



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

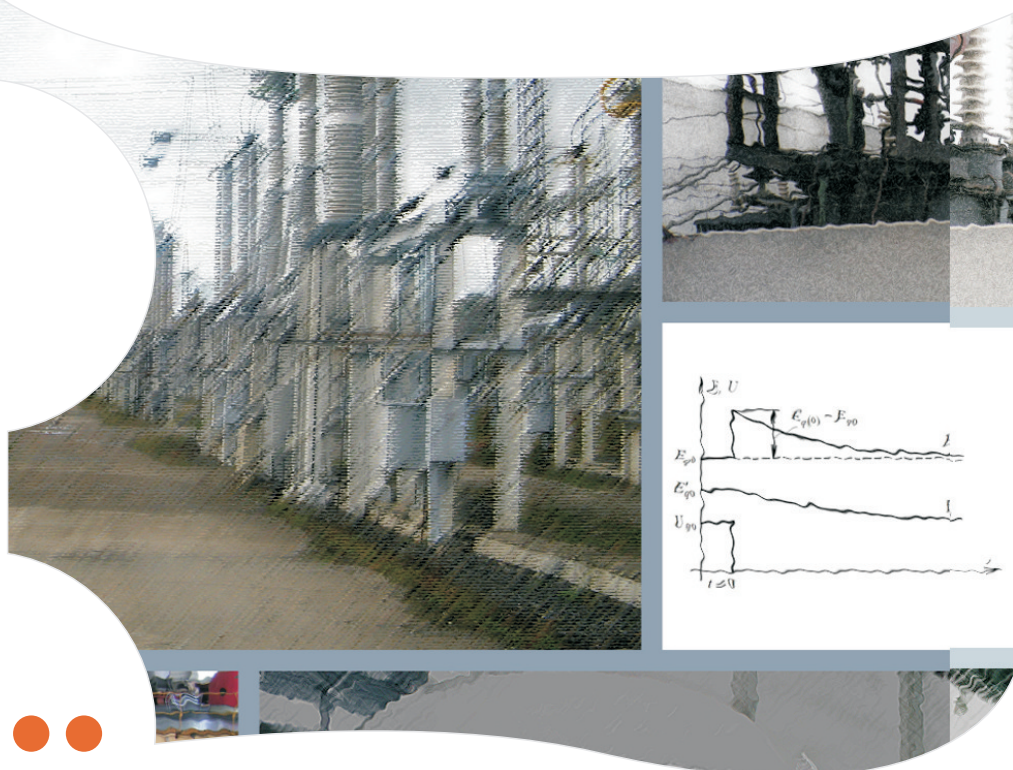
SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

Электронный учебно-методический комплекс

Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах

Учебная программа дисциплины

- **Учебное пособие**
Методические указания по самостоятельной работе
Методические указания к практическим занятиям
Банк тестовых заданий в системе UniTest



Красноярск
ИПК СФУ
2009

УДК 621.31(075)
ББК 32.1я73
Э45

Авторы:
**А. Э. Бобров, А. М. Дяков,
В. Б. Зорин, Л. И. Пилюшенко, Т. М. Чупак**

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» подготовлен в рамках реализации Программы развития федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) на 2007–2010 гг.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;
Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

Э45 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А. Э. Бобров, А. М. Дяков, В. Б. Зорин и др. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – (Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: УМКД № 1515/1138–2008 / рук. творч. коллектива А. Э. Бобров). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 50 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1648-8 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1651-8 (учебного пособия)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320902472 (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах», включающего учебную программу дисциплины, методические указания по практическим занятиям, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. Презентационные материалы».

Рассмотрены основы электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах при симметричных и несимметричных коротких замыканиях и продольной несимметрии. Приведены практические методы расчетов коротких замыканий и оценки параметров элементов электроэнергетических систем в симметричных и несимметричных режимах.

Предназначено для студентов направления подготовки бакалавров 140200.62 «Электроэнергетика» укрупненной группы 140000 «Энергетика, энергетическое машиностроение и электротехника».

© Сибирский федеральный университет, 2009

Рекомендовано к изданию Инновационно-методическим управлением СФУ

Редактор Л. И. Злобина

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения Информационно-телекоммуникационного комплекса СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 30.11.2009

Объем 2 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	7
Вопросы для самопроверки	10
2. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ	11
2.1. Трёхфазное короткое замыкание в простейшей неразветвлённой цепи	11
2.2. Ударный ток короткого замыкания	16
2.3. Действующее значение полного тока короткого замыкания	20
2.4. Характеристики двигателей и нагрузки в начальный момент внезапного нарушения режима	22
2.5. Приближённый учёт системы	24
2.6. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания	27
2.6.1. Общие замечания	27
2.6.2. Определение начального значения периодической составляющей и ударного тока короткого замыкания	29
2.6.3. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания	34
2.7. Определение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени	38
2.8. Алгоритм определения периодической составляющей аварийного тока в произвольный момент времени по типовым кривым	43
2.10. Влияние АРВ генераторов на установившийся режим короткого замыкания	49
Вопросы для самопроверки	54
3. Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи	55
3.1. Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов	55
3.1.1. Общие сведения. Образование высших гармоник	55
3.1.2. Некоторые положения метода симметричных составляющих	57



3.1.3. Применение метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов	61
3.2. Параметры элементов электроэнергетических систем для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.....	62
3.2.1. Параметры синхронных машин	63
3.2.2. Параметры асинхронных электродвигателей	65
3.2.3. Параметры обобщенной нагрузки	66
3.2.4. Схемы замещения и параметры трансформаторов и автотрансформаторов	67
3.2.5. Параметры воздушных линий электропередачи	74
3.3. Схемы отдельных последовательностей.....	79
3.3.1. Схемы прямой и обратной последовательностей.....	79
3.3.2. Схема замещения нулевой последовательности.....	81
3.4. Распределение и трансформация токов и напряжений	82
3.5. Однократная поперечная несимметрия.....	86
3.5.1. Однофазное короткое замыкание	87
3.5.2. Двухфазное короткое замыкание на землю.....	90
3.5.3. Двухфазное короткое замыкание.....	94
3.5.4. Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии.....	97
3.5.5. Комплексные схемы замещения	99
3.5.6. Сравнение видов короткого замыкания	100
3.6. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока несимметричного короткого замыкания.....	104
3.7. Однократная продольная несимметрия	106
3.7.1. Разрыв одной фазы	106
3.7.2. Разрыв двух фаз.....	112
3.7.3. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии.....	115
Вопросы для самопроверки.....	116
4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	118
4.1. Однофазное замыкание на землю.....	118
4.2. Расчёт токов коротких замыканий в установках напряжением ниже 1000 В.....	124
Вопросы для самопроверки.....	130
5. Начальный момент внезапного нарушения режима	131
5.1. Баланс магнитных потоков.....	131
5.2. Переходные ЭДС и реактивности СМ.....	137

5.3. Сверхпереходные ЭДС и индуктивные сопротивления СМ.....	140
5.4. Сравнение реактивностей синхронной машины	148
5.5. Допущения, принимаемые при выводе уравнений электромагнитного переходного процесса	149
5.6. Исходные уравнения.....	150
5.7. Индуктивности обмоток синхронной машины	152
5.8. Линейные преобразования	155
5.9. Замена переменных (преобразование трехфазной машины в двухфазную)	158
5.10. Уравнения Горева – Парка.....	163
5.11. Уравнение обмотки возбуждения	167
5.12. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины.....	168
Вопросы для самопроверки	173
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	176

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров и специалистов электроэнергетического профиля в соответствии с государственным стандартом по базовой дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах», предусмотренной учебными планами высших учебных заведений, занимающихся подготовкой специалистов в области энергетики.

Предлагаемое учебное пособие отражает содержание лекций, читаемых авторами в течение многих лет в Политехническом институте Сибирского федерального университета (ранее Красноярском государственном техническом университете) для студентов специальностей: «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» всех видов обучения: дневного, вечернего и заочного.

Цель данного учебного пособия – дать студентам необходимые знания в области анализа аварийных режимов при эксплуатации электроэнергетических систем.

При написании учебного пособия авторы опирались на фундаментальные труды ученых: Н. Н. Щедрина, С. А. Ульянова, И. П. Крючкова, Б. Н. Неклепаева и др.

Учебное пособие включает пять глав. В первой главе даны общие понятия и определения, приведены наиболее вероятные причины возникновения переходных процессов и их последствия, а также упрощающие решения большинства практических задач, допущения.

Во второй главе рассмотрен расчет переходных процессов в ЭЭС при симметричном трехфазном КЗ. Приведены основные соотношения для определения периодической и апериодической составляющих тока КЗ, ударного, действующего и наибольшего действующего тока КЗ. Представлены также практические методы расчета токов трехфазного КЗ.

В третьей главе исследованы несимметричные электромагнитные переходные процессы при однократной продольной и поперечной несимметрии, дан их расчет.

В четвертой главе приведены особенности расчета токов замыканий в распределительных сетях 6–35 кВ и в системах электроснабжения до 1000 В.

В пятой главе представлен начальный момент внезапного нарушения режима работы синхронной машины.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

При всяком изменении состояния электроэнергетической системы (ЭЭС) происходят переходные процессы. Под переходным процессом понимают процесс перехода от одного режима работы ЭЭС к другому, чем-либо отличающемуся от предыдущего.

Электроэнергетическая система – это находящееся в данный момент в работе электрооборудование энергосистемы и приёмников электрической энергии, объединённое общим режимом и рассматриваемое как единое целое в отношении протекающих в нём физических процессов (ГОСТ 21027–75).

Энергосистема – это совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединённых между собой и связанных общностью режимов и непрерывных процессов производства, преобразования и распределения электрической энергии и тепла при общем управлении этим режимом.

Поскольку в ЭЭС происходят непрерывные и случайные изменения нагрузок, то, строго говоря, в полном понимании термина установившегося режима ЭЭС не существует. Следовательно, режим ЭЭС – это цепь непрерывных переходных процессов

Режим работы энергосистемы – состояние энергетической системы, характеризующееся совокупностью условий и величин, в какой-либо момент времени или на интервале времени.

Переходный процесс характеризуется изменением электромагнитного состояния элементов ЭЭС, напряжений, токов, мощностей, моментов, частоты, углов сдвига между ЭДС источников и напряжениями в разных узлах системы. Изменения состояния системы характеризуются нарушением баланса между электромагнитным и механическим моментами на валу каждой вращающейся машины. Вследствие относительно большой механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями.

При решении большинства практических задач переходный процесс принимают состоящим из ряда процессов, характеризующих изменение определенной группы параметров. В одну группу выделяют электромагнитные переходные процессы, в другую – электромеханические переходные процессы.

Изучение переходных процессов дает: ясное представление о причинах возникновения и физической сущности явлений; знание основных математических выражений, описывающих эти явления, терминологии и определений; возможность использования практических критериев и методов их количественной оценки с целью прогнозирования и предотвращения опасных последствий этих процессов; навыки расчета переходных процессов.

Наиболее распространенными переходными процессами являются процессы, вызванные:



- включением и отключением электродвигателей и других потребителей электроэнергии;
- короткими замыканиями (КЗ) в ЭЭС, а также повторным включением или отключением короткозамкнутой цепи;
- возникновением местной несимметрии;
- действием форсировки возбуждения синхронных машин, а также их развозбуждением (гашением их магнитного поля);
- несинхронным включением синхронных машин и др.

