cdot 2 = 155,2 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C^{(2)} = \dot{U}_B^{(2)} = -77,62 \text{ кВ}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.4.

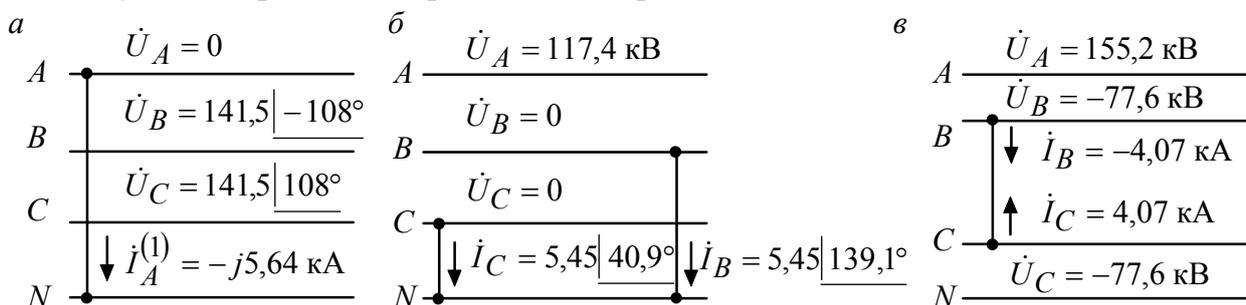


Рис. 5.4. Результаты расчетов фазных напряжений и токов для случаев  $K^{(1)}$  (а),  $K^{(1.1)}$  (б) и  $K^{(2)}$  (в)

**Пример 5.2.** В ЭС, схема которой приведена на рис. 5.5, в точке  $M$  возникла продольная несимметрия. Эквиваленты схем замещения различных последовательностей, приведенные к 110 кВ, изображены на рис. 5.6. Определить токи и напряжения в фазах в точке несимметрии для случаев обрыва одной и двух фаз и изменения сопротивления в одной фазе.

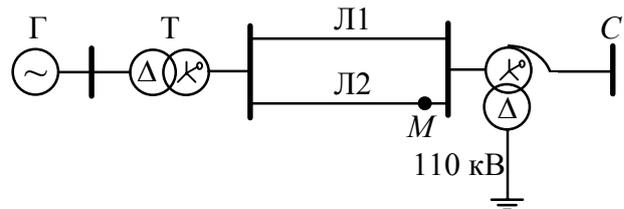


Рис. 5.5. Схема исследуемой ЭС

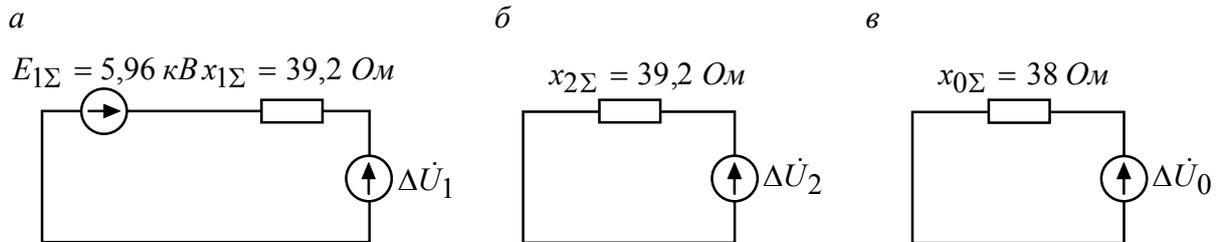


Рис. 5.6. Эквивалентные схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

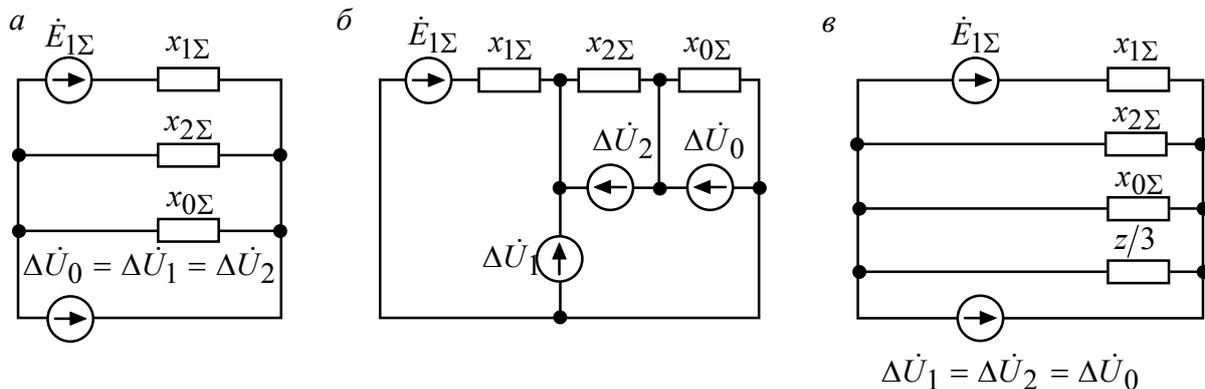


Рис. 5.7. Схемы соединения последовательностей для случаев обрыва одной фазы (а), двух фаз (б) и изменения сопротивления в фазе (в)

При анализе режимов используем схемы соединения последовательностей, изображенные на рис. 5.7.

*Обрыв одной фазы.* В соответствии со схемой рис. 5.7, а.

$$x_{\Delta} = \left( \frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{39,2} + \frac{1}{38} \right)^{-1} = 19,3 \text{ Ом};$$

$$\dot{I}_1 = \frac{5,96}{j(39,2 + 19,3)} = -j0,102 \text{ кА};$$

$$\Delta\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot jx_{\Delta} = -j0,102 \cdot j19,3 = 1,97 \text{ кВ};$$

$$\Delta\dot{U}_2 = \Delta\dot{U}_0 = \Delta\dot{U}_1 = 1,97 \text{ кВ};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\Delta\dot{U}_2}{jx_{2\Sigma}} = \frac{-1,97}{j39,2} = 0,050 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_0 = \frac{-\Delta\dot{U}_0}{jx_{0\Sigma}} = \frac{-1,97}{j38} = 0,052 \text{ кА.}$$

Фазные величины:

$$\dot{I}_A = -j0,102 + j0,05 + j0,052 = 0;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= j0,052 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-j0,102) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j0,05 = -0,131 + j0,078 = \\ &= 0,153 \underline{149,3^\circ} \text{ кА;} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = 0,153 \underline{30,7^\circ} \text{ кА;} \quad \Delta\dot{U}_A = \Delta\dot{U}_1 + \Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0 = 3 \cdot \Delta\dot{U}_1 = 3 \cdot 1,97 = 5,91 \text{ кВ;} \quad \Delta\dot{U}_B = \Delta\dot{U}_C = 0.$$

*Обрыв двух фаз.* В соответствии со схемой рис. 5.7, б

$$x_\Delta = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 39,2 + 38,0 = 77,2 \text{ Ом;}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{5,96}{j(39,2 + 77,2)} = -j0,051 \text{ кА;}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_0 = \dot{I}_1 = -j0,051 \text{ кА;}$$

$$\Delta\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot jx_\Delta = -j0,051 \cdot j77,2 = 3,96 \text{ кВ;}$$

$$\Delta\dot{U}_2 = -\dot{I}_2 \cdot jx_{2\Sigma} = j0,051 \cdot j39,2 = -2,02 \text{ кВ;}$$

$$\Delta\dot{U}_0 = -\dot{I}_0 \cdot jx_{0\Sigma} = j0,051 \cdot j38 = -1,94 \text{ кВ.}$$

Фазные величины:

$$\dot{I}_A = 3\dot{I}_1 = 3 \cdot (-j0,051) = -j0,153 \text{ кА;}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0;$$

$$\Delta\dot{U}_A = 0;$$

$$\Delta\dot{U}_B = -1,94 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 3,96 - \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 2,02 = -2,91 - j5,18 = 5,94 \underline{-120^\circ} \text{ кВ;}$$

$$\Delta\dot{U}_C = -1,94 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 3,96 - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot 2,02 = 5,94 \underline{120^\circ} \text{ кВ.}$$

*Включение в фазу А дополнительного сопротивления*  $z = j15 \text{ Ом}$  (рис. 5.7, в):

$$x_\Delta = \left(\frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}} + \frac{3}{z}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{39,2} + \frac{1}{38} + \frac{3}{15}\right)^{-1} = 3,97 \text{ Ом;}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{5,96}{j(39,2 + 3,97)} = -j0,138 \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot jx_{\Delta} = -j0,138 \cdot j3,97 = 0,548 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \Delta \dot{U}_0 = \Delta \dot{U}_1 = 0,548 \text{ кВ};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\Delta \dot{U}_2}{jx_{2\Sigma}} = \frac{-0,548}{j39,2} = 0,014 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_0 = \frac{-\Delta \dot{U}_0}{jx_{0\Sigma}} = \frac{-0,548}{j38} = 0,014 \text{ кА}.$$

Фазные величины:

$$\dot{I}_A = -j0,138 + j0,014 + j0,014 = -j0,11 \text{ кА};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= j0,014 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot (-j0,138) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j0,014 = -0,131 + j0,076 = \\ &= 0,152 \angle 149,9^\circ \text{ кА}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = 0,152 \angle 30,1^\circ \text{ кА};$$

$$\Delta \dot{U}_A = \Delta \dot{U}_1 + \Delta \dot{U}_2 + \Delta \dot{U}_0 = 3 \cdot \Delta \dot{U}_1 = 3 \cdot 0,548 = 1,644 \text{ кВ};$$

$$\Delta \dot{U}_B = \Delta \dot{U}_C = 0.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.8.

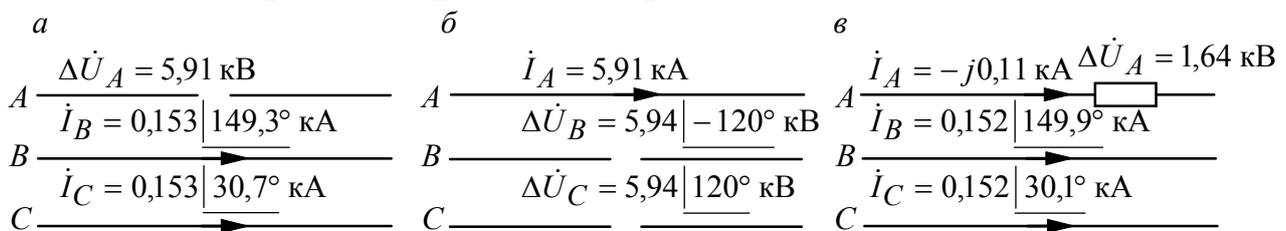


Рис. 5.8. Результаты анализа режимов с обрывом одной фазы (а), двух фаз (б), изменением сопротивления в фазе (в)

**Пример 5.3.** Для ЭС, схема которой изображена на рис. 5.9, определить токи, текущие в фазах нагрузки и напряжения в фазах на шинах нагрузки при  $K^{(1.1)}$  в точке М. Известны схемы замещения и их параметры для различных последовательностей (рис. 5.10), приведенные к ступени 220 кВ. В результате предварительных расчетов для точки несимметрии получены токи  $\dot{I}_{к1} = -j0,84 \text{ кА}$ ;  $\dot{I}_{к2} = j0,27 \text{ кА}$ ;  $\dot{I}_{к0} = j0,57 \text{ кА}$ ;  $\dot{I}_{кB} = 1,29 \angle 138,4^\circ \text{ кА}$ ;  $\dot{I}_{кC} = 1,29 \angle 41,6^\circ \text{ кА}$  и напряжения:

$$\dot{U}_{к1} = \dot{U}_{к2} = \dot{U}_{к0} = 23 \text{ кВ}; \quad \dot{U}_{кA} = 69 \text{ кВ}.$$

Нагрузки являются в основном пассивными, поэтому замещаются шунтами.