Коротким замыканием называется всякое, не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралью или четырёхпроводных – замыкание фаз на землю или на нулевой провод.

В трехфазных системах переменного тока при работе с заземленными нейтралью различают следующие виды КЗ:

1) симметричное трехфазное КЗ – замыкание трех фаз между собой (на схемах место и вид короткого замыкания обозначают « $K^{(3)}$ »), система остается симметричной, вероятность возникновения КЗ по статистике 1–7 %;

2) несимметричные КЗ:

- однофазное КЗ – замыкание одной фазы на землю ($K^{(1)}$) при заземленных нейтралью трансформаторов и автотрансформаторов, вероятность возникновения составляет 60–92 %; замыкание одной фазы на землю при изолированных нейтралью называют однофазным замыканием на землю ($Z^{(1)}$);
- двухфазное КЗ – замыкание двух фаз между собой ($K^{(2)}$), вероятность возникновения 2–13 %;
- двухфазное КЗ на землю – замыкание двух фаз между собой и в той же точке на землю ($K^{(1,1)}$), вероятность возникновения 5–20 %.

Несмотря на малую вероятность возникновения трехфазных КЗ, с ними следует считаться, так как они могут быть решающими для окончательного суждения о возможности работы ЭЭС в условиях КЗ. Трехфазные КЗ характеризуются относительной простотой расчёта по сравнению с несимметричными замыканиями. Умение рассчитывать трехфазные КЗ необходимо ещё и потому, что расчет несимметричных КЗ на основе метода симметричных составляющих сводится к расчету некоторого фиктивного трехфазного КЗ.

Возникновение коротких замыканий связано с нарушением изоляции электрооборудования, вызванного старением изоляционных материалов, перенапряжениями, недостаточно тщательным уходом за оборудованием и непосредственными механическими повреждениями (обрыв кабельных линий при выполнении земляных работ, обрыв воздушных линий (ВЛ) подъемными кранами, нарушение изоляции животными или птицами и т. п.).

Короткие замыкания вызывают снижение напряжений в отдельных узлах ЭЭС и увеличение токов в цепях электроустановок, примыкающих к месту возникновения КЗ, до значений, превосходящих наибольший допустимый

ток продолжительного режима. Кроме того, происходит искажение симметрии трехфазной системы напряжений, особенно вблизи КЗ. Последствиями КЗ являются дополнительный нагрев токоведущих элементов и проводников, а также значительные электромеханические (электродинамические) усилия между проводниками. При задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может произойти нарушение устойчивости ЭЭС, что является одним из наиболее опасных последствий короткого замыкания, так как оно отражается на работе всей ЭЭС.

Расчеты токов КЗ и остаточных напряжений проводят для сопоставления, оценки и выбора схемы электрических соединений, аппаратов и проводников; определения условий работы потребителей электроэнергии при аварийных режимах; проектирования и настройки релейной защиты и автоматики; анализа устойчивости работы ЭЭС; выбора числа заземленных нейтралей и их размещения и ряда других практических задач. Расчеты токов КЗ в современных ЭЭС с учетом всех условий представляют сложную и трудоемкую задачу, решаемую с применением ЭВМ. Для упрощения задачи принимается ряд допущений, которые не вносят существенных погрешностей в расчеты. Такими допущениями являются:

1. Отсутствие качаний синхронных машин на начальной стадии переходного процесса (скорость вращения роторов всех синхронных генераторов при КЗ не изменяется); это позволяет вводить источники питания в схему замещения векторами ЭДС без сдвига по фазе.

2. Отсутствие насыщения магнитных систем, что позволяет считать все системы линейными.

3. Сохранение симметрии трехфазной системы (несимметричные КЗ считаются локальными); расчёт проводится на одну фазу.

4. Пренебрежение активными сопротивлениями элементов ЭЭС (активные сопротивления учитываются при оценке постоянных затухания апериодических составляющих токов КЗ, расчетах аварийных токов в низковольтных установках, в протяженной кабельной сети или воздушной сети с проводами небольшого сечения, $X/R < 3$).

5. Приближенный учет нагрузок индуктивными сопротивлениями.

6. Неучёт ёмкостных проводимостей ЛЭП 110–220 кВ, если их длина более 200 км, и напряжение 330–500 кВ, если их длина не превышает 150 км.

7. Пренебрежение токами намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов, за исключением трёхстержневых трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Y или Y_0/Y_0 в схемах нулевой последовательности.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под переходным процессом?
2. Что общего в понятиях «электроэнергетическая система» и «энергосистема»? Чем они отличаются?
3. Что означает понятие «режим работы энергосистемы»?
4. Чем характеризуется переходный процесс?
5. Какова цель расчёта электромагнитного переходного процесса?
6. Что является результатом изучения переходных процессов?
7. Какие наиболее значимые причины возникновения электромагнитного переходного процесса?
8. Что означает понятие «короткое замыкание»?
9. Какие различают короткие замыкания в сетях с заземлёнными и изолированными нейтралью?
10. Какова вероятность возникновения различного вида коротких замыканий?
11. Какие Вы знаете наиболее распространённые электромагнитные переходные процессы, протекающие в электроэнергетических системах?

2. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ТРЁХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

2.1. Трёхфазное короткое замыкание в простейшей неразветвлённой цепи

Симметричную трехфазную цепь с сосредоточенными активными сопротивлениями и индуктивностями, при отсутствии в цепи трансформаторных связей, принято называть простейшей трехфазной цепью.

Рассмотрим установившийся режим простейшей трёхфазной цепи, схема замещения которой представлена на [рис. 2.1](#).

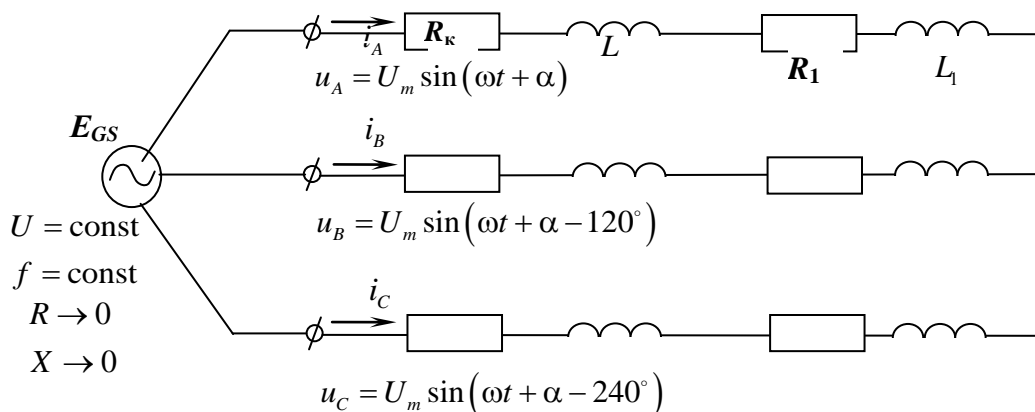


Рис. 2.1. Простейшая трехфазная цепь

Питание рассматриваемой цепи осуществляется от источника неограниченной мощности, характеризуемого постоянством напряжения и частоты. В этой цепи ток, например, фазы A определяется формулой

$$i_A = \frac{U_m}{Z_\Sigma} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_H) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_H),$$

$$\underline{Z}_\Sigma = (R_k + R_1) + j\omega(L + L_1),$$

где U_m – амплитуда напряжения источника; I_m – амплитуда тока в цепи; R – активное сопротивление; L – индуктивность; α – фаза включения; φ_H – аргумент комплексного сопротивления рассматриваемой цепи; ω – угловая частота вращения,

2.1. Трёхфазное короткое замыкание в простейшей неразветвлённой цепи

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2 \cdot 180 \cdot 50 = 18000 \text{ эл. град/с или } \omega_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с,}$$

где f_0 – синхронная частота (50 Гц промышленного тока).

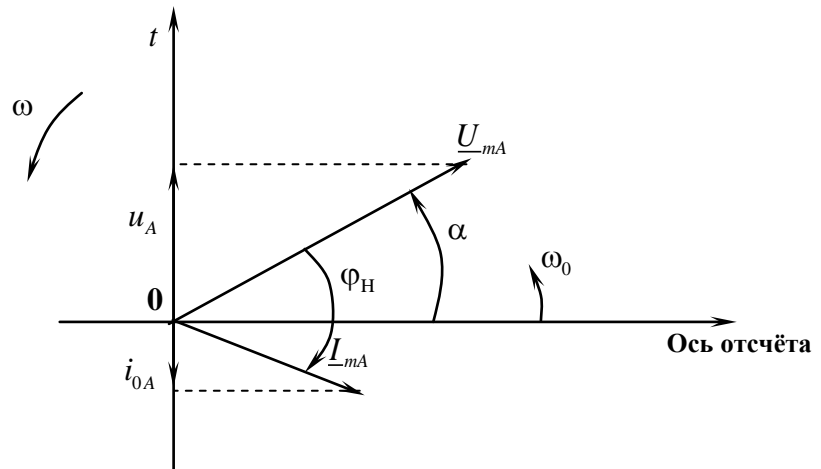


Рис. 2.2. Фрагмент векторной диаграммы установившегося режима

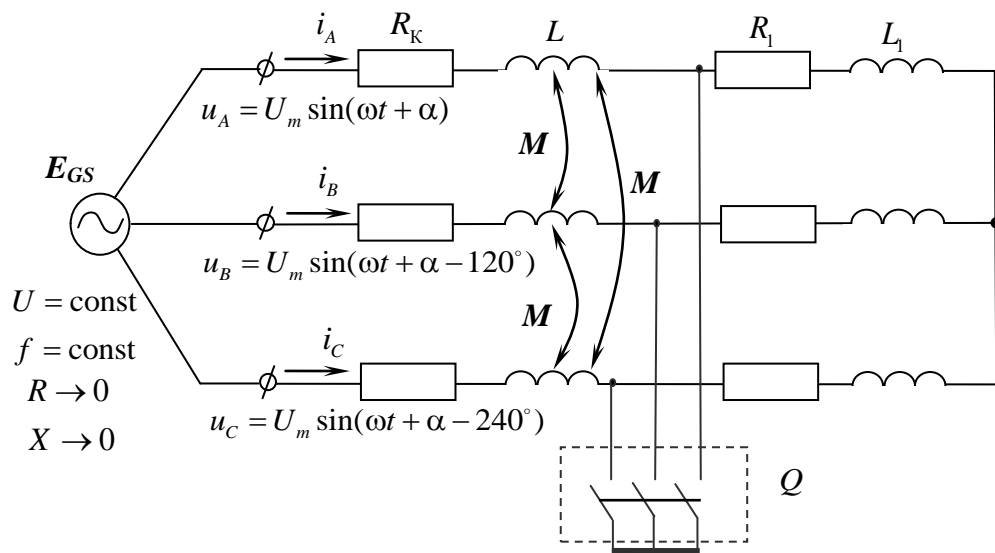


Рис. 2.3. Трёхфазная цепь с выключателем Q

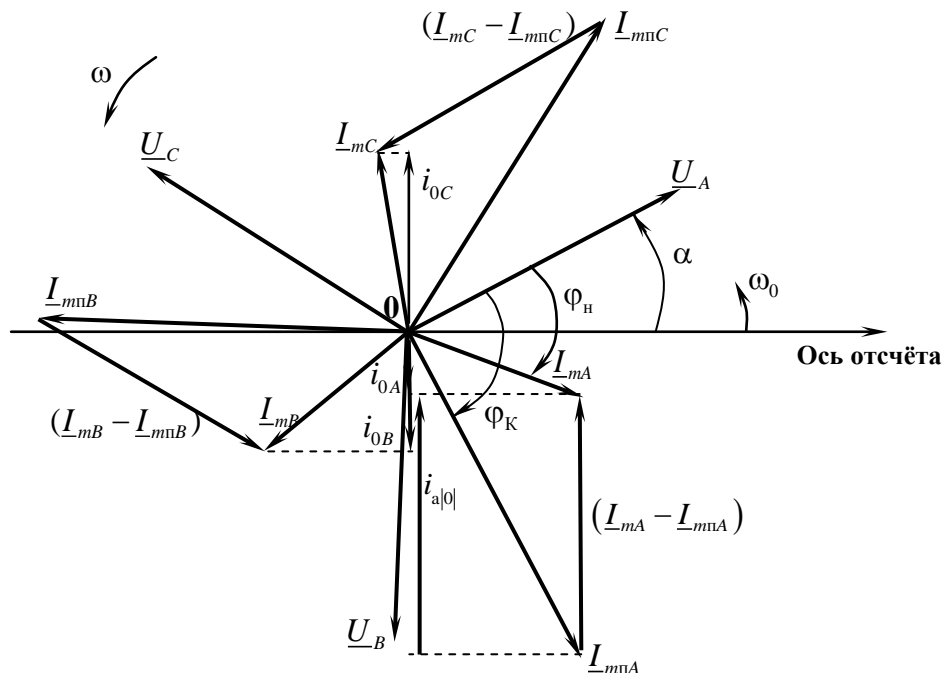


Рис. 2.4. Векторная диаграмма для начального момента трёхфазного КЗ

Фрагмент векторной диаграммы, характеризующей нагрузочный установившийся режим фазы A этой цепи, приведен на [рис. 2.2](#).

На [рис. 2.3](#) показана схема замещения, в которой внезапным включением выключателя Q на коротку создаётся трёхфазное КЗ, векторная диаграмма режимных параметров при котором представлена на [рис. 2.4](#). Участок с сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 оказывается зашунтированным выключателем, напряжение в узле замыкания трёх фаз становится равным нулю. Для этого участка дифференциальное уравнение равновесия имеет вид

$$0 = iR_1 + L_1 \frac{di}{dt}. \quad (2.1)$$

Решение этого дифференциального уравнения:

$$i = i_0 e^{\frac{-t}{T_{a1}}},$$

$$T_{a1} = \frac{L_1}{R_1} = \frac{X_1}{\omega_0 R_1},$$

$$\omega_0 = 314 \text{ c}^{-1},$$

где T_{a1} – постоянная затухания свободного (апериодического) тока, с.

Поскольку ток в цепи с индуктивностью скачком измениться не может, то значение тока в каждой фазе известно; i_{0A}, i_{0B}, i_{0C} – мгновенные значения токов в каждой из фаз до начала КЗ. Ток в зашунтированной части цепи (рис. 2.5) будет существовать до тех пор, пока энергия магнитного потока, запасенная в индуктивности L_1 , не перейдет в тепло, выделяемое на активном сопротивлении R_1 .

Дифференциальное уравнение равновесия, например, для фазы A закороченного участка цепи, т. е. участка, присоединённого к источнику, имеет вид

$$u_A = i_A R_k + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} = i_A R_k + L \frac{di_A}{dt} + M \left(\frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right).$$

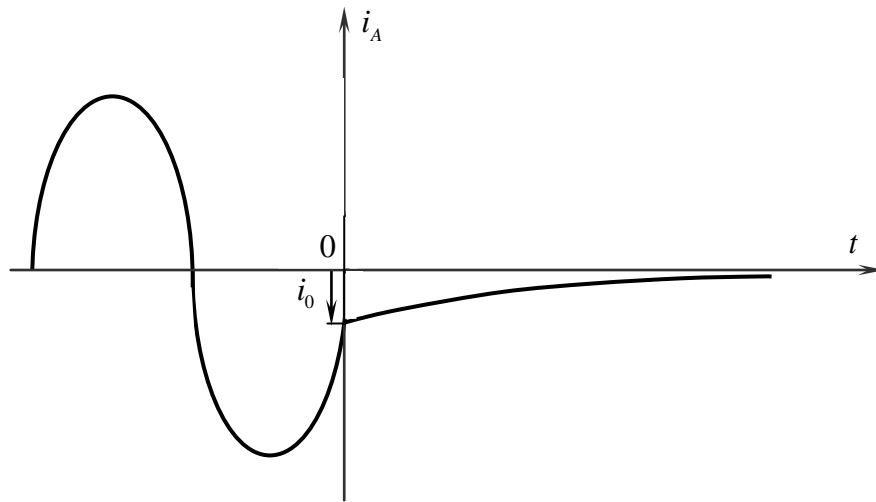


Рис. 2.5. Характеристика изменения тока в зашунтированной части цепи фазы A

Поскольку система токов уравновешенная ($i_A + i_B + i_C = 0$) и, следовательно, $i_B + i_C = -i_A$, то

$$u_A = i_A R_k + L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_A}{dt} = i_A R_k + \frac{di_A}{dt} (L - M) = i_A R_k + L_k \frac{di_A}{dt},$$

где $(L - M) = L_k$ – эквивалентная индуктивность фазы с учетом взаимоиндукции с другими фазами.

Дифференциальное уравнение равновесия ЭДС и падения напряжений (опуская индекс фазы):

$$u = iR_k + L_k \frac{di}{dt}. \quad (2.2)$$

Решение дифференциального уравнения (2.2) имеет вид

$$i = i_{np} + i_c = i_a + i = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (2.3)$$

где

$$i_{np} = I_{m\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k);$$

$$i_a = i_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad Z_k = R_k + j\omega L_k;$$

$$T_a = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega R_k};$$

$$I_{m\Pi} = \frac{U_m}{Z_k};$$

здесь $I_{m\Pi}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока.

При $t = 0$

$$i|0-| = i|0+|,$$

$$i|0-| = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_m \sin(\alpha - \varphi_k),$$

$$i|0+| = I_{m\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a|0|} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_k) + i_{a|0|},$$

$$I_m \sin(\alpha - \varphi_k) = I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_k) + i_{a|0|},$$

$$i_{a|0|} = I_m \sin(\alpha - \varphi_k) - I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_k).$$

Уравнение полного тока КЗ:

$$i_k = i_{np} + i_a = I_{m\Pi} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \sin(\alpha - \varphi_k) - I_{m\Pi} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2.4)$$

2.2. Ударный ток короткого замыкания

Наибольшее возможное мгновенное значение полного тока КЗ называется ударным током. Это значение определяется при наибольших значениях периодической и аperiodической составляющих, которые будут иметь место при условии $\alpha = 0^\circ$ или $\alpha = 180^\circ$, $\varphi_H = 0^\circ$, $\varphi_K = 90^\circ$ в выражении (2.3).

$$i_y = i_{\Pi} + i_a = 2I_{\Pi 0} + 2I_{\Pi 0} e^{-0,01 T_a},$$

$$i_{\Pi|0} + i_{a|0} = 0,$$

$$T = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с}; \quad t = \frac{T}{2} = \frac{0,02}{2} = 0,01 \text{ с},$$

где i_y – ударный ток КЗ; $I_{\Pi 0}$ – начальное значение периодической составляющей тока КЗ; T – период промышленного синусоидального тока.

Способ расчёта ударного тока КЗ зависит от требуемой точности расчёта и конфигурации исходной расчётной схемы.

При расчёте ударного тока КЗ с целью проверки проводников и электрических аппаратов по условиям КЗ допустимо считать, что амплитуда периодической составляющей тока КЗ в момент наступления ударного тока равна амплитуде этой составляющей в начальный момент КЗ. Исключения составляют случаи, когда вблизи расчётной точки КЗ включены асинхронные двигатели.

Рассмотрим примеры получения составляющей $i_{a|0}$ аварийного тока в зависимости от характера нагрузки R , L или C .

В случае, представленном на [рис. 2.6](#), значение аperiodической составляющей тока наибольшее при рассматриваемом положении векторов токов.

В случае, представленном на [рис. 2.7](#), начальное значение аperiodической составляющей больше амплитуды периодической составляющей тока.

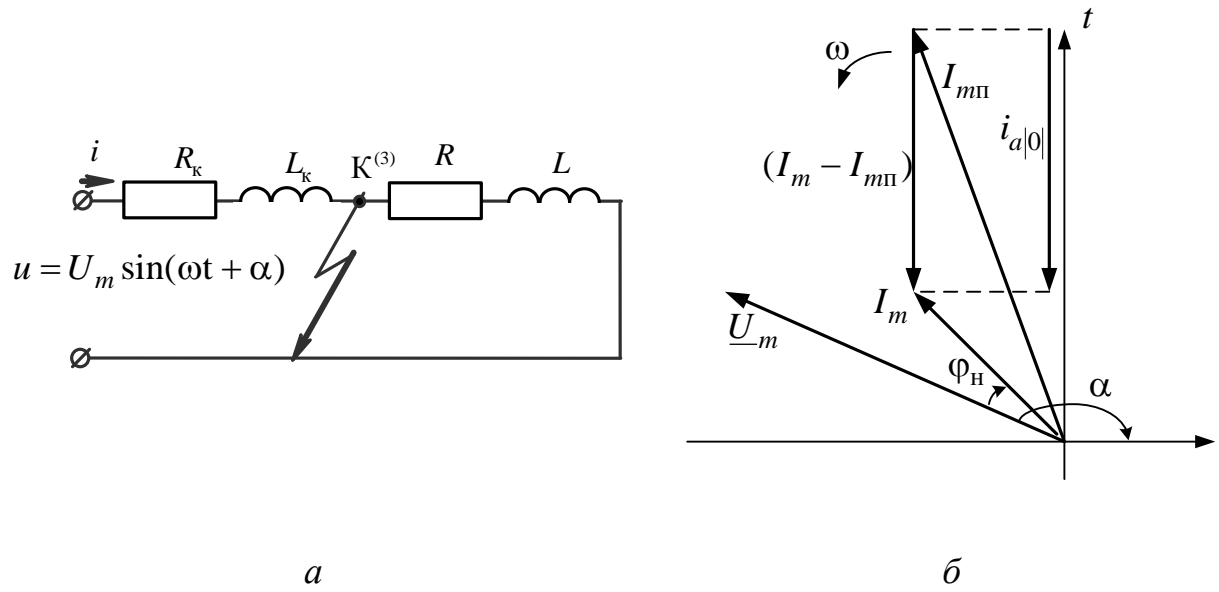


Рис. 2.6. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б)

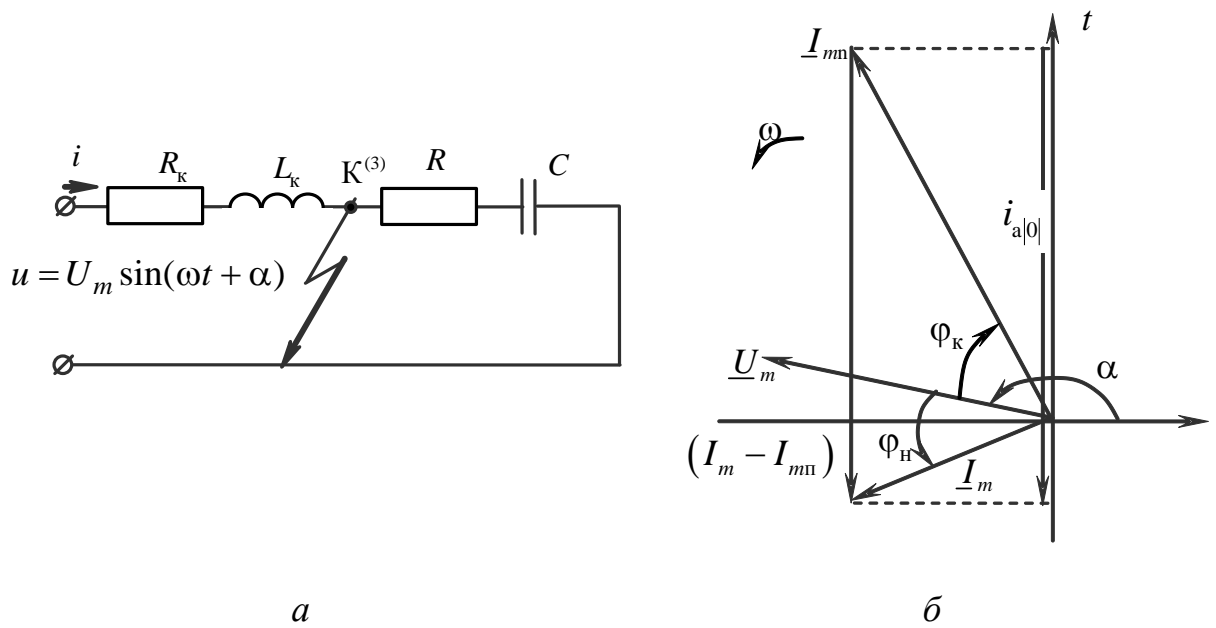


Рис. 2.7. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б)

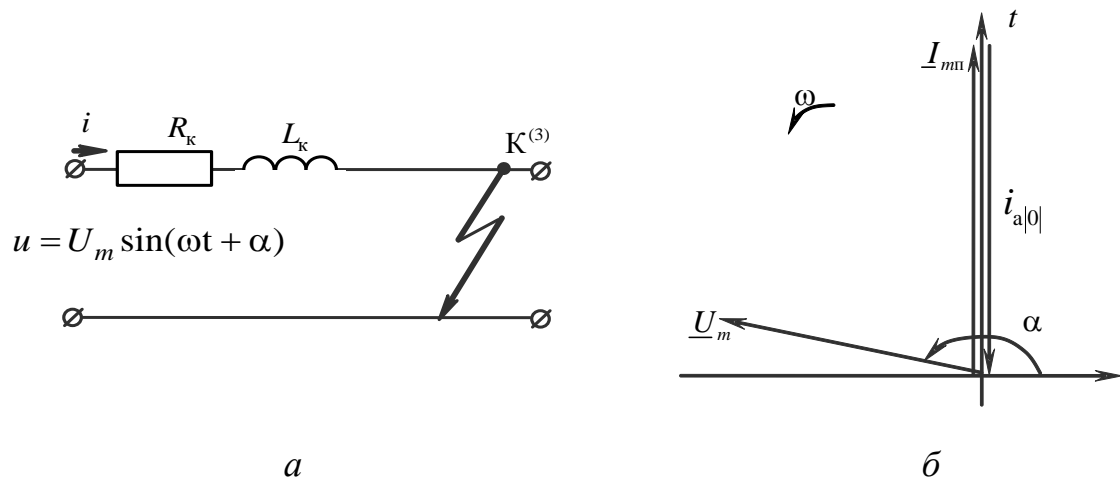


Рис. 2.8. Возникновение КЗ на холостом ходу цепи (а) и векторная диаграмма (б)

Случай возникновения КЗ на холостом ходу (рис. 2.8) принимается за расчетный; ему соответствует осциллограмма (рис. 2.9) возникновения ударного тока при фазе включения α , обеспечивающей прохождение периодической составляющей тока через положительный (или отрицательный) максимум.

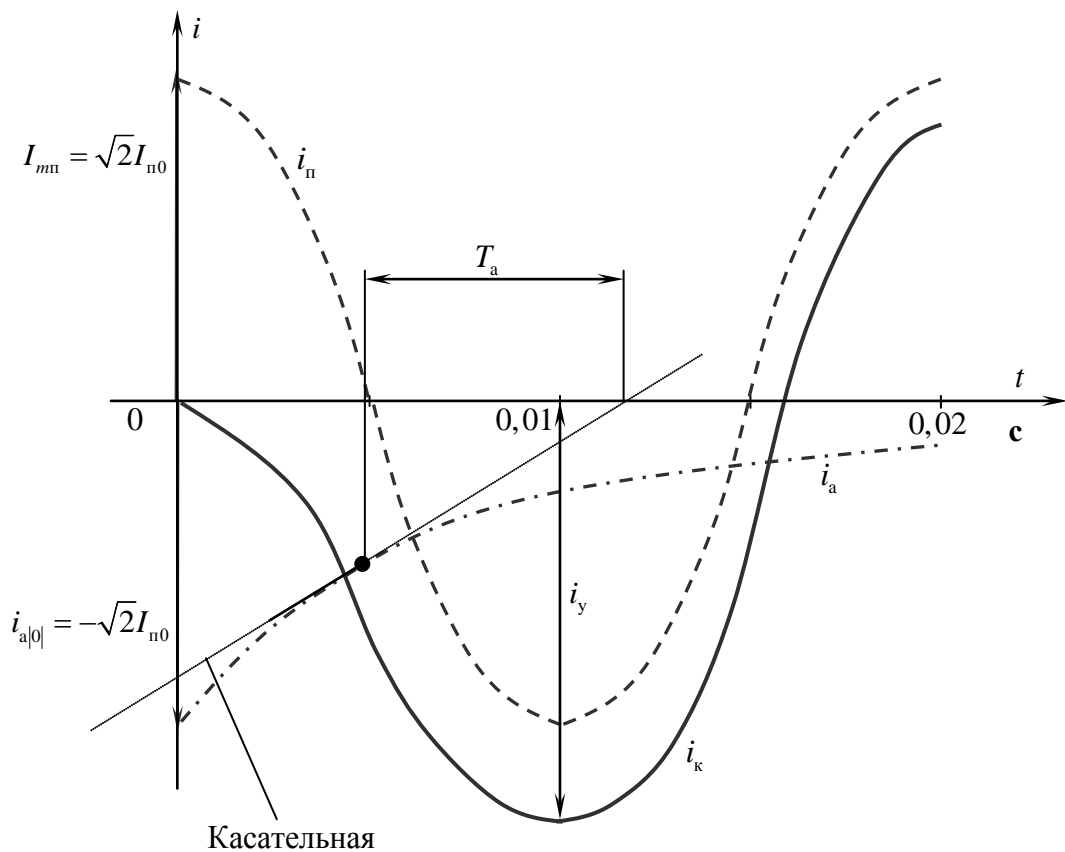


Рис. 2.9. Осциллограмма тока короткого замыкания

$$i_y = \sqrt{2}I_{п0} \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right) = \sqrt{2}I_{п0}k_y,$$

где $k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$ – ударный коэффициент.

Если $L \rightarrow 0$, то $T_a \rightarrow 0$: $\frac{0,01}{0} \rightarrow \infty$, $\frac{1}{e^\infty} \rightarrow 0$ и $k_y \approx 1$. Если $L \rightarrow \infty$, то $T_a \rightarrow \infty$: $\frac{0,01}{\infty} \rightarrow 0$, $e^0 \rightarrow 1$ и $k_y \rightarrow 2$, т. е. $1 \leq k_y < 2$.

Ударный коэффициент показывает, во сколько раз ударный ток² больше амплитуды периодической составляющей аварийного тока; учитывает наличие в полном токе апериодической составляющей тока КЗ. Ударный ток возникает только в одной фазе. По кривой апериодической составляющей можно найти постоянную времени T_a (рис. 2.9). За время $t = T_a$ апериодиче-

² Уменьшение индуктивного сопротивления трансформаторов в режиме КЗ в электрических сетях приводит к увеличению ударного тока КЗ на 30–40 % по сравнению с рассчитываемым без учёта насыщения магнитопровода.

ская составляющая тока КЗ уменьшается в $e = 2,718$ раз или, что то же, до $e^{-1} = 0,368$ своего значения. Кривая апериодической составляющей тока КЗ является криволинейной осью симметрии кривой полного тока $i = f(t)$.

2.3. Действующее значение полного тока короткого замыкания

Из теоретической электротехники известно, что действующее значение переменного тока численно равно значению такого постоянного тока, который за период T синусоидального тока выделяет на сопротивлении такое же количество тепла, что и синусоидальный ток:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

где I_m – амплитудное значение переменного тока; ψ – начальная фаза.

Поскольку в рассматриваемых условиях питание цепи осуществляется от источника неограниченной мощности, то амплитуда тока и действующее значение тока остаются в этих условиях неизменными, причем выбор момента времени начала отсчета произволен. При определении же действующего значения полного тока КЗ необходимо учесть, что этот ток КЗ является несинусоидальным.

Под действующим значением полного тока КЗ в произвольный момент времени будем понимать среднеквадратичное значение полного тока КЗ за один период времени T , в середине которого находится рассматриваемый момент t .

$$I_{kt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i_k^2 dt}.$$

Закон изменения полного тока КЗ представлен формулой (2.4), где $i_k = f(t)$ – сложная функция (рис. 2.10).

Для упрощения вычислений действующего значения полного тока КЗ I_{kt} принимают, что за рассматриваемый период времени T обе слагающие полного тока КЗ не изменяются, т. е. амплитуда периодической составляющей и величина апериодической слагающей за рассматриваемый промежуток времени остаются неизменными и равными значениям соответственно:

$$I_{\text{пт}} = \frac{I_{\text{мпт}}}{\sqrt{2}} \text{ и } I_{\text{ат}} = i_{\text{ат}}.$$

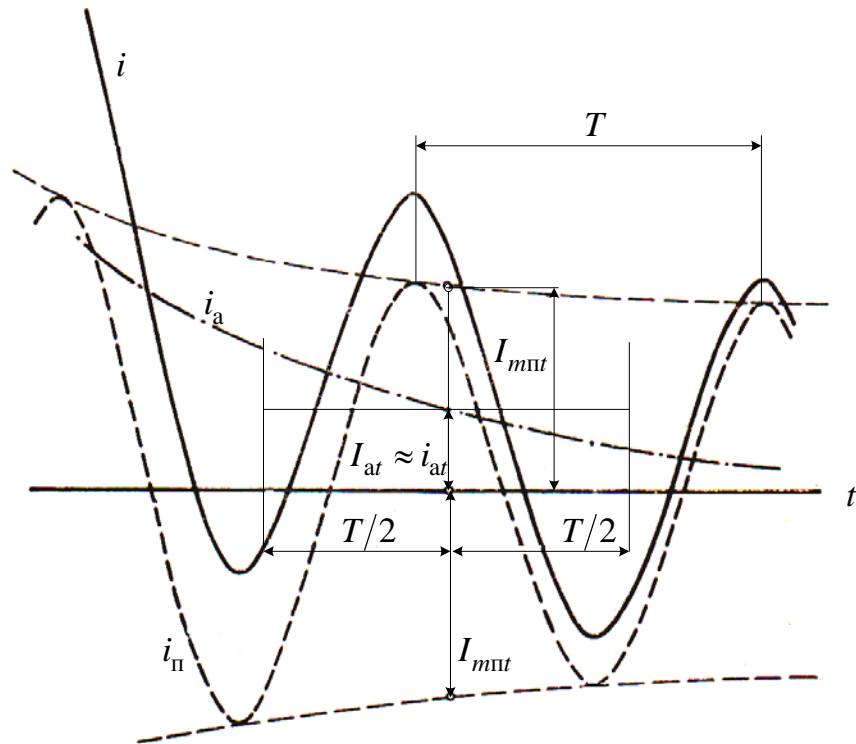


Рис. 2.10. Кривая изменения тока $i_k = f(t)$ для определения действующего значения тока короткого замыкания

Указанное допущение делают для периодической составляющей тока в момент t при питании цепи от источника конечной мощности, так как в реальных условиях амплитуда периодической составляющей, обусловленная таким источником, будет, как и аperiodическая, изменяться во времени.

Действующее значение полного тока

$$I_{\text{кт}} = \sqrt{I_{\text{пт}}^2 + I_{\text{ат}}^2}.$$

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y по аналогии с ударным током определим следующим способом:

$$i_{\text{уп}} = \sqrt{2} I + I_{\text{п}} = \sqrt{2} I k,$$

$$I_{\text{ап}} = \sqrt{2} I k_{\text{п}} - \sqrt{2} I_{\text{п}} = \sqrt{2} I (k - 1)$$

$$I_y = \sqrt{I_{\Pi}^2 + 2I_{\Pi}^2 k_y - 1} = I_{\Pi} \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}.$$

Если ударный коэффициент $k_y \leq 1,3$, то более точной является формула

$$I_{ya} = \sqrt{1 + 50 \cdot T}.$$

При изменении ударного коэффициента в пределах $1 \leq k_y < 2$ величина отношения I_y/I_{Π} находится в пределах $1 \leq I_y/I_{\Pi} < \sqrt{3}$.

На [рис. 2.11](#) представлены кривые изменения отношений I_y/I_{Π} и i_y/I_y в функции k_y . Как видно, отношение i_y/I_y изменяется в сравнительно узких пределах и его максимум ($\sqrt{3}$) наступает при $k_y = 1,5$

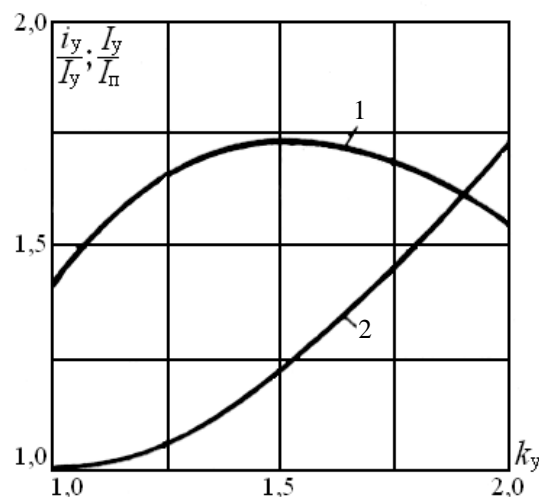


Рис. 2.11. Кривые изменения отношений i_y/I_y (кривая 1 и I_y/I_{Π} (кривая 2) в зависимости от ударного коэффициента k_y

2.4. Характеристики двигателей и нагрузки в начальный момент внезапного нарушения режима

Различие в поведении синхронных двигателей (СД) в начальный момент переходного процесса определяется в сущности величинами их сверхпереходных ЭДС E'' . У перевозбужденного СД, когда он выдает реактивную мощность, сверхпереходная ЭДС выше подведенного напряжения ($E'' > U_0$). Поэтому при любом резком снижении напряжения, вызванном, например, коротким замыканием в сети, от которой питается двигатель, посылаемый им

реактивный ток непременно возрастает. В режиме недовозбуждения, когда двигатель потребляет реактивную мощность, сверхпереходная ЭДС ниже подводимого напряжения ($E_0'' < U_0$). Здесь в зависимости от степени снижения напряжения возможно как продолжение потребления реактивного тока из сети (при $E_0'' < U_{|0|}$), так и генерирование реактивного тока (при $E_0'' > U_{|0|}$). В частном случае, когда $E_0'' = U_{|0|}$, этот ток будет отсутствовать в начальный момент переходного процесса.

Асинхронные двигатели (АД), обычно составляющие основную часть промышленной нагрузки, работают в нормальном режиме с малым скольжением, порядка 2–5 %. Проведенный Н. Н. Щедриным анализ показал, что практически можно пренебречь столь малым скольжением и АД в начале переходного процесса рассматривать как недовозбужденный синхронный двигатель. И, следовательно, для асинхронного двигателя можно установить сверхпереходные реактивность и ЭДС, исходя из неизменности потокосцепления с обмотками ротора (имея в виду в общем случае двигатель с двойной обмоткой на роторе) в начальный момент внезапного нарушения режима.

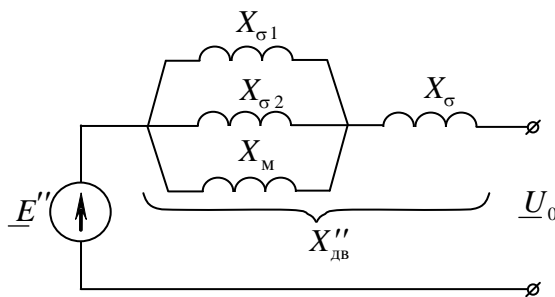


Рис. 2.12. К определению сверхпереходной реактивности АД: X_{σ} , $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$ – сопротивления рассеяния обмоток статора и двух обмоток ротора; X_M – сопротивление взаимной индукции между статором и ротором

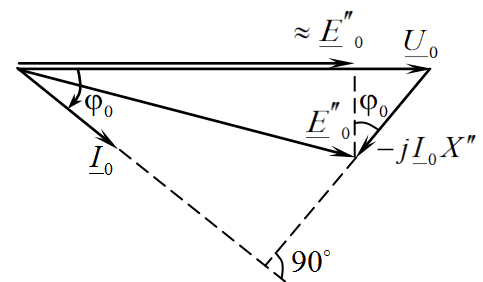


Рис. 2.13. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Сверхпереходная реактивность $X''_{дв}$ двигателя, представляющая собой реактивность короткого замыкания, т. е. когда двигатель заторможен, может быть получена из его схемы замещения (рис. 2.12).

Практически относительную величину сверхпереходного сопротивления АД при номинальных условиях определяют по кратности пускового тока (при пуске без реостата) $K_I = I_{п*} = I_{п} / I_{ном}$

$$X''_{дв} = 1 / K_I.$$

Начальное значение сверхпереходной ЭДС $E''_{|0|}$ двигателя определяется из его предшествующего режима. Векторная диаграмма двигателя для этого режима представлена на [рис. 2.13](#).

В соответствии с векторной диаграммой

$$E''_{|0|} = E''_0 = \sqrt{(U_0 \cos \varphi_0)^2 + (U_0 \sin \varphi_0 - I_0 \cdot X'')^2},$$

или приближенно, принимая ЭДС E''_0 равной проекции вектора этой ЭДС на вектор \underline{U}_0 ,

$$E''_0 \approx U_0 - I_0 \cdot X'' \sin \varphi_0,$$

где U_0 , I_0 , φ_0 – напряжение, ток и угол сдвига между их векторами предшествующего режима.

В практических расчетах начального момента переходного процесса обычно учитывают отдельно лишь крупные по мощности двигатели, которые могут оказать существенное влияние. Остальные двигатели вместе с другими токоприемниками целесообразно учитывать в виде обобщенных нагрузок крупных узлов ЭЭС, характеризуя такие нагрузки средними параметрами типового состава потребителей промышленного района и типовой схемы питающей его сети.

Исходя из вышесказанного, в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку приближенно характеризуют величинами $X''_{\text{нагр}} = 0,35$ и $E''_{\text{нагр}} = 0,85$, выраженными в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки в мегавольтамперах и среднем номинальном напряжении той ступени, где она присоединена.

2.5. Приближённый учёт системы

В приближённых расчётах коротких замыканий элемент, обозначаемый как GS (эквивалентная электроэнергетическая система), в схеме ЭЭС задаётся мощностью короткого замыкания, $МВ \cdot А$, определяемой в виде

$$S_k = \sqrt{3} I_{п0} U_{\text{ср.ном}},$$

где ток $I_{п0}$ – аварийный ток от источника GS .

Тогда его сопротивление определится по выражению

$$X_{GS} = \frac{I_{\delta}}{I_{п0}} = \frac{S_{\delta}}{S_k} \quad \text{или} \quad X_{GS} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{п0}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_k},$$

где $U_{\text{ср.ном}}$ – среднее номинальное междуфазное напряжение системы GS , которое принимают неизменным за сопротивлением X_{GS} ; I_{δ} – базисный ток на той же ступени, что и ток $I_{п0}$.

Если эквивалентная система GS поддерживает напряжение постоянным на своих выводах (источник бесконечной мощности), т. е. в узле примыкания к ЭЭС, то в схему замещения она вводится нулевым сопротивлением ($X_{GS} = 0$) и $U_{\text{ср.ном}}$.

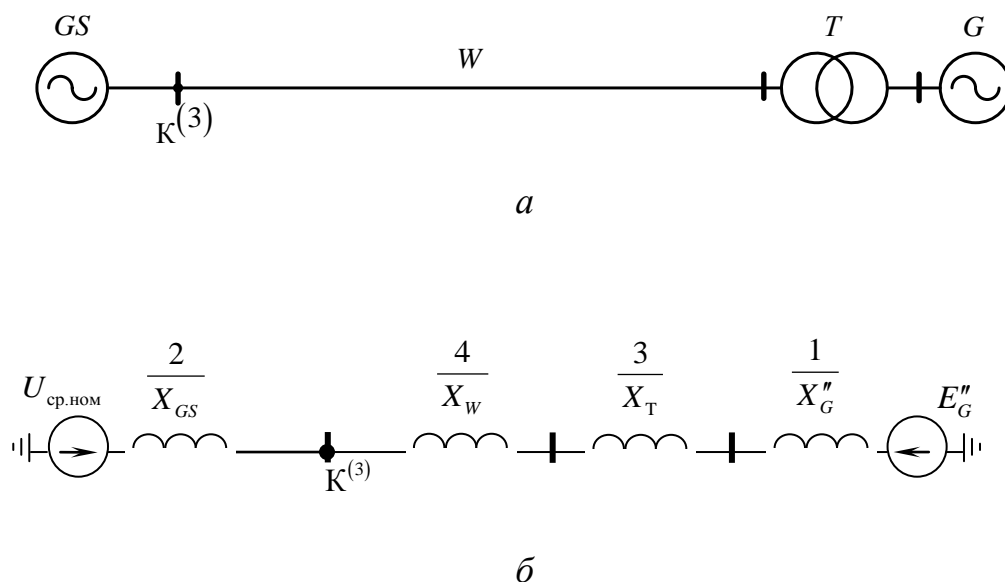


Рис. 2.14. К определению сопротивления GS : a – электроэнергетическая система;

$б$ – схема замещения системы

Реактивность системы также можно приближённо оценить из условия предельного использования выключателя, установленного или намечаемого

к установке в данном узле ЭЭС, т. е. считая, что ток и мощность при трёхфазном КЗ непосредственно за этим выключателем равны соответственно его номинальному (симметричному) отключаемому току $I_{\text{откл. ном}}$ или номинальной отключаемой мощности $S_{\text{откл. ном}}$ при напряжении данной ступени. В этом случае под $I_{\text{п0}}$ и $S_{\text{к}}$ следует понимать $I_{\text{откл. ном}}$ и $S_{\text{откл. ном}}$.

Представим электроэнергетическую систему (рис. 2.14), содержащую несколько источников питания, на примере которой покажем возможность определения сопротивления элемента GS через известную мощность короткого замыкания в узле примыкания его к системе.

Упрощающим преобразованием приводим схему замещения электроэнергетической системы к виду, представленному на рис. 2.15:

$$X_5 = X_1 + X_3 + X_4,$$

$$X_{\Sigma} = X_2 \parallel X_5,$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_G'' X_2 + U_{\text{ср. ном}} X_5}{X_2 + X_5},$$

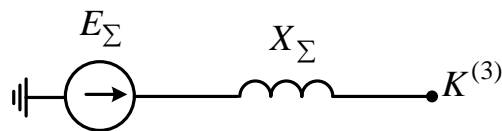
 $K^{(3)}$


Рис. 2.15. Эквивалентная схема замещения электроэнергетической системы

где X_{Σ} и E_{Σ} – эквивалентное (суммарное) сопротивление и ЭДС.

В то же время эквивалентное сопротивление этой системы может быть найдено, например, в относительных единицах как отношение

$$\frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{кз}}} = X_{\Sigma}, \quad (2.5)$$

где $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, к которой отнесены сопротивления схемы замещения; $S_{\text{кз}}$ – мощность КЗ в узле примыкания.

Таким образом, X_{Σ} , с одной стороны, можно определить по формуле (2.5), а с другой – схемным преобразованием:

$$X_{\Sigma} = \frac{X_2 X_5}{X_2 + X_5}. \quad (2.6)$$

Преобразовав выражение (2.6), получим:

$$\begin{aligned} X_2 X_{\Sigma} + X_5 X_{\Sigma} &= X_2 X_5, \\ X_5 X_{\Sigma} &= X_2 X_5 - X_2 X_{\Sigma} = X_2 (X_5 - X_{\Sigma}), \end{aligned}$$

откуда неизвестное сопротивление X_{GS} эквивалентной системы GS определится из уравнения

$$X_{GS} = X_2 = \frac{X_5 X_{\Sigma}}{X_5 - X_{\Sigma}}, \quad (2.7)$$

где сопротивление X_{Σ} найдено по выражению (2.5).

2.6. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания

2.6.1. Общие замечания

Под расчётом переходного процесса короткого замыкания обычно понимают вычисление токов и напряжений в рассматриваемой схеме при заданных условиях. В зависимости от назначения такого расчёта указанные величины находят для заданного момента времени или исходя из их изменения в течение всего переходного процесса.

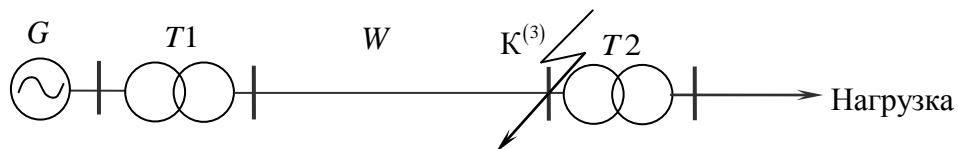


Рис. 2.16. Схема простейшей электроэнергетической системы

Задача определения тока КЗ даже в простейшей схеме (рис. 2.16) представляет определенные трудности. При наличии же в схеме нескольких генераторов задача резко усложняется. Даже учет качаний роторов синхронных генераторов и поведения присоединенных нагрузок мало упрощает задачу, так как изменения аperiodических составляющих токов генераторов взаимосвязаны между собой. При наличии на генераторах автоматического регулирования

возбуждения (АРВ) взаимосвязь имеет место и в изменениях периодических составляющих токов отдельных генераторов. Сложность задачи дополнительно усугубляется несимметрией роторов генераторов, поскольку машина характеризуется различными индуктивными сопротивлениями в продольной и поперечной осях ротора. В связи с этим для решения многих практических задач, когда не требуется знания особенно точных результатов, разработаны приближённые методы расчетов. Практический метод расчета должен удовлетворять требованию простоты выполнения расчета переходного процесса, что предотвращает возможность ошибок. Однако чем проще практический метод, тем на большем количестве допущений он основан и тем меньше его точность. Самые простые методы позволяют оценить только порядок искомых величин, но и этого часто бывает достаточно, чтобы обоснованно решить некоторые практические задачи. При решении практических задач расчета токов КЗ помимо принятых ранее допущений дополнительно принимают следующие:

1. Закон изменения периодической составляющей тока короткого замыкания, установленный для схемы с одним генератором, можно использовать для приближённой оценки этой составляющей в схеме с произвольным числом генераторов.
2. Апериодическую составляющую тока короткого замыкания во всех практических расчётах определяют приближённо.
3. Принимают, что роторы всех синхронных генераторов симметричны, т. е. сопротивления в продольной и поперечной осях полагают равными и опускают индексы d и q (X''). Это позволяет оперировать электродвижущими силами, напряжениями и токами без разложения их по продольной и поперечной осям.

Практика показывает, что начальные значения токов, вычисленные практическими методами, вполне хорошо согласуются с осциллографическими записями этих токов. Ошибка находится в пределах $\pm 5\%$. Если короткое замыкание не сопровождается сильными качаниями роторов генераторов, то практические методы с приемлемой точностью (ошибка составляет 10–15 %) позволяют вычислить значение тока в аварийной ветви в произвольный момент времени переходного процесса. Для других ветвей схемы ошибка вычисления оказывается обычно большей, причём она возрастает по мере удаления от места короткого замыкания и увеличения длительности КЗ.

2.6.2. Определение начального значения периодической составляющей и ударного тока короткого замыкания

Для определения начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания необходимо составить схему замещения электроэнергетической системы, представленной совокупностью схем замещения элементов при заданных условиях. В схеме замещения системы синхронные генераторы и компенсаторы, крупные синхронные и асинхронные электродвигатели, обобщённые нагрузки достаточно мощных узлов ЭЭС должны быть представлены своими приведёнными сверхпереходными сопротивлениями X'' . Синхронный явнополюсный генератор с демпферными обмотками на роторе представляется в схеме замещения сверхпереходным сопротивлением X''_d . При отказе от учёта демпфирования используется переходное сопротивление X'_d . За сопротивлениями X''_d приложены сверхпереходные ЭДС E'' . Если для рассматриваемых источников не заданы ЭДС, используются значения E''_0 , представленные в [табл. 2.1](#).

Таблица 2.1

Значения сверхпереходных ЭДС
в относительных единицах при номинальных условиях

Тип элемента	E''_0
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	1,08
Турбогенератор мощностью 100 МВт и более	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	1,18
Синхронный компенсатор	1,20
Синхронный электродвигатель	1,10
Асинхронный электродвигатель	0,90
Обобщенная нагрузка	0,85
Эквивалентная электроэнергетическая система	1,00

После того как источники представлены в схеме замещения сопротивлениями и ЭДС, все пассивные элементы (трансформаторы, автотрансформаторы, реакторы и др.) на схеме замещения представляются своими обычными сопротивлениями, используемыми в схемах замещения для установившихся (нагрузочных) режимов.

Составленную схему замещения преобразовывают относительно места короткого замыкания, представляя её в конечном итоге одним сопротивлением X_{Σ} и ЭДС E_{Σ} (рис. 2.17).

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания определяется по выражению

$$I_{п0} = \frac{E_{\Sigma} - U_{к}^{(3)}}{X_{\Sigma}}.$$

Определение ударного тока КЗ производят по выражению

$$i_y = \sqrt{2} I_{п0} k_y,$$

где ударный коэффициент при $X_{\Sigma}/R_{\Sigma} \geq 5$

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}},$$

иначе

$$k_y = 1,02 + 0,98 e^{-\frac{3}{\omega T_a}};$$

эквивалентная постоянная времени

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{\omega R_{\Sigma}}.$$

Для нахождения R_{Σ} необходимо составление схемы замещения из активных сопротивлений элементов ЭЭС. Для приближённой оценки активных сопротивлений всех элементов электроэнергетических систем в учебной и справочной литературе приводятся следующие соотношения X/R (табл. 2.2).

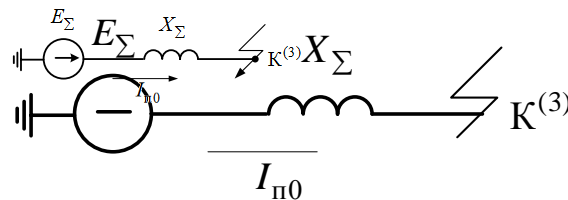


Рис. 2.17. Эквивалентная схема замещения электроэнергетической системы

Таблица 2.2

Соотношения индуктивных и активных сопротивлений элементов ЭЭС

Наименование элемента	X / R
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15–85
То же мощностью 100 МВт и более	100–150
Гидрогенераторы	40–90
Трансформаторы и автотрансформаторы	7–50
Реакторы 6–10 кВ (400–4000 А)	15–80
Воздушные ЛЭП	2–8
Кабельные ЛЭП	0,2–0,8
Эквивалентная электроэнергетическая система	50
Обобщённая нагрузка	2,5

Например, для синхронного генератора мощностью 100 МВт

$$R_G = \frac{X_d''}{100}.$$

После оценки активных сопротивлений тех же элементов, что и в схеме с индуктивными сопротивлениями, схема с резистивными элементами преобразуется аналогично схеме с индуктивными сопротивлениями. В результате преобразований находят R_Σ , с учётом которого получают T_a , k_y и i_y . При расчётах в относительных базисных единицах искомый ток $I_{п0}$ в именованных единицах, кА, определяют по выражению

$$I_{п0} = I_{п0*(б)} I_\delta,$$

$$I_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} U_\delta},$$

где $I_{п0*(б)}$ – значение периодической составляющей тока КЗ в относительных единицах при базисных условиях; $I_б$ – базисный ток; $U_б$ – базисное напряжение на ступени КЗ.

При необходимости определить отдельно ударный ток $i_{уд}$ от электродвигателя используют следующую схему замещения (рис. 2.18).

Для синхронного электродвигателя все расчёты выполняют так же как и для синхронного генератора равновеликой мощности. Если электродвигатель асинхронный, то величина его сверхпереходного сопротивления, как указывалось ранее, может быть определена как величина, обратная относительному пусковому току $I_{п*}$ этого электродвигателя.

Аварийный ток от АД

$$I''_{дв} = \frac{E''_{дв}}{X''_{дв}} \cdot I_{ном},$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} I''_{дв} k_{уд}.$$

Поскольку для асинхронного электродвигателя предполагают, что затухание периодической и аperiodической составляющих тока КЗ электродвигателя происходит примерно с одинаковыми постоянными времени, то в ударном коэффициенте обычно учитывают одновременное затухание обеих составляющих тока.

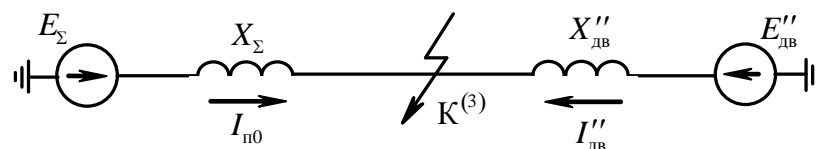


Рис. 2.18. Схема замещения ЭЭС для определения величины ударного тока от двигателя

Ударный коэффициент для асинхронного электродвигателя определяется как функция его активной мощности (рис. 2.19) $k_{уд} = f(P_{ном})$ либо аналитически, где периодическая слагаемая, подобно аperiodической, затухает по экспоненте с постоянной времени $T_{п}$:

$$k_{уд} = e^{-\frac{0,01}{T_{п}}} + e^{-\frac{0,01}{T_{а.дв}}}.$$

Значения T_{Π} и $T_{a.дв}$ определяют по следующим формулам:

$$T_{\Pi} = \frac{X''_{дв}}{\omega R_2} + \frac{X_{с\Sigma}}{\omega(R_{1\Sigma} + R_2)},$$

$$T_{a.дв} = \frac{X''_{дв\Sigma}}{\omega R_{1\Sigma}}.$$

В этих выражениях $X_{с\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление сети от зажимов электродвигателя до узла КЗ; $R_{1\Sigma}$ – суммарное активное сопротивление в цепи статора электродвигателя; R_2 – приведенное к статорной цепи активное сопротивление ротора АД; $X''_{дв\Sigma}$ – суммарное индуктивное сопротивление электродвигателя, включая сопротивление до узла КЗ.

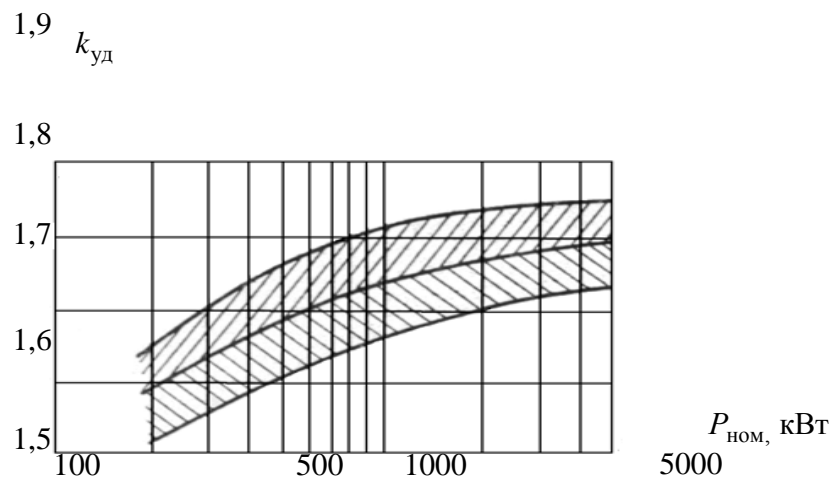


Рис. 2.19. Зависимость ударного коэффициента для асинхронного электродвигателя от его активной мощности

Для мелких электродвигателей и обобщённых нагрузок принимают $k_{уд} \approx 1$.

Для схемы, представленной на [рис. 2.18](#), ударный ток может быть оценён как сумма двух ударных токов:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_{п0} + k_{уд} \sqrt{2} I''_{дв}.$$

Для синхронных электродвигателей величина $k_{уд}$ приблизительно равна величине ударного коэффициента для синхронного генератора равновеликой мощности.

2.6.3. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания

Алгоритм определения начального значения:

1. Составляют схему замещения для начального момента времени переходного процесса, в которой все синхронные генераторы и компенсаторы, крупные синхронные и асинхронные электродвигатели, обобщённые нагрузки мощных узлов электроэнергетических систем вводят в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями X'' с приложенными за ними сверхпереходными ЭДС E_0'' . Остальные элементы вводят своими обычными сопротивлениями установившегося режима. Обобщённые нагрузки, примыкающие к узлу короткого замыкания, в схеме замещения необходимо учесть, а нагрузки, связанные с этим узлом через трансформаторы, воздушные и кабельные линии, допускается в схему замещения не включать, так как их влияние будет незначительно, а следовательно, и трансформаторы полностью или только некоторые обмотки трансформаторов, за которыми расположены такие нагрузки, можно исключить из схемы замещения.

2. Упрощающими преобразованиями (последовательное и параллельное сложение сопротивлений, преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений или наоборот) схему сводят к суммарному (эквивалентному) сопротивлению с приложенной за ним эквивалентной ЭДС.

3. По эквивалентной схеме замещения находят начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания, кА:

$$I_{п0} = \frac{E_{\Sigma} - U_{\text{К}}^{(3)}}{X_{\Sigma}} \cdot I_{\text{б}},$$

и величину ударного тока

$$i_y = \sqrt{2} I_{п0} k_y,$$

$$k_y = f(T_a).$$

4. Рассчитывают распределение токов по ветвям и напряжения в узлах схемы замещения.

Пример. При трёхфазном коротком замыкании на выводах генератора G2 электроэнергетической системы, представленной на [рис. 2.20, а](#), определить начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания и ток в линии W3.

Представим схему замещения электроэнергетической системы на [рис. 2.20, б](#).

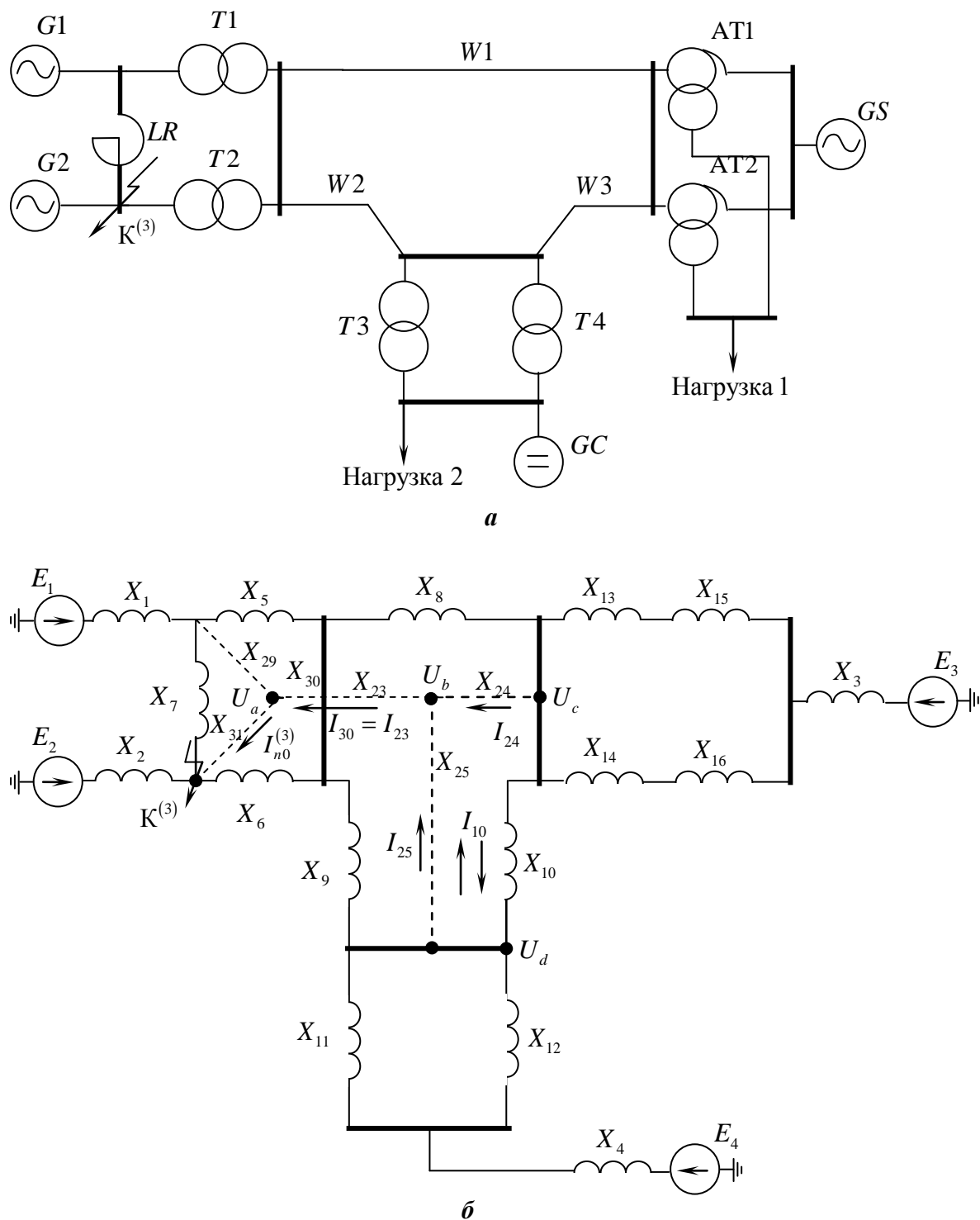


Рис. 2.20. Электроэнергетическая система (а), схема замещения ЭЭС (б)

В данной схеме замещения, учитывая вышесказанное, можно не учитывать нагрузки 1 и 2, а следовательно, и сопротивления обмоток низшего напряжения автотрансформаторов АТ1 и АТ2.

Преобразуем схему замещения:

$$X_{17} = X_{13} + X_{15},$$

$$X_{18} = X_{14} + X_{16},$$

$$X_{19} = X_{17} \parallel X_{18},$$

$$X_{20} = X_3 + X_{19},$$

$$X_{21} = X_{11} \parallel X_{12},$$

$$X_{22} = X_4 + X_{21}.$$

Преобразуем треугольник сопротивлений X_8, X_9, X_{10} в эквивалентную ему звезду X_{23}, X_{24}, X_{25} :

$$X_{23} = \frac{X_8 X_9}{X_8 + X_9 + X_{10}},$$

$$X_{24} = \frac{X_8 X_{10}}{X_8 + X_9 + X_{10}},$$

$$X_{25} = \frac{X_9 X_{10}}{X_8 + X_9 + X_{10}},$$

$$X_{26} = X_{22} + X_{25},$$

$$X_{27} = X_{20} + X_{24},$$

$$X_{28} = X_{26} \parallel X_{27}.$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_5 = \frac{E_3 X_{26} + E_4 X_{27}}{X_{26} + X_{27}}.$$

Сопротивления лучей звезды X_{29}, X_{30}, X_{31} определяем преобразованием треугольника сопротивлений X_5, X_6, X_7 :

$$X_{32} = X_{23} + X_{28} + X_{30},$$

$$X_{33} = X_1 + X_{29},$$

$$X_{34} = X_{32} \parallel X_{33},$$

$$E_6 = \frac{E_1 X_{32} + E_5 X_{33}}{X_{32} + X_{33}},$$

$$X_{35} = X_{31} + X_{34}.$$

Эквивалентные суммарные сопротивление и ЭДС:

$$X_{\Sigma} = X_2 \parallel X_{35},$$

$$E_{\Sigma} = \frac{E_2 X_{35} + E_6 X_2}{X_2 + X_{35}}.$$

Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания

$$I_{\text{п0}}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma} - U_{\text{к}}^{(3)}}{X_{\Sigma}}.$$

Найдём ток в линии W3:

$$U_a = U_{\text{к}}^{(3)} + I_{31} X_{31},$$

$$I_{30} = I_{23} = I_{32} = \frac{E_5 - U_a}{X_{32}},$$

$$U_b = U_a + I_{30} (X_{30} + X_{23}),$$

$$I_{24} = \frac{E_3 - U_b}{X_{27}},$$

$$U_c = U_b + I_{24} X_{24},$$

$$I_{25} = \frac{E_4 - U_b}{X_{26}},$$

$$U_d = U_b + I_{25} X_{25},$$

тогда ток в линии W3 можно определить при $U_c > U_d$:

$$I_{W3} = \frac{U_c - U_d}{X_{10}}$$

либо при $U_c < U_d$

$$I_{W3} = \frac{U_d - U_c}{X_{10}}.$$

2.7. Определение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени

В приближённых расчётах токов КЗ для определения действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания от синхронных генераторов в произвольный момент времени при радиальной расчётной схеме следует применять метод типовых кривых.

Метод типовых кривых основан на использовании специальных кривых – семейств основных и дополнительных кривых:

$$\gamma_t = \frac{I_{пт,G}}{I_{п0,G}} = f(t).$$

Типовые кривые 1975 г., как основные, так и дополнительные, представлены на [рис. 2.21](#).

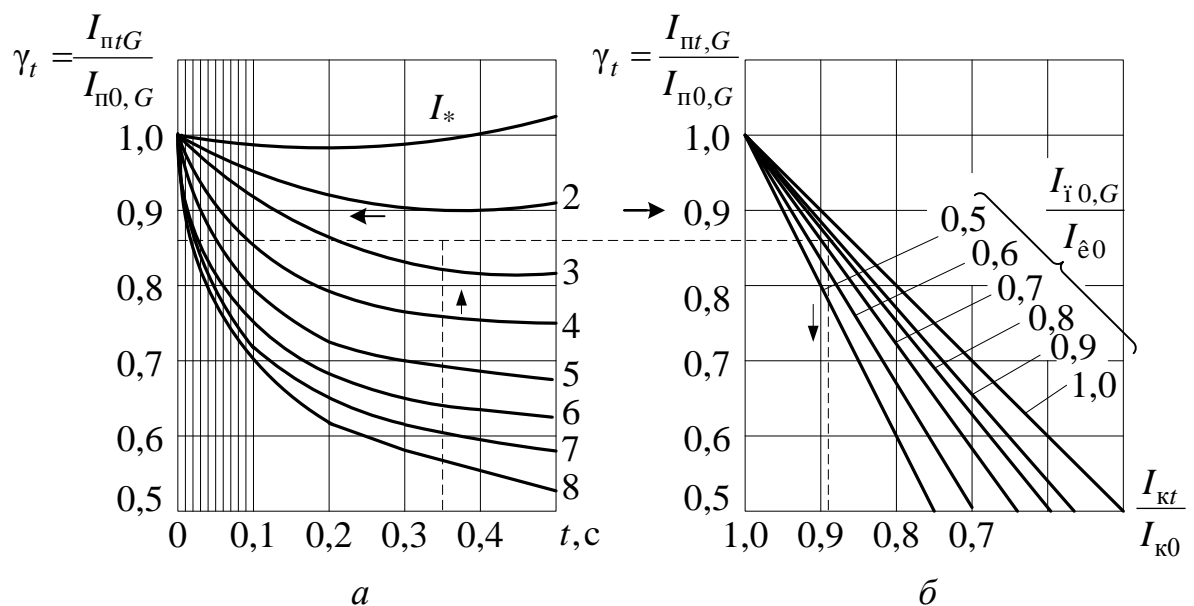


Рис. 2.21. Типовые кривые для определения периодической составляющей тока короткого замыкания: *a* – основные типовые кривые, *б* – дополнительные типовые кривые

Основные кривые ([рис. 2.21, а](#)) – это кривые в следующих координатах: по оси ординат – отношение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в ветви генератора к действующему значению тока в этой же ветви в момент времени $t = 0$, $I_{пт,G}/I_{п0,G}$. Аналогично для дополнительных кривых ([рис. 2.21, б](#)). По оси абсцисс: для основных кривых – время, для дополнительных кривых – отношение тока в узле

короткого замыкания в произвольный момент времени к току в этом же узле в момент времени $t = 0$, I_{kt}/I_{k0} .

При заданном времени номер типовой кривой будет определяться отношением, о. е., $I_{п0,G}/I_{ном,G}^{\circ}$. Здесь $I_{п0,G}$ – значение тока в ветви генератора в момент времени $t = 0$, кА; $I_{ном,G}^{\circ}$ – номинальный ток генератора, приведённый к ступени короткого замыкания, кА.

Ток генератора $I_{ном,G}^{\circ}$, кА,

$$I_{ном,G}^{\circ} = \frac{S_{ном,G}}{\sqrt{3}U_{ср.ном}}.$$

Здесь $S_{ном,G}$ – номинальная мощность генератора, МВА; $U_{ср.ном}$ – среднее номинальное напряжение ступени короткого замыкания, выбранное по шкале средних номинальных напряжений, кВ.

Значение тока к заданному моменту времени от начала короткого замыкания:

$$I_{пт,G} = I_{п0,G}\gamma_t.$$

Здесь $\gamma_t = I_{пт,G}/I_{п0,G}$ – значение, определённое по типовым кривым.

Определение $I_{пт}$ необходимо для выбора коммутационной аппаратуры, который производится в соответствии со следующими условиями:

$$I_{пт} \leq I_{откл.ном},$$

$$\tau = t_{св} + 0,01.$$

Здесь $t_{св}$ – собственное время отключения выключателя, с; 0,01 – время срабатывания релейной защиты, с.

Типовые кривые 1975 г. построены для турбогенераторов мощностью 12–800 МВт, гидрогенераторов мощностью до 500 МВт, синхронных компенсаторов.

При построении типовых кривых принято, что предельное возбуждение превышает предельное напряжение возбудителя в два раза для турбогенераторов и синхронных компенсаторов и в 1,8 раза для гидрогенераторов.

Постоянная времени нарастания напряжения на обмотке возбуждения принята равной нулю, кроме одной типовой кривой:

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}} = 8.$$

Для этой кривой принята постоянная времени, равная 0,25 с.

Типовые кривые определяются удалённостью короткого замыкания:

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}} = I_*.$$

Чем больше электрическая удалённость генератора от места короткого замыкания, тем меньше составляющая $I_{п0}$ в токе короткого замыкания.

$$I_{п0} = \frac{E_{\Sigma} - U_{к}^{(3)}}{X_{\Sigma}}.$$

В каком-то случае (при увеличении X_{Σ}) может получиться так, что

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}} < 1.$$

В этих условиях полагают, что такая точка короткого замыкания является электрически удалённой, и тогда

$$I_{пт,G} = I_{п0,G} = \text{const}.$$

В данном случае отпадает необходимость в типовых кривых и периодическая составляющая равна значению $I_{п0}$ в этой ветви.

Дополнительные кривые – это семейство из шести кривых, представляющих собой отношение

$$\frac{I_{kt}}{I_{k0п0}} = f\left(\frac{I_{пт,G}}{I_{G}}\right).$$

В том случае, когда

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{k0}} < 0,5,$$

ток КЗ не затухает:

$$I_{kt} = I_{k0} = \text{const}.$$

Метод типовых кривых применяется в тех случаях, когда узел короткого замыкания находится у выводов генератора (синхронного компенсатора) или

на небольшой электрической удалённости от них, например за трансформаторами связи электростанции с электроэнергетической системой. Все генераторы (синхронные компенсаторы), значительно удалённые от узла короткого замыкания (находящиеся за большим сопротивлением), и остальную часть энергосистемы, в частности эквивалентную электроэнергетическую систему GS , следует заменять одним источником и считать напряжение на его зажимах неизменным по амплитуде, т. е. считать источником неограниченной мощности. Если такой источник GS связан с местом короткого замыкания непосредственно, т. е. независимо от генераторов, расположенных вблизи места короткого замыкания, то его действующее значение периодической составляющей тока в этих условиях также следует принимать неизменным:

$$I_{пт,GS} = I_{п0,GS} = \text{const} .$$

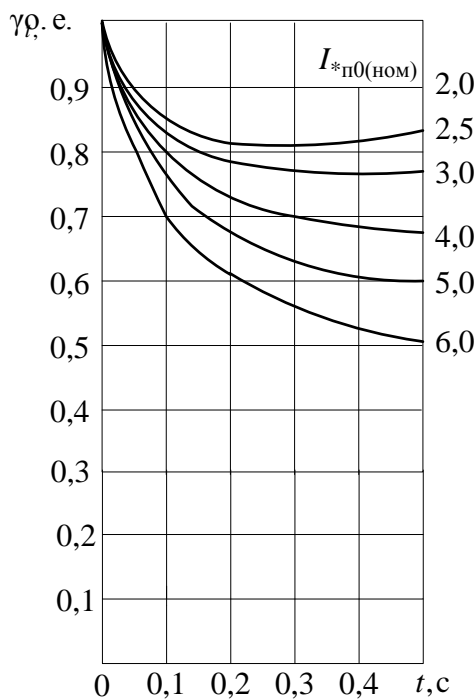


Рис. 2.22. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

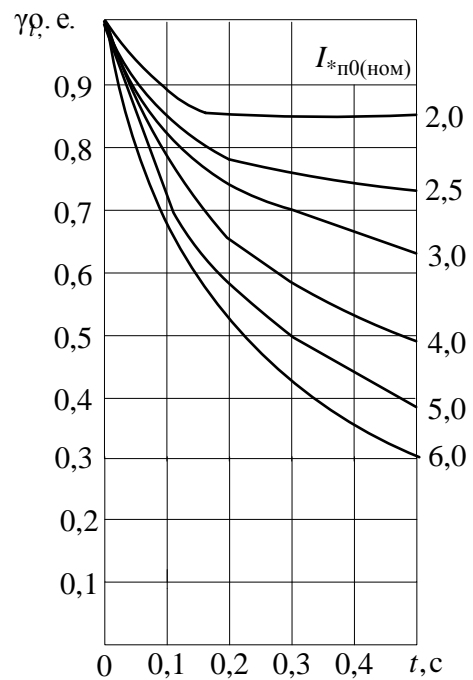


Рис. 2.23. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с тиристорной системой самовозбуждения

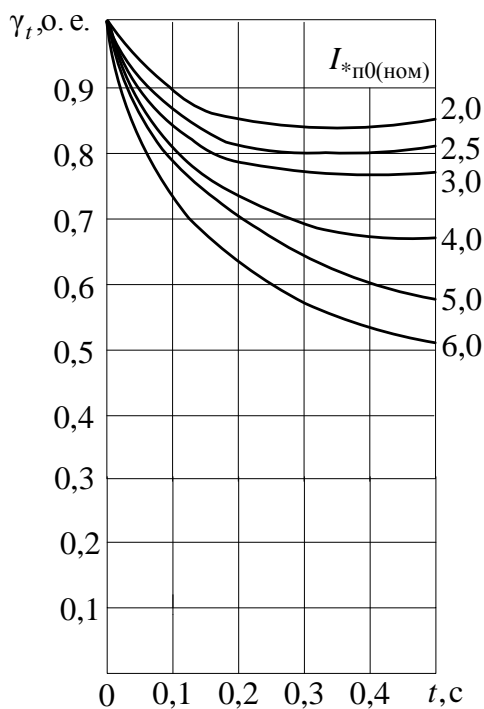


Рис. 2.24. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения