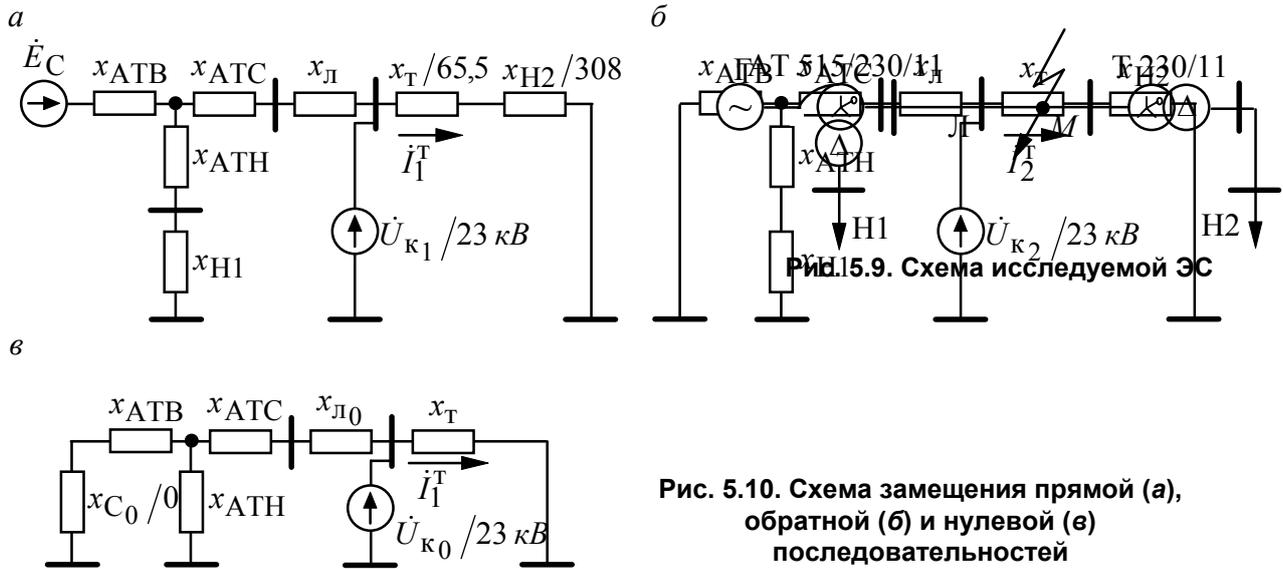


Рис. 5.10. Схема замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Определение токов различных последовательностей, текущих в нагрузку со стороны точки к.з.:

$$\dot{I}_1^T = \dot{U}_{k1} / j(x_T + x_{H2}) = 23 / j(65,5 + 308) = -j0,062 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_2^T = \dot{U}_{k2} / j(x_T + x_{H2}) = -j0,062 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_0^T = \dot{U}_{k0} / jx_T = 23 / j65,5 = -j0,351 \text{ кА}.$$

Определение токов в фазах со стороны высшего напряжения:

$$\dot{I}_A^T = -j0,062 - j0,062 - j0,351 = -j0,475 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_B^T = -j0,351 - j0,062 \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - j0,062 \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -j0,289 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_C^T = -j0,351 - j0,062 \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - j0,062 \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -j0,289 \text{ кА}.$$

Определение токов в нейтрали трансформатора Т:

$$\dot{I}_N^T = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = -j(0,475 + 0,289 + 0,289) = -j1,05 \text{ кА} = 3\dot{I}_0.$$

Определение токов в фазах нагрузки со стороны низшего напряжения. Поскольку схема соединения обмоток  $\ast/\Delta$  - 11 трансформатора, то трансформируются и вытекают в нагрузку только токи прямой и обратной последовательностей:

$$j_1^{H2} = -j_1^T k_T e^{-j30^\circ N} = -j0,062 \cdot \frac{230}{11} e^{-j30^\circ \cdot 11} = -j1,29 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = 0,645 - j1,12 =$$

$$= 1,29 \angle -60^\circ \text{ кА};$$

$$j_2^{H2} = -j_2^T k_T e^{j30^\circ N} = -j0,062 \cdot \frac{230}{11} e^{j30^\circ \cdot 11} = -j1,29 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = -0,645 - j1,12 =$$

$$= 1,29 \angle -120^\circ \text{ кА}.$$

Токи в фазах нагрузки с низшей стороны:

$$j_A^{H2} = j_1^{H2} + j_2^{H2} = 1,29 \angle -60^\circ + 1,29 \angle -120^\circ = 0,645 - j1,12 - 0,645 - j1,12 = -j2,24 \text{ кА};$$

$$j_B^{H2} = a^2 j_1^{H2} + a j_2^{H2} = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,645 - j1,12) + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0,645 - j1,12) =$$

$$= 0 + j0 \text{ кА};$$

$$j_C^{H2} = a j_1^{H2} + a^2 j_2^{H2} = \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,645 - j1,12) + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0,645 - j1,12) =$$

$$= j2,24 \text{ кА}.$$

Напряжение на шинах нагрузки без учета трансформации равны

$$\dot{U}_1^T = \dot{U}_{к1} - x_T j_1^T = 23 - j65,5 \cdot (-j0,062) = 18,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_2^T = \dot{U}_{к2} - x_T j_2^T = 23 - j65,5 \cdot (-j0,062) = 18,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_0^T = 0.$$

Расчет напряжений на шинах нагрузки с учетом коэффициента трансформации:

$$\dot{U}_1^{H2} = \frac{\dot{U}_1^T}{k_T \cdot e^{j30^\circ N}} = 18,9 \cdot \frac{11}{230} \cdot e^{j30^\circ} = 0,9 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) = 0,78 + j0,45 = 0,9 \angle 30^\circ \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_2^{H2} = \frac{\dot{U}_2^T}{k_T \cdot e^{-j30^\circ N}} = 18,9 \cdot \frac{11}{230} \cdot e^{-j30^\circ} = 0,9 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = 0,78 - j0,45 = 0,9 \angle -30^\circ \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_A^{H2} = \dot{U}_1^{H2} + \dot{U}_2^{H2} = 0,78 + j0,45 + 0,78 - j0,45 = 1,56 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_B^{H2} = a^2 \dot{U}_1^{H2} + a \dot{U}_2^{H2} = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,78 + j0,45) + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,78 - j0,45) =$$

$$= -0,78 + 0,78 = 0;$$

$$\dot{U}_C^{H2} = a \dot{U}_1^{H2} + a^2 \dot{U}_2^{H2} = \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,78 + j0,45) + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (0,78 - j0,45) =$$

$$= -0,78 - 0,78 = -1,56 \text{ кВ}.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.11.

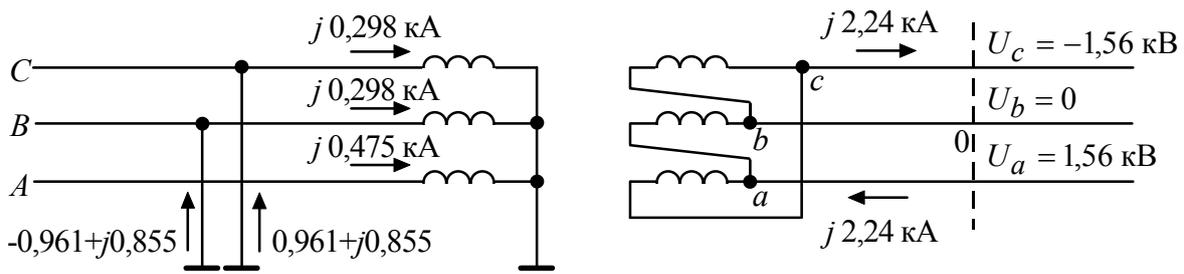


Рис. 5.11. Распределение токов и напряжений по фазам

### Вопросы для самопроверки

1. Алгоритм расчета фазных величин токов и напряжений в точке несимметрии.
2. Основные допущения при расчетах несимметричных к.з.
3. Схемы соединения последовательностей при расчетах несимметричных к.з.
4. Схемы соединения последовательностей при расчетах режимов с продольной несимметрией.
5. Трансформация токов и напряжений различных последовательностей.
6. Принцип учета изменения во времени периодической составляющей тока несимметричного к.з.

### ПРОСТОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ

Простым замыканием на землю называется замыкание на землю одной фазы в сетях с изолированной нейтралью. Рассмотрим этот режим в соответствии с рис. 6.1. Поскольку нейтраль изолирована, ток поврежденной фазы будет возвращаться через паразитную распределенную емкость  $C_0$  проводов неповрежденных фаз. Очевидно, наибольший ток будет в точке повреждения. Токи в неповрежденных фазах будут постепенно возрастать по мере приближения к источнику.

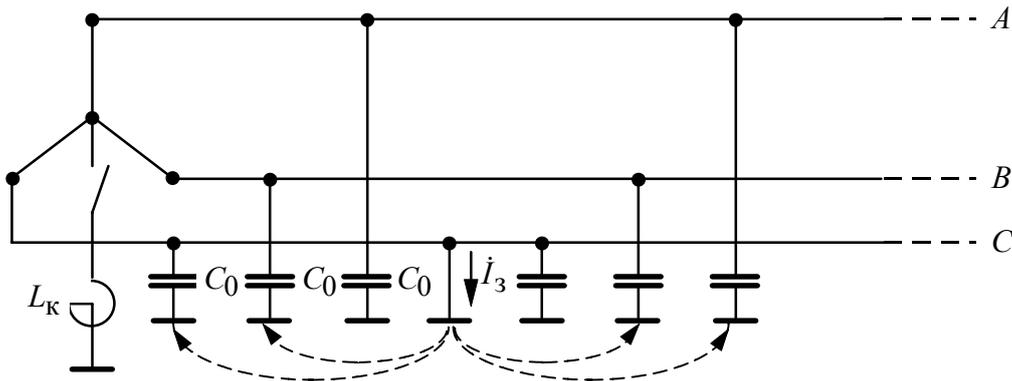


Рис. 6.1. Схема простого замыкания на землю

Расчет тока простого замыкания производится аналогично  $K^{(1)}$ , поэтому

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma} + z_{0\Sigma}}. \text{ Сопротивление } z_{0\Sigma} \text{ состоит из трех составляющих}$$

$z_{0\Sigma} = r_{0\Sigma} + jx_{0L} - jx_{0C}$ . Причем сопротивление  $x_{0C}$  по модулю превосходит все остальные сопротивления  $(z_{1\Sigma}, z_{2\Sigma}, r_{0\Sigma}, x_{0L})$  настолько, что ими можно

пренебречь. Сети с изолированной нейтралью обычно не имеют собственных источников. Питание осуществляется от понижающего трансформатора. В этом случае шины высшего напряжения трансформатора можно считать источником бесконечной мощности. Тогда  $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{ф.ср}}}{-jx_{0C}}$ , а ток в поврежденной фазе

$$\dot{I}_3 = j3 \frac{\dot{U}_{\text{ф.ср}}}{x_{0C}}.$$

Оценить величину  $x_{0C}$  можно по известным формулам. Для грубой оценки величины тока емкостное сопротивление можно оценить по длине линий  $\ell$  (м). Для воздушных ЛЭП  $x_{0C} \approx \ell/350$ , для кабельных  $x_{0C} \approx \ell/10$ .

Ток простого замыкания на землю по величине существенно ниже, чем при коротком замыкании. Это значит, что термическое и динамическое воздействие этого тока на элементы электрической системы можно не учитывать. Однако очень часто в точке простого замыкания возникает перемежающаяся дуга, последствием которой являются всплески перенапряжений и, как следствие, переход простого замыкания в междуфазное.

По Правилам технической эксплуатации (ПТЭ) электрических станций и сетей ток простого замыкания на землю следует ограничивать до величины, при которой дуга гаснет без повторных зажиганий.

Ограничение тока достигается путем включения в нейтраль дугогасительного реактора с индуктивностью  $x_L$  (см. рис. 6.1). Поскольку  $x_L$  оказывается включенным параллельно с  $x_{0C}$ :

$$x_{0\Sigma} = -\frac{3x_L \cdot x_{0C}}{3x_L - x_{0C}},$$

тогда при  $x_L = \frac{1}{3}x_{0C}$  получается условие резонанса тока, т.е. условие полной компенсации тока простого замыкания. Максимально допустимое значение тока определяется конкретными условиями и указано в ПТЭ.

**Пример 6.1.** Определить ток простого замыкания на землю, возникающего на шинах понижающей подстанции с разветвленной кабельной сетью. Известно, что  $U_H = 35$  кВ, эквивалентное емкостное сопротивление нулевой последовательности кабельных линий  $x_{0C} = 4250$  Ом. Предусмотреть, если необходимо, установку дугогасящего аппарата.

Расчет проводится в соответствии со схемой соединений последовательностей для  $K^{(1)}$  (см. рис. 5.2, а). Шины трансформатора можно считать источником бесконечной мощности с  $U_{\text{ф.ср}} = U_{\text{ср}}/\sqrt{3} = 37/\sqrt{3} = 21,3$  кВ.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{ф.ср}}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma} + z_{0\Sigma}}.$$

Поскольку в  $z_{0\Sigma}$  всегда преобладает  $x_{0C}$ , т.е.  $|x_{0C}| \gg |z_{0\Sigma}|$ , то можно считать  $z_{0\Sigma} = -jx_{0C}$ . Сопротивления обратной и прямой последовательностей в данном случае определяются только сборными шинами и шинами вводов, следовательно, справедливо принять  $z_{1\Sigma} = z_{2\Sigma} = 0$ . Тогда

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{ф.ср}}}{-jx_{0C}} = \frac{21,3}{-j4250} = j0,005 \text{ кА};$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_2 = \dot{I}_1 = j5 \text{ А}.$$

Ток в поврежденной фазе

$$\dot{I}_A = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 + \dot{I}_1 = 3\dot{I}_1 = 3 \cdot j5 = j15 \text{ А}.$$

Поскольку емкостной ток превышает значение 10 А, то требуется предусмотреть установку дугогасящего реактора. Его сопротивление рассчитывается из условия резонанса токов, когда

$$z_3 = \left( \frac{1}{3jx_L} + \frac{1}{-jx_{0C}} \right)^{-1} = \infty,$$

и будет равно  $x_L = x_C/3 = 4250/3 = 1416,7 \text{ Ом}$ .

### Вопросы для самопроверки

1. Отличия простого замыкания на землю от однофазного короткого замыкания.
2. Последствия простого замыкания.
3. Особенности расчета тока простого замыкания.
4. Средства для уменьшения тока простого замыкания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы / С.А. Ульянов. М.: Энергия, 1970. 415 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. М.: Высшая школа, 1964. 750 с.
3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. М.: Энергия, 1964. 704 с.
4. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ: руководящие указания по релейной защите / ВГПИИиНИИ Энергосеть-проект. М. Энергия, 1979. Вып. 2. 152 с.
5. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3. Кн. 1: Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского и др. М.: Энергоиздат, 1982. 656 с.
6. Электротехнический справочник / под общ. ред. П.Г. Грудинского и др. 5-е изд., испр. М.: Энергия, 1975. Т. 2. 752 с.
7. Арзамасцев Д.А. Электромагнитные переходные процессы в синхронных генераторах: учебное пособие / Д.А. Арзамасцев. Свердловск: УПИ, 1965. 106 с.

## СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МНОГООБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Схемы замещения должны иметь  $n$  опорных точек (входов) и минимальное число ветвей  $q$ , соответствующее числу заданных сопротивлений к.з.:

$$q = n(n-1)/2. \quad (\text{П.1.1})$$

Практически может оказаться целесообразным в целях упрощения принять схемы замещения с числом элементов большим, чем  $q$ , но при числе независимых элементов, равном  $q$ .

### 1. Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)

Для трехобмоточного трансформатора (рис. П.1.1) задаются три сопротивления к.з. между попарно взятыми обмотками, %:

$$z_{12} = u_{кВ-С}; \quad z_{13} = u_{кВ-Н}; \quad z_{23} = u_{кС-Н}.$$

Минимальное число ветвей в схеме замещения

$$q = 3(3-1)/2 = 3.$$

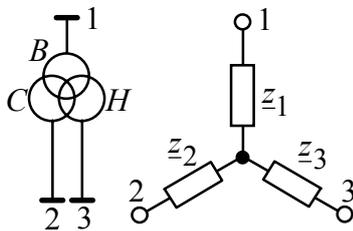


Рис. П.1.1. Принципиальная схема и схема замещения трехобмоточного трансформатора

Схема замещения (рис. П.1.1) содержит три независимых сопротивления, определяемых по формулам

$$\begin{cases} z_1 = (z_{12} + z_{13} - z_{23})/2, \\ z_2 = (z_{12} + z_{23} - z_{13})/2, \\ z_3 = (z_{13} + z_{23} - z_{12})/2, \end{cases} \quad (\text{П.1.2})$$

и может быть представлена трехлучевой звездой.

Сопротивления  $z_1, z_2, z_3$  получаются из решения системы уравнений

$$\begin{cases} z_{12} = z_1 + z_2, \\ z_{13} = z_1 + z_3, \\ z_{23} = z_2 + z_3 \end{cases}$$

и являются математическими величинами.

### 2. Четырехобмоточный трансформатор

Для четырехобмоточного трансформатора (рис. П.1.2) задаются шесть независимых сопротивлений  $z_{12}, z_{13}, z_{14}, z_{23}, z_{24}, z_{34}$ . Минимальное число ветвей в схеме замещения

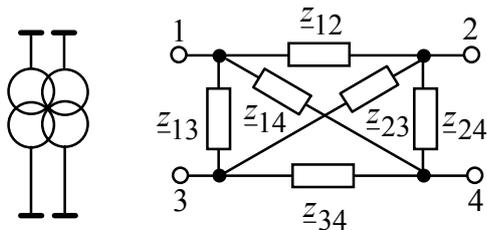


Рис. П.1.2. Принципиальная схема и схема замещения четырехобмоточного трансформатора

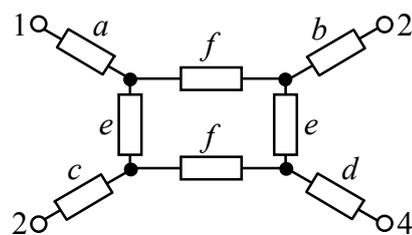


Рис. П.1.3. Схема замещения четырехобмоточного трансформатора с выделенными входными ветвями

$$q = 4(4 - 1)/2 = 6,$$

а входов  $n = 4$ .

Для рассматриваемого варианта может быть принята схема полного четырехугольника (рис. П.1.2), однако более удобной является схема, представленная на рис. П.1.3. Схема имеет восемь ветвей, содержит выделенные ветви с входными токами трансформатора и только один замкнутый контур. Поскольку  $q > 6$ , некоторые сопротивления схемы будут одинаковыми. Остальные являются функциями сопротивлений  $\underline{z}_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, 4} (i \neq j)$  [4, с. 30]:

$$a = 0,5 \cdot \left( \underline{z}_{12} + \underline{z}_{13} - \underline{z}_{23} - \frac{e \cdot f}{e + f} \right),$$

$$b = 0,5 \cdot \left( \underline{z}_{12} + \underline{z}_{24} - \underline{z}_{14} - \frac{e \cdot f}{e + f} \right),$$

$$c = 0,5 \cdot \left( \underline{z}_{13} + \underline{z}_{34} - \underline{z}_{14} - \frac{e \cdot f}{e + f} \right),$$

$$d = 0,5 \cdot \left( \underline{z}_{24} + \underline{z}_{34} - \underline{z}_{23} - \frac{e \cdot f}{e + f} \right),$$

$$f = B + \sqrt{A \cdot B},$$

$$e = A + \sqrt{A \cdot B}$$

и

$$A = \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{23} - \underline{Z}_{34} - \underline{Z}_{12}; \quad B = \underline{Z}_{14} + \underline{Z}_{23} - \underline{Z}_{24} - \underline{Z}_{13}.$$

Следует отметить, что схемы замещения многообмоточных трансформаторов не могут содержать число ветвей меньше  $q$ .

### 3. Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленными обмотками

Схема замещения (рис. П.1.4) – трехлучевая звезда.

Сопротивления схемы замещения  $\underline{z}_{H1} = \underline{z}_{H2}$  рассчитываются по формуле

$$\underline{z}_{H1} = \underline{z}_{H2} = (\underline{z}_{H1} - \underline{z}_{H2})/2 = \underline{z}_p/2, \quad (\text{П.1.3})$$

где  $\underline{z}_p$  – сопротивление к.з. между двумя цепями расщепленной обмотки.

Сопротивление к.з. между зажимами высокого и низкого напряжения  $\underline{z}_{BH}$  определяется по выражению:

$$\underline{z}_{BH} = \underline{z}_B + \frac{\underline{z}_{H1} \cdot \underline{z}_{H2}}{\underline{z}_{H1} + \underline{z}_{H2}} = \underline{z}_B + \frac{\underline{z}_p}{4}, \quad (\text{П.1.4})$$

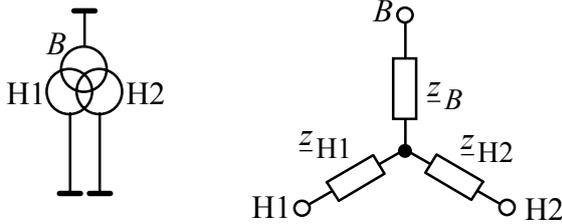


Рис. П.1.4. Принципиальная схема и схема замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низшего напряжения

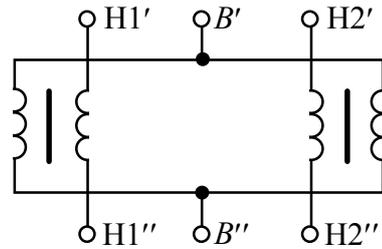


Рис. П.1.5. Схема однофазного трансформатора с расщепленной обмоткой

откуда легко определяется значение сопротивления

$$\underline{z}_B = \underline{z}_{BH} - \frac{\underline{z}_p}{4} = \underline{z}_{BH} - \frac{k_p \underline{z}_{BH}}{4} = \left(1 - \frac{k_p}{4}\right) \cdot \underline{z}_{BH}, \quad (\text{П.1.5})$$

где  $k_p = \underline{z}_p / \underline{z}_{BH}$  – коэффициент расщепления.

Сопротивления  $\underline{z}_{H1}$  и  $\underline{z}_{H2}$  могут быть выражены через параметры  $\underline{z}_{BH}$  и  $k_p$ :

$$\underline{z}_{H1} = \underline{z}_{H2} = \underline{z}_p/2 = k_p \cdot \underline{z}_{BH}/2. \quad (\text{П.1.6})$$

Для группы из трех однофазных трансформаторов, в каждой фазе которых расщепленные обмотки находятся на разных стержнях и не имеют общих полей рассеяния (рис. П.1.5), коэффициент расщепления  $k_p = 4$  и, как следствие,  $\underline{z}_B = 0$ . Сопротивления

$$\underline{z}_{H1} = \underline{z}_{H2} = 2\underline{z}_{BH}. \quad (\text{П.1.7})$$

В общем случае, если обмотки низшего напряжения двухобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов) расщеплены на  $m$  цепей, сопротивление  $\underline{z}_B$  определяется формулой вида  $\underline{z}_B = \left(1 - \frac{k_p}{\underline{z}_m}\right) \cdot \underline{z}_{BH}$ , а сопротивления схемы замещения на «низкой» стороне подсчитываются по выражению

$$\underline{z}_{H1} = \underline{z}_{H2} = \dots = \underline{z}_{Hm} = \frac{\underline{z}_p}{2} = \frac{k_p}{2} \cdot \underline{z}_{BH}. \quad (\text{П.1.8})$$

## ТРЕХФАЗНОЕ КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Рассматривается простейшая электрическая система (рис. П.2.1), в которой произошло трехфазное к.з. –  $K^{(3)}$ . К зажимам схемы подведено напряжение

$$u_{\eta} = U_m \sin(\omega t + \alpha_{\eta}), \quad (\text{П.2.1})$$

где  $\eta = A, B, C$ ;  $\alpha_{\eta}$  – начальная фаза:  $\alpha_A = \alpha$ ,  $\alpha_B = \alpha - 2\pi/3$ ,  $\alpha_C = \alpha + 2\pi/3$ .

В нормальном режиме по сети может протекать ток

$$i_{\eta} = I_m \sin(\omega t + \alpha_{\eta} - \varphi),$$

$$\eta = A, B, C,$$

где  $I_m = U_m/z$ ;  $z$  – модуль полного сопротивления;  $\varphi$  – аргумент при сопротивлении.

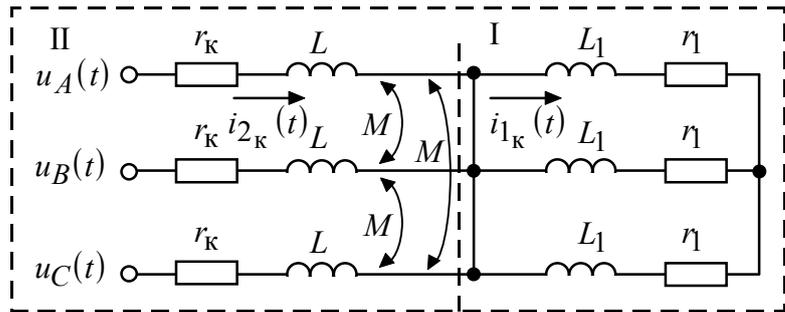


Рис. П.2.1. Схема простейшей электрической цепи

Короткое замыкание

условно делит схему на две независимые части I и II с нулевым значением напряжения в точке к.з.

Переходный процесс рассматривается в «особой» фазе  $A$ . Опуская ее индекс, имеем для правой части цепи

$$r_1 i_{1к} + L_1 \cdot \frac{di_{1к}}{dt} = 0, \quad i_{1к} \equiv i_{1к}(t). \quad (\text{П.2.2})$$

Уравнение (П.2.2) является обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка с разделяющимися переменными. Его решение имеет вид

$$i_{1к}(t) = i_0 e^{-t/\tau_1}, \quad (\text{П.2.3})$$

где  $\tau_1 = L_1/r_1$  – постоянная времени цепи;  $i_0$  – мгновенное начальное значение тока в фазе (ток предшествующего режима).

В нормальном режиме в момент времени  $t = 0$

$$i_{Ak(t=0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi). \quad (\text{П.2.4})$$

Из (П.2.4) следует, что ток в фазе  $A$  может отсутствовать и переходный процесс не возникнет, если  $\alpha - \varphi = 0$ . При этом в двух других фазах токи равны по модулю и противоположны по направлению:

$$i_{Bк(t=0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi - \xi) = -I_m \sin \xi,$$

$$i_{Cк(t=0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi + \xi) = I_m \sin \xi.$$

При  $\alpha - \varphi = \pm \pi/2$  ток в фазе  $A$  достигает максимального значения. В цепи с преобладанием индуктивных элементов  $\varphi \approx \pi/2$ , поэтому условием максимума тока  $i_0$  в фазе  $A$  можно считать равенство  $\alpha = 0$ .

Во всех трех фазах правой части цепи токи имеют апериодический характер. Они затухают до нуля во время переходного процесса с постоянной времени  $\tau_1$ .

Рассмотрим переходный процесс в части цепи, расположенной слева от точки к.з. (П). Дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в фазе  $A$ , имеет вид

$$r_{\text{к}} i_{A\text{к}} + L \cdot \frac{di_{A\text{к}}}{dt} + M \cdot \frac{di_{B\text{к}}}{dt} + M \cdot \frac{di_{C\text{к}}}{dt} = u_A \quad (\text{П.2.5})$$

и с учетом условия  $i_{A\text{к}} = -(i_{B\text{к}} + i_{C\text{к}})$  записывается как

$$r_{\text{к}} i_{A\text{к}} + L_{\text{к}} \cdot \frac{di_{A\text{к}}}{dt} = u_A, \quad (\text{П.2.6})$$

где  $L_{\text{к}} = L - M$  – индуктивность цепи к.з.

Уравнение (П.2.6) является неоднородным дифференциальным уравнением. Его решение получается как сумма двух решений:

– общего решения однородного уравнения (апериодическая составляющая тока к.з.);

– частного решения неоднородного уравнения, дающего значение периодической составляющей тока к.з.:

$$i_{\text{пк}}(t) = I_{m_{\text{к}}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}), \quad (\text{П.2.7})$$

где  $I_{m_{\text{к}}} = U_m / z_{\text{к}}$  – амплитудное значение периодической составляющей тока к.з.;

$z_{\text{к}} = \sqrt{r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2}$  – модуль полного сопротивления;  $x_{\text{к}} = \omega L_{\text{к}}$  – индуктивность

сопротивления цепи;  $\varphi_{\text{к}} = \arctg \frac{x_{\text{к}}}{r_{\text{к}}}$  – аргумент полного сопротивления  $z_{\text{к}}$ .

Апериодическая составляющая тока к.з. определяется по формуле

$$i_{\text{ак}}(t) = i_{\text{а(0)}} e^{-t/\tau_{\text{а}}}, \quad (\text{П.2.8})$$

где  $i_{\text{а(0)}}$  – начальное значение апериодической составляющей, рассчитывается

из условия непрерывности тока в цепи;  $\tau_{\text{а}} = L_{\text{к}} / r_{\text{к}}$  – постоянная времени цепи.

Полный ток фазы  $A$  во время переходного процесса может быть представлен в виде

$$i_{A\text{к}}(t) = i_{\text{пк}}(t) + i_{\text{ак}}(t) = I_{m_{\text{к}}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\text{к}}) + i_{\text{а(0)}} e^{-t/\tau_{\text{а}}}. \quad (\text{П.2.9})$$

Для момента времени  $t = 0$

$$i_{A\text{к}(t=0)} = i_{\text{пк}}(t) + i_{\text{ак}}(t) = I_{m_{\text{к}}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}}) + i_{\text{а(0)}} = i_{(0)}, \quad (\text{П.2.10})$$

где  $i_{(0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi)$  – значение тока в фазе  $A$  в начальный момент времени переходного процесса.

Начальное значение апериодической составляющей тока к.з. из (П.2.10) находится достаточно просто:

$$i_{(0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{m_{\text{к}}} \sin(\alpha - \varphi_{\text{к}}). \quad (\text{П.2.11})$$

Запишем полное выражение тока к.з. в фазе  $A$ :

$$i_{AK}(t) = I_{m_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \left[ I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{m_K} \sin(\alpha - \varphi_K) \right] e^{-t/\tau_a}. \quad (\text{П.2.12})$$

Анализ переходного процесса проводится при условии, что до к.з. цепь была не нагружена ( $z \rightarrow \infty$ ). Тогда полный ток рассчитывается по упрощенному выражению вида

$$i_{AK}(t) = I_{m_K} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - I_{m_K} \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-t/\tau_a}. \quad (\text{П.2.13})$$

Апериодическая составляющая тока к.з. имеет максимальное значение при  $\alpha - \varphi_K = \pm \pi/2$ . Она может отсутствовать в одной из фаз ( $\alpha - \varphi_K = 0$ ), но в двух других обязательно будет.

Для определения условий, при которых полный ток будет достигать максимального значения, необходимо совместное рассмотрение двух уравнений

$$\frac{di_{AK}(t)}{dt} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial i_{AK}(t)}{\partial \alpha} = 0,$$

откуда получается условие экстремума функции  $i_{AK}(t) = 0$ ,  $\alpha = 0$ .

Анализ вторых производных  $i_K(t)$  показывает, что максимум полного тока в любой из фаз  $\eta = A, B, C$  будет при  $\alpha_\eta = 0$ .

Если в цепи преобладает индуктивное сопротивление ( $x_K \gg r_K$ ), то  $\varphi_K \approx \pi/2$ . При этом будут совпадать условия достижения максимальных значений апериодической составляющей и полного тока к.з.

Последнее обстоятельство используется для определения момента времени, при котором достигается максимальное значение полного тока.

Допустим, что  $\alpha - \varphi_K = -\pi/2$ , тогда  $i_K(t) = I_{m_K} \sin(\omega t - \pi/2) + I_{m_K} \cdot e^{-t/\tau_a}$ .

Полагая  $i_{AK}(t) = I_{m_K} \cdot e^{-t/\tau_a}$  постоянной величиной, получаем, что полный ток достигает максимального значения при  $\sin(\omega t - \pi/2) = 1$  или  $t = \pi/\omega = 0,01$  с.

Таким образом, если в цепи преобладает реактивное сопротивление, то при к.з. после холостого хода максимум полного тока достигается в одной из фаз через  $t = 0,01$  с после начала к.з. При этом начальное значение апериодической составляющей также максимально.

На рис. П.2.2 изображены апериодическая  $i_{AK}(t)$ , периодическая  $i_{ПК}(t)$  составляющие и полный ток  $i_K(t)$ , характеризующие переходный процесс.

**Ударный ток к.з.** Значение полного тока к.з. при  $t = 0,01$  с называется ударным током к.з.

$$i_y = k_y I_{m_K}, \quad (\text{П.2.14})$$

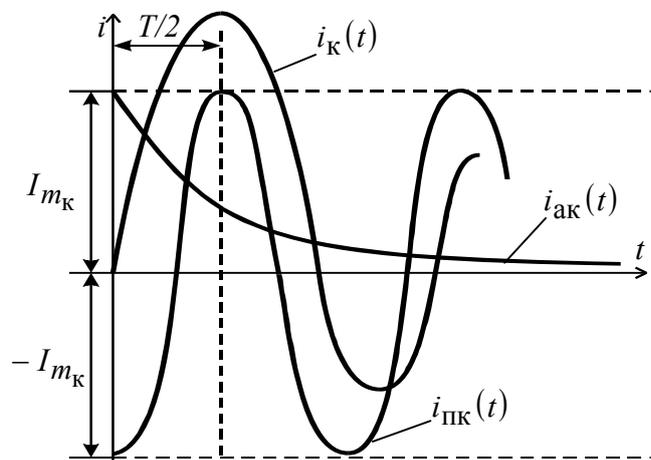


Рис. П.2.2. Изменение тока в фазе

где  $k_y = 1 + e^{-0,01/\tau_a}$  – ударный коэффициент, величина которого определяет превышение мгновенного значения максимального полного тока над амплитудой периодической составляющей тока к.з.

Ударный коэффициент изменяется в пределах  $1 \leq k_y \leq 2$ , причем большее время  $k_y$  соответствует большему значению постоянной времени  $\tau_a$ .

Так, например, при к.з. вблизи источников питания  $k_y \geq 1,95$ , а при удаленном к.з.  $k_y \geq 1,82$  ( $x_k/r_k \approx 1,5$ ,  $\tau_a = 0,05$  с).

**Действующее значение полного и ударного токов к.з.** Полный ток к.з. в фазе является несинусоидальным, поэтому его действующее значение  $I_{\eta_{k_t}}$  в произвольный момент времени определяется как среднеквадратичное значение за один период  $T$ , в середине которого находится рассматриваемый момент времени  $t$ :

$$I_{\eta_{k_t}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_k(t) dt}. \quad (\text{П.2.15})$$

Если пренебречь изменением аperiodической составляющей тока в течение времени  $t \in (0, T)$ , то значение  $I_{\eta_{k_t}}$  может быть найдено по формуле

$$I_{\eta_{k_t}} = \sqrt{I_{\eta_{\text{пк}}}^2 + i_{\eta_{\text{ак}}}^2}. \quad (\text{П.2.16})$$

Действующее значение ударного тока определяется как

$$I_y = \sqrt{I_{\text{пк}}^2 + \left(\sqrt{2} I_{\text{пк}} \cdot e^{-0,01/\tau_a}\right)^2} = I_{\text{пк}} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \quad (\text{П.2.17})$$

**Приближенное определение периодической составляющей тока к.з.** Амплитудное значение периодической составляющей тока к.з. определяется выражением

$$I_{m_k} = \frac{U_m}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} = \frac{U_m}{x_k} \frac{1}{\sqrt{1 + (r_k/x_k)^2}},$$

где  $U_m/x_k = I_{m_{k(r=0)}}$  – амплитудное значение той же составляющей, подсчитанное в предположении равенства нулю активного сопротивления цепи  $r_k = 0$ .

Отношение  $I_{m_{k(r=0)}}/I_{m_k}$ , с учетом требования точности расчета в пределах 5 %, может быть найдено по формуле

$$\frac{I_{m_{k(r=0)}}}{I_{m_k}} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_k}{x_k}\right)^2} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_k}{x_k}\right)^2 \leq 1,05, \quad (\text{П.2.18})$$

откуда  $x_k/r_k \geq 3$ . В большинстве случаев соотношение активного и реактивного сопротивления цепи находится в этих пределах, поэтому расчет периодической составляющей тока к.з. можно проводить без учета активного сопротивления цепи.

Учет активного сопротивления необходим при расчете апериодической составляющей тока к.з., фазы тока к.з. ( $\varphi_k$ ), при расчете токов к.з. в установках с напряжением ниже 1000 В и в кабельных линиях с малым индуктивным сопротивлением между фазами.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ВО ВНЕШНЕЙ СЕТИ

### 1. Модель синхронной машины

Рассматривается упрощенная физическая модель СГ (рис. П.3.1), имеющего двухполюсный ротор (одна пара полюсов), обладающий двухосевой симметрией (явнополюсная СМ).

На статоре СГ расположена трехфазная обмотка ( $A, B, C$ ), фазы которой сдвинуты в пространстве на угол  $\rho = 2\pi/3$ , рад.

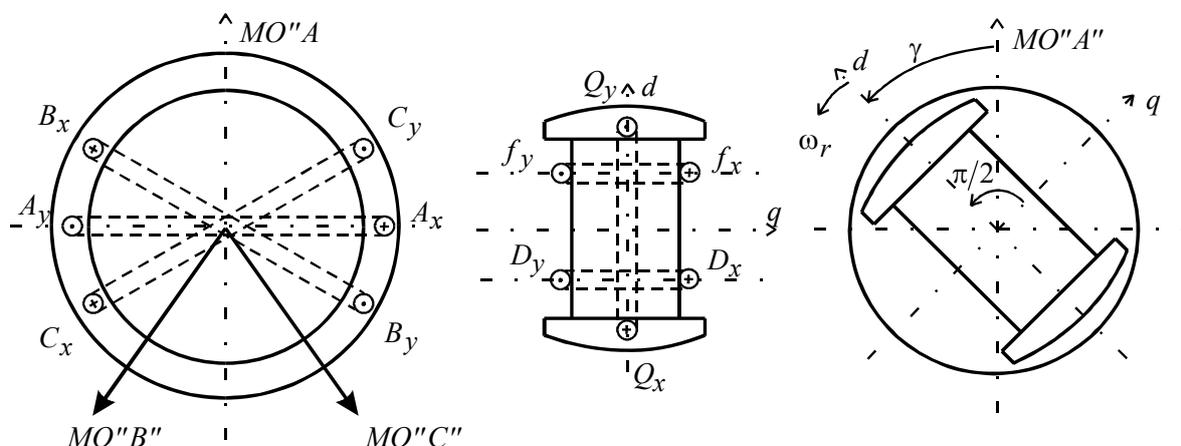


Рис. П.3.1. Расположение обмоток статора, ротора и положение ротора в воздушном зазоре статора

На роторе имеется:

- обмотка возбуждения ( $OB - f$ );
- продольная демпферная обмотка ( $D$ );
- поперечная демпферная обмотка ( $Q$ ).

Положительное направление магнитных осей ( $MO$ ) фаз статора  $A, B, C$  определяется по заданным направлениям токов в статорных обмотках.

Продольная ( $d$ ) и поперечная ( $q$ ) оси ротора сдвинуты в пространстве на угол  $\pi/2$ . Положение ротора, вращающегося со скоростью  $\omega_r$ , определяется углом  $\gamma$ , отсчитываемым от магнитной оси фазы  $A$ .

Электрическая схема контуров СМ представлена на рис. П.3.2. Между всеми контурами имеются электромагнитные связи. Ротор синхронного

генератора приводится во вращение первичным двигателем (турбиной). К обмотке возбуждения подводится постоянное напряжение  $u_f$  от специального источника постоянного тока – возбудителя.

По обмотке возбуждения протекает постоянный ток  $i_f$ , создающий постоянный магнитный поток обмотки возбуждения  $\Phi_f$ , вращающийся со скоростью  $\omega_r$ .

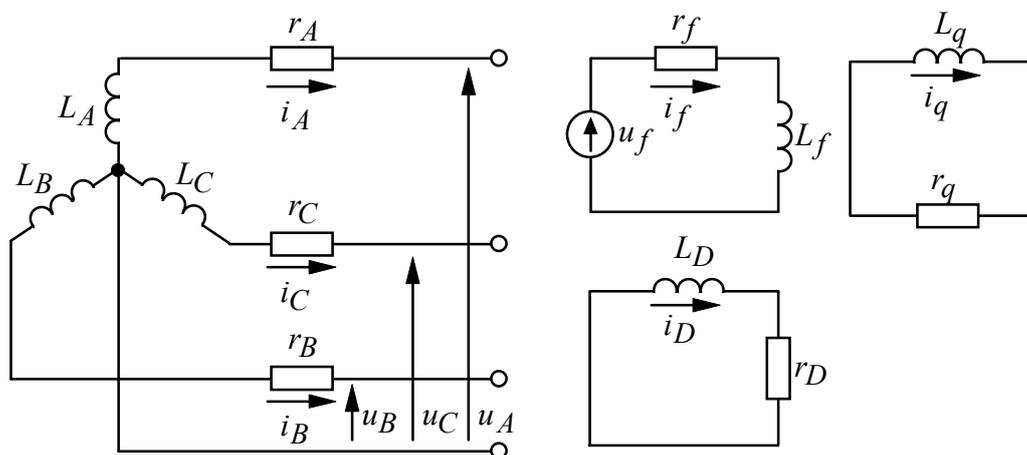


Рис. П.3.2. Электрические схемы контуров статора и ротора СМ

Магнитный поток  $\Phi_f$ , сцепляясь с обмотками статора, индуцирует в них ЭДС, которые при наличии нагрузки создают в обмотках статора фазные токи  $i_A, i_B, i_C$ .

В установившемся режиме работы СМ в обмотках статора протекают установившиеся периодические синусоидальные токи с неизменными амплитудами и фазами, являющиеся токами прямой последовательности. Вращающееся магнитное поле токов статора и поле тока обмотки возбуждения имеют постоянную амплитуду и неподвижны относительно ротора. Токи в демпферных контурах отсутствуют.

В переходном процессе, возникающем при внезапном изменении режима, все резко усложняется.

Для анализа переходного процесса вводятся следующие допущения:

- распределение магнитодвижущих сил (МДС) в воздушном зазоре статора считается строго синусоидальным; ЭДС, наводимые в фазах статора потоком возбуждения  $\Phi_f$ , также синусоидальны;

- СМ считается ненасыщенной; намагниченность стали статора и ротора постоянна;

- нелинейные эффекты в стали (потери на гистерезис, вихревые токи, вытеснение тока в проводниках) отсутствуют; принимается также, что отсутствуют механические потери в СМ (или они считаются постоянными).

Таким образом, рассматривается линейная модель СМ, что позволяет при анализе переходных процессов использовать метод наложения.

## 2. Переходный процесс в СМ при трехфазном к.з. во внешней сети

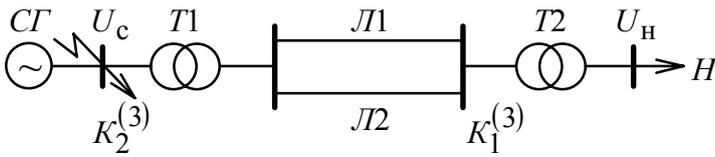


Рис. П.3.3. Схема электрической системы с точками возникновения к.з.  $K_1$  и  $K_2$

При внезапном изменении параметров примыкающей к СГ сети (трехфазное к.з. в точках  $K_1$  или  $K_2$ , рис. П.3.3) напряжение в цепи статора мгновенно изменяется.

Сопротивление внешней сети может изменяться от некоторого значения  $x_{вн}$  ( $K^{(3)}$  в точке  $K_1$ ) до  $x_{вн} = 0$  ( $K^{(3)}$  в точке  $K_2$ ).

Внезапное снижение напряжения до нуля может быть получено при наложении на нормальный предшествующий режим другого режима, когда к точке к.з. внезапно прикладывается напряжение, равное по величине и противоположное по направлению тому, которое существовало до к.з. При этом в контурах СМ появляются токи переходного процесса.

В синхронной машине в начальный момент короткого замыкания аperiodическая составляющая тока статора  $i_{ак}(t)$  скачкообразно возрастает от нуля до некоторого значения. Периодическая составляющая  $i_{пк}(t)$  возрастает скачком на такую же величину, но с противоположным знаком.

Рассмотрим взаимодействие периодической составляющей тока статора  $i_{пк}(t)$  и тока обмотки возбуждения  $i_f(t)$ .

Периодические токи всех трех фаз статора создают вращающееся магнитное поле статора ( $\Phi_a$ ), неподвижное относительно ротора. Изменение этого поля приводит к появлению ЭДС в обмотке возбуждения и, как следствие, скачкообразно изменяющейся аperiodической составляющей тока ротора  $i_{fa}$ , создающей дополнительное поле ( $\Phi_{fa}$ ), которое вытесняет поле статора в воздушный зазор, имеющий низкую магнитную проводимость, в связи с чем периодические токи статора дополнительно изменяются (рис. П.3.4).

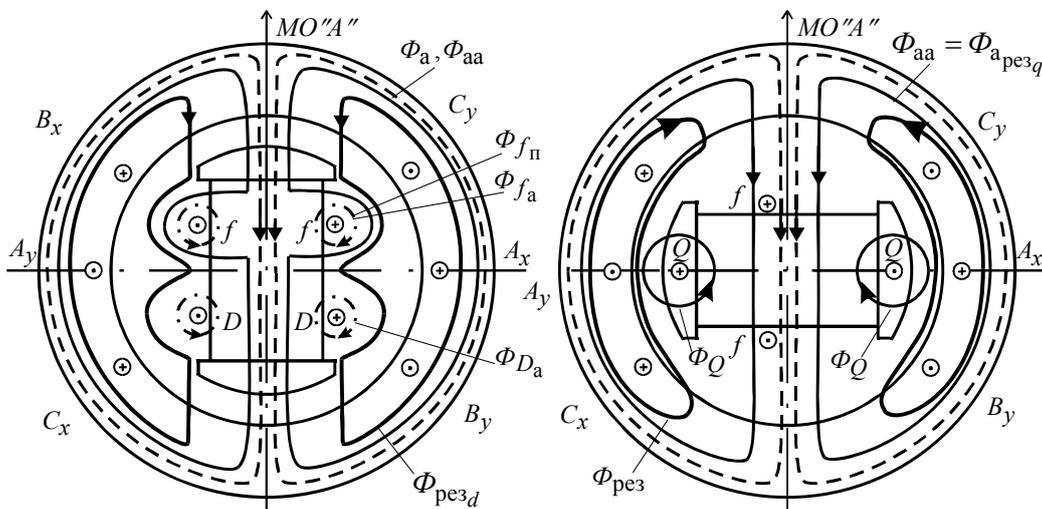


Рис. П.3.4. Распределение магнитных полей в СМ при трехфазном к.з. на ее зажимах:

Пояснения к рис. П.3.4:

-----	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_a - \text{поле периодических токов статора в установившемся режиме;} \\ \Phi_{aa} - \text{неподвижное поле аperiodических статорных токов} \end{array} \right.$
-----	
-----	$\left\{ \begin{array}{l} - \text{поле аperiodических токов продольных роторных контуров: ОВ} - \Phi_{f_a} \text{ и } D - \Phi_{D_a}; \\ - \text{поле периодических токов } \Phi_{f_{\Pi}}, \Phi_{D_{\Pi}}; \end{array} \right.$
-----	
-----	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{a_{резq}} - \text{результатирующее магнитное поле (взаимодействие поля периодических токов статора и аperiodических токов ОВ);} \\ \Phi_{рез} - \text{результатирующее магнитное поле взаимодействия продольной составляющей неподвижного статорного поля и } \Phi_{f_{\Pi}} \end{array} \right.$
-----	
	$\Phi_Q$ - поле поперечной демпферной обмотки;
	$\Phi_{резd}$ - результирующее статорное поле по продольной оси.

По мере затухания тока  $i_{f_a}$  в роторе поле статора постепенно проникает в сталь ротора и условия его создания улучшаются – требуется меньшая намагничивающая сила токов статора.

Энергия поля переходит в тепловую – и процесс затухает. Переходный аperiodический ток  $i_{f_a}(t)$  в обмотке возбуждения уменьшается до некоторого постоянного значения, зависящего от напряжения возбудителя. Периодические составляющие статорных токов  $i_{\Pi k}(t)$  также уменьшаются до установившегося значения.

Постоянная времени затухания зависит от активного сопротивления обмотки возбуждения  $r_f$ .

Аperiodические составляющие фазных токов  $i_{ак}(t)$  создают неподвижное относительно статора поле ( $\Phi_{aa}$ ), которое во вращающемся роторе (обмотке возбуждения) индуцирует периодическую ЭДС и периодическую составляющую тока  $i_{f_{\Pi}}(t)$ . Созданный этим током магнитный поток  $\Phi_{\Pi f}$  почти полностью компенсирует продольную составляющую неподвижного поля статора. Поле потока  $\Phi_{\Pi f}$  проходит по путям рассеяния и не сцепляется с обмотками статора.

Неподвижное поле  $\Phi_{aa}$ , сцепленное с обмотками статора, проходит по пути, зависящем от положения ротора. По мере вращения ротора магнитная проницаемость этого пути изменяется с двойной частотой: при одном повороте ротора поле дважды проходит по  $d$  и дважды по  $q$  осям (рис. П.3.4). Для

поддержания такого поля неизменным намагничивающая составляющая токов статора должна содержать составляющую двойной частоты. В противном случае поле будет колебаться с двойной частотой.

Таким образом, и ток статора должен содержать составляющую двойной частоты  $i_{2\omega}(t)$ .

Следовательно, во время переходного процесса ток фазы статора  $i_A(t)$  будет определяться по формуле вида

$$i_A(t) = i_{A_{\Pi}}(t) + i_{A_a}(t) = i_{A_{\Pi}}(0) + i_{A_{\Pi\omega}}(t) + i_{A_{2\omega}}(t) + i_{A_a}(t), \quad (\text{П.3.1})$$

где  $i_{A_{\Pi}}(0)$  – периодическая составляющая тока – ток предшествующего режима;  $i_{A_{\Pi\omega}}(t)$  – изменение периодической составляющей тока статора, вызываемое изменением напряжения на его зажимах;  $i_{A_{2\omega}}(t)$  – составляющая двойной частоты;  $i_{A_a}(t)$  – аperiodическая составляющая тока статора.

Составляющие  $i_{A_a}(t)$ ,  $i_{A_{2\omega}}(t)$  одновременно затухают до нуля по мере затухания неподвижного поля статора. Составляющая  $i_{A_{\Pi\omega}}(t)$  затухает до установившегося значения, в соответствии с чем аperiodическая составляющая тока ротора затухает также до установившегося значения. Периодическая составляющая роторного тока затухает до нуля одновременно с составляющими  $i_{A_a}(t)$  и  $i_{A_{2\omega}}(t)$  – рис. П.3.5.

Наличие демпферных обмоток исказит картину поля в СМ. Более сложным образом происходит затухание периодических составляющих токов статора и

соответствующих им аperiodических составляющих токов роторных контуров, поскольку постоянные времени демпферных контуров значительно меньше постоянной времени ОВ. Влияние демпферных контуров при  $\omega_r \approx \omega_c$  сказывается на начальной стадии переходного процесса: после затухания демпферных токов переходный процесс в СМ протекает так же, как и при отсутствии демпферных контуров (рис. П.3.4). В продольной оси вытеснение

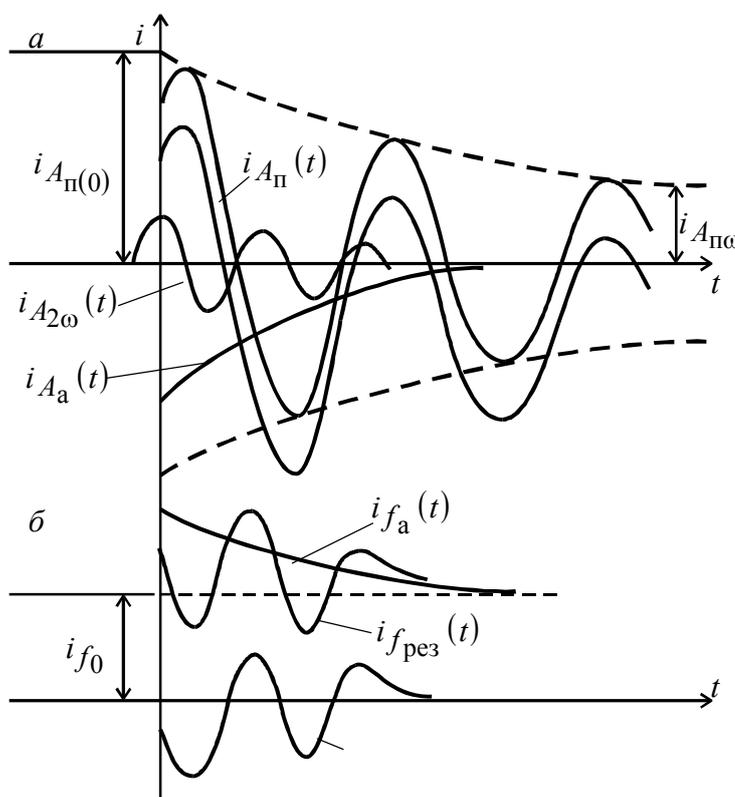


Рис. П.3.5. Изменение токов статора (а) и ротора (б) во время переходного процесса

поля статора происходит дополнительно и за счет действия демпферных продольных обмоток  $D$ . В поперечной оси –  $Q$ .

Распределение магнитных полей в СМ показывает, что условия их прохождения различны в продольной и поперечной осях СМ, поэтому параметры СМ – индуктивные сопротивления, которыми она представляется в переходном процессе, различны по продольной и поперечной осям и в разные моменты времени переходного процесса.

В установившемся режиме магнитный поток статора  $\Phi_a$  замыкается по ротору и частично по путям рассеяния статорной обмотки. Сопротивление для магнитного потока на этом пути мало, а индуктивное сопротивление – большое:  $x_d$  – синхронное индуктивное сопротивление СМ по продольной оси;  $x_q$  – синхронное индуктивное сопротивление СМ по поперечной оси.

Вытеснение магнитного потока статора на пути рассеяния в переходном процессе увеличивает магнитное сопротивление и уменьшает индуктивное до  $x_d''$  (сверхпереходное индуктивное сопротивление СМ по продольной оси – совместное воздействие ОВ и  $D$ ),  $x_d'$  (индуктивное переходное сопротивление СМ по продольной оси – воздействие ОВ),  $x_q''$  (сверхпереходное индуктивное сопротивление СМ по поперечной оси – воздействие  $Q$ ).

Таким образом, сопротивления СМ во время переходного процесса могут изменяться в пределах от  $x_d''$  до  $x_d$  и от  $x_q''$  до  $x_q$  ( $x_d'' < x_d' < x_d$ ;  $x_q'' < x_q$ ) – рис.

П.3.6.

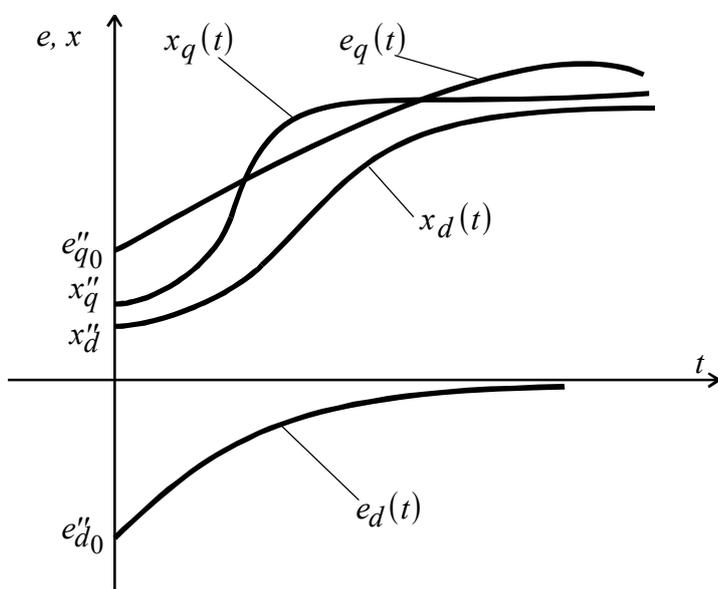


Рис. П.3.6. Изменение сопротивлений и ЭДС СМ в переходном процессе

ЭДС СМ также изменяются в переходном процессе. В установившемся режиме СМ представляемая синхронной поперечной ЭДС  $E_{q0} \equiv i_f$ . При внезапном изменении напряжения на зажимах СМ ЭДС  $E_{q0}$  скачком изменяется до значения  $E_{q0}''$  – сверхпереходной поперечной ЭДС (рис. П.3.6), а затем вновь возрастает до установившегося значения. Продольная ЭДС  $E_d(t)$  в установившемся режиме равна

нулю. Ее значение в начальный момент времени переходного процесса  $E_{d0}''$  (см. рис. П.3.6).

В точке к.з. СМ вследствие изменения сопротивления и ЭДС меняется и периодическая составляющая тока к.з. от начального значения в  $I_{ПК}''(t=0)$  сверхпереходного тока, определяемого при сопротивлениях  $x_d''$ ,  $x_q''$  и ЭДС  $E_{q0}''$ ,

$E''_{d0}$ , до установившегося  $I_{пк} (x_d, x_q, E_{q0})$ . Точное определение тока к.з. весьма затруднительно.

При переходе к схемам с несколькими генераторами задача усложняется. Появляется необходимость учета взаимного влияния СМ, поведения присоединенных нагрузок, качаний, работы устройств автоматики и т.д.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### ЗАДАНИЕ 1. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Для электрической системы, упрощенная принципиальная схема которой показана на рис. П.4.1, выполнить расчет трехфазного к.з.  $K^{(3)}$  в указанной точке.

При расчете определить:

- значения периодической и аperiodической составляющих тока к.з. для моментов времени 0; 0,25; 0,5 с;
- ударный ток к.з.;
- распределение токов по ветвям схемы и значения напряжений в ее узлах для начального момента времени к.з.

#### Общие указания к выполнению задания 1

Номер варианта задается преподавателем по таблице вариантов двумя номерами. По номеру 1 определяют параметры оборудования по табл. П.4.1–П.4.3, по номеру 2 определяют параметры оборудования по табл. П.4.4.

В табл. П.4.1 задан номер точки симметричного к.з. и вид несимметричного к.з., в табл. П.4.2 и П.4.3 приведены характеристики системы (рабочее напряжение и мощность трехфазного к.з. на шинах системы, заданная при указанном рабочем напряжении), характеристики нагрузок, длина ЛЭП и справочные данные для автотрансформатора связи.

В табл. П.4.4 заданы номинальные параметры турбогенераторов и силовых трансформаторов, а также количество параллельных блоков на станции.

Сопротивление системы до шин 220 кВ определяется по мощности к.з. (табл. П.4.2).

Т а б л и ц а П . 4 . 1

*Выбор точки симметричного к.з.*

Параметры	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид несимметричного к.з.	1	1	1	2	1,1	1,1	1,1	1,1	2	2
Точка к.з.	К-1	К-2	К-3	К-4	К-5	К-1	К-2	К-3	К-4	К-5

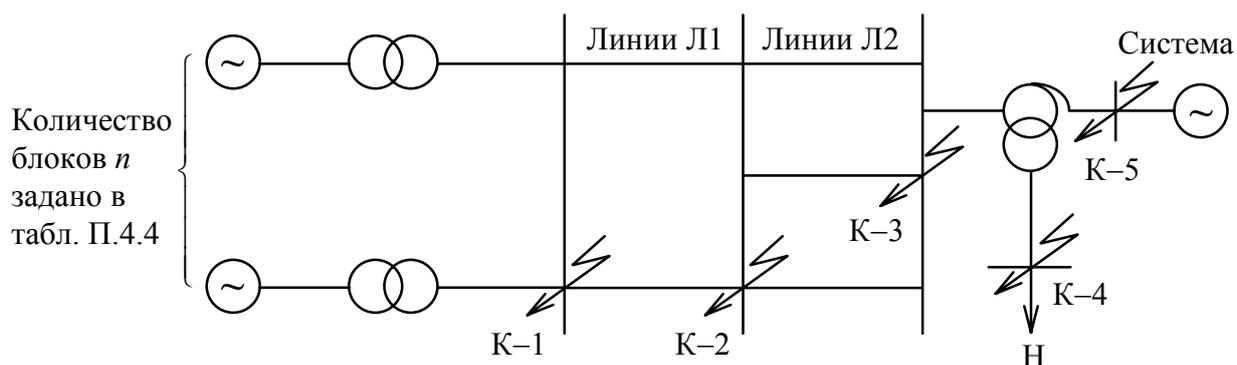


Рис. П.4.1. Принципиальная схема сложной электрической сети

### Методические указания к выполнению задания 1

1. При расчетах к.з. следует учитывать электрическую симметрию схемы замещения, объединяя находящиеся в одинаковых условиях источники с соответствующим изменением сопротивлений.
2. Основные допущения, принимаемые при расчетах к.з. в сетях напряжением выше 1 кВ приведены в п. 1.1.1 учебного пособия.
3. Исполнение линий Л1 – одноцепные со стальным тросом, сечение АС–240. Исполнение линий Л2 – одноцепные без троса, сечение АС–300.
4. Расчет периодической составляющей тока к.з. выполняется по типовым кривым. Аперриодическая составляющая тока к.з. определяется приближенно по данным, приведенным в табл. П.4.5.
5. Исходный режим работы электрической системы - номинальный.
6. Результаты расчетов должны быть определены в именованных единицах на соответствующих ступенях напряжения.

Т а б л и ц а П . 4 . 2

*Характеристики системы, нагрузки и длины ЛЭП*

Номер варианта	Система		Нагрузка, МВ·А	Длина ЛЭП, км	
	$U_C$ , кВ	$S_{КЗ}$ , МВ·А		Л1	Л2
0	220	2500	40	70	30
1	228	2400	52	75	55
2	230	2300	55	80	50
3	222	2200	60	60	45
4	218	2100	57	70	65
5	225	2600	45	80	55
6	215	2550	35	60	50
7	226	2650	25	40	45
8	227	2750	30	55	35
9	232	2850	36	75	40

Таблица П.4.3

## Автотрансформатор связи

Номер варианта	Тип	$S_{НОМ}$ , МВА	Напряжение, кВ			$U_K$ , %		
			ВН	СН	НН	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН
0	АТДЦТН-63000/220	63	230	121	6,6	11	35	22
1	АТДЦТН-125000/220	125	230	121	11	11	45	28
2	АТДЦТН-200000/220	200	230	121	11	11	32	20
3	АТДЦТН-250000/220	250	230	121	10,5	11	32	20
4	АТДЦТН-200000/220	200	230	121	11	11	32	20
5	АТДЦТН-125000/220	125	230	121	11	11	45	28
6	АТДЦТН-200000/220	200	230	121	11	11	32	20
7	АТДЦТН-63000/220	63	230	121	6,6	11	35	22
8	АТДЦТН-125000/220	125	230	121	11	11	45	28
9	АТДЦТН-63000/220	63	230	121	11	11	32	20

Таблица П.4.4

## Характеристики оборудования и количество блоков на станции

Номер варианта	Количество блоков	Турбогенераторы ТГ								
		Тип турбогенератора	$S_{НОМ}$ , МВ·А	$U_{НОМ}$ , кВ	$x_d$ , о.е.	$x'_d$ , о.е.	$x''_d$ , о.е.	$I_{НОМ}$ , кА	$GD^2$ , т·м <sup>2</sup>	$\cos\varphi_{НН}$
0	5	ТВС-32-2УЗ	40	6,3	2,458	0,238	0,143	3,667	5,4	0,8
1	2	ТВФ-63-2УЗ	78,75	6,3	1,915	0,275	0,203	7,21	9,7	0,8
2	4	ТВС-32-2УЗ	40	10,5	2,648	0,26	0,153	2,2	5,4	0,8
3	3	ТВФ-110-2ЕУЗ	137,5	10,5	2,04	0,271	0,189	7,56	13	0,8
4	4	ТВФ-120-2УЗ	125	10,5	1,907	0,278	0,192	6,875	13	0,8
5	3	ТВФ-120-2УЗ	125	10,5	1,907	0,278	0,192	6,875	13	0,8
6	2	ТВФ-63-2УЗ	78,75	6,3	1,915	0,224	0,153	7,21	9,7	0,8
7	4	ТВФ-63-2ЕУЗ	78,75	10,5	1,513	0,202	0,136	4,33	8,85	0,8
8	3	ТВФ-63-2УЗ	78,75	10,5	1,199	0,224	0,153	4,33	9,7	0,8
9	4	ТВС-32-2УЗ	40	6,3	2,458	0,238	0,143	3,667	5,4	0,8

Окончание табл. П.4.4

Номер варианта	Трансформаторы Т				
	Тип	$S_{НОМ}$ , МВ·А	Напряжение, кВ		$U_K$ , %
			ВН	НН	ВН-НН
0	ТД-40000/110	40	121	6,3	10,5
1	ТДЦ-80000/110	80	121	6,3	11
2	ТД-40000/110	40	121	10,5	10,5
3	ТДЦ-125000/110	125	121	10,5	10,5
4	ТДЦ-125000/110	125	121	10,5	10,5
5	ТДЦ-125000/110	125	121	10,5	10,5
6	ТДЦ-80000/110	80	121	6,3	11
7	ТДЦ-80000/110	80	121	10,5	11
8	ТДН-80000/110	80	121	10,5	11
9	ТД-40000/220	40	121	6,3	10,5

Т а б л и ц а П . 4 . 5

Значения  $k_y$  и  $\tau_a$  для наиболее часто встречающихся элементов ЭЭС

Место короткого замыкания и характеристика сети	$\tau_a$	$k_y$
1. Сборные шины 6–10 кВ станций с генераторами мощностью 30–60 МВт	0,127–0,254	1,92–1,96
2. За линейным реактором до 1000 А, присоединенным к сборным шинам по п. 1	0,0634–0,191	1,85–1,95
3. Сборные шины повышенного напряжения станций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А и выше	0,0955–0,191	1,89–1,95
4. То же с трансформаторами 30–100 МВ·А	0,0634–0,159	1,85–1,94
5. Сборные шины вторичного напряжения подстанций с трансформаторами мощностью 100 МВ·А и выше; сопротивление трансформаторов составляет 90 % выше результирующего сопротивления до места к.з.	0,0634–0,127	1,85–1,92
6. То же с трансформаторами мощностью 30–100 МВ·А	0,048–0,0955	1,81–1,89
7. Распределительные сети 6–10 кВ	0,01	1,369
8. Ветви, защищаемые реактором с номинальным током 630 А и ниже	0,1	1,904
9. Турбогенераторы мощностью, МВт: 100–1000 12–60	0,4–0,54 0,16–0,25	1,975–1,98 1,94–1,955
10. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генератора, МВт: 100–200 300 500 800	0,26 0,32 0,35 0,30	1,965 1,977 1,983 1,967
11. Система, связанная с шинами, где рассматривается к.з., воздушными линиями напряжением, кВ: 35 110–150 220–330 500–750	0,02 0,02–0,03 0,03–0,04 0,06–0,08	1,608 1,608–1,717 1,717–1,78 1,85–1,895

### З А Д А Н И Е 2 . ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО К.З., ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Для системы, исходная схема которой приведена на рис. П.4.1, построить схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей в заданной точке короткого замыкания. Точка и вид к.з. выбираются по табл. П.4.1.

Для исследуемой электрической системы определить:

– сопротивления элементов схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей;

– эквивалентные сопротивления различных последовательностей.

Рассчитать симметричные составляющие  $I$  и  $U$  в точке несимметрии и построить векторные диаграммы токов и напряжений в точке несимметрии.

Т а б л и ц а П . 4 . 6

Исполнение воздушной линии электропередачи	$k = \frac{x_0}{x_1}$
Одноцепная линия без троса	3,5
Одноцепная линия со стальным тросом	3,0
Одноцепная линия с хорошо проводящим тросом	2,0
Двухцепная линия без троса	5,5
Двухцепная линия со стальным тросом	4,7
Двухцепная линия с хорошо проводящим тросом	3,0

### З А Д А Н И Е 3 . АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИСХОДНОГО РЕЖИМА ПРОСТЕЙШЕЙ ОДНОМАШИНОЙ СИСТЕМЫ

Выполнить анализ статической устойчивости исходного режима эквивалентной одномашинной электрической системы при условии постоянства напряжения на шинах за автотрансформатором.

Для проведения анализа необходимо:

- построить векторную диаграмму для исходного режима;
- построить угловые характеристики  $P(\delta)$  для эквивалентного синхронного генератора при представлении его различными математическими моделями;
- найти предельный по статической устойчивости режим для различных угловых характеристик эквивалентного синхронного генератора ( $P_{\max}, \delta_{\max}$ );
- выполнить анализ статической устойчивости исходного режима с определением коэффициента запаса статической устойчивости по мощности.

#### Общие указания к выполнению задания 3

1. Схема подключения генератор-трансформатор – блочная.
2. Определить эквивалентные параметры схемы замещения для заданного варианта оборудования станции с учетом количества блоков. Номинальные параметры генераторов приведены в табл. П.4.4.
3. Активную мощность, отдаваемую в систему, определить следующим образом:  $P_0 = P_{\text{ном}} \cdot n$ , где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная активная мощность одного блока,  $n$  – количество блоков, установленных на станции.
4. Реактивную мощность на шинах системы определить, используя номинальный  $\cos \varphi$ .
5. Удельные сопротивления для линий принять равным 0,4 Ом/км, активные сопротивления всех элементов не учитывать.
6. Сопротивления турбогенераторов в установившемся режиме по продольной и поперечной осям принять равными  $x_d = x_q$ .

7. Инерционную постоянную  $\tau_j$  определить, используя маховые моменты генераторов (табл. П.4.4) и турбин (табл. П.4.7).

Т а б л и ц а П . 4 . 7

Параметры	Тип турбины			
	К-50-90	К-100-90	К-150-130	К-200-130
Мощность, МВт	50	100	150	200
Маховый момент, т·м <sup>2</sup>	13,8	18,7	28,5	35

### З А Д А Н И Е 4 . АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В ПРОСТЕЙШЕЙ ОДНОМАШИННОЙ СИСТЕМЕ

1. Для заданного возмущения в ЭС выполнить анализ устойчивости динамического перехода при использовании метода последовательных интервалов.

2. Построить зависимости  $\delta(t)$ ,  $\Delta\omega(t)$ , определить реальный угол отключения аварии для момента времени 0,2 с.

3. Для реального угла отключения аварии проанализировать устойчивость динамического перехода, используя метод «площадей», результаты представить аналитически и графически.

#### Методические указания к выполнению задания 4

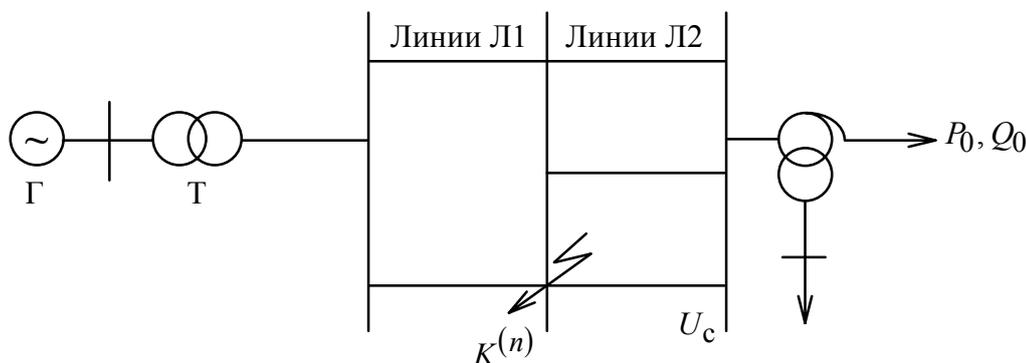


Рис. П.4.2. Эквивалентная схема электрической системы

При выполнении задания 4 следует учесть следующее:

1. Точка короткого замыкания находится на подстанции между линиями Л1 и Л2.

2. Вид короткого замыкания соответствует заданному ранее несимметричному к.з.

3. При анализе динамической устойчивости генераторы замещаются постоянной ЭДС  $E'$  за сопротивлением  $x'_d$ .

4. При составлении схемы замещения нулевой последовательности принять сопротивление нулевой последовательности системы равным сопротивлению прямой последовательности ( $x_{C0} = x_{C1}$ ).

5. При рассмотрении динамического перехода последовательно следует рассмотреть: нормальный режим работы эквивалентной синхронной машины;

аварийный режим (режим к.з.); послеаварийный режим с отключением одной поврежденной ЛЭП Л2.

6. Для каждой фазы динамического перехода следует построить угловые характеристики.

7. Численное интегрирование уравнений движения ротора выполнить с использованием метода последовательных интервалов на промежутке времени от 0 до 0,6 с (с шагом 0,05 с), время ликвидации аварии принять равным 0,2 с.

8. Построить зависимости изменения угла и скорости СГ от времени.

9. Построить площадки ускорения и торможения, соответствующие  $\delta_{\text{откл}}^{\text{реал}}$ , определить значения энергий, соответствующие площадкам ускорения и торможения.

10. Определить предельный угол отключения короткого замыкания используя метод площадей.

*Учебное издание*

Тамара Яковлевна Окуловская  
Татьяна Юрьевна Паниковская  
Валерий Анатольевич Смирнов

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Редактор *И.В. Коршунова*  
Компьютерная верстка *Е.В.Осипова*

ИД № 06263 от 12.11.2001 г.

---

Подписано в печать 01.11.2006	Формат 60 × 1/16		
Бумага писчая	Плоская печать	Усл. печ. л. 4,88	
Уч.-изд. л. 5,6	Тираж 300	Заказ	Цена “С”

---

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО УГТУ–УПИ  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
ЗАО «Наука – сервис»  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19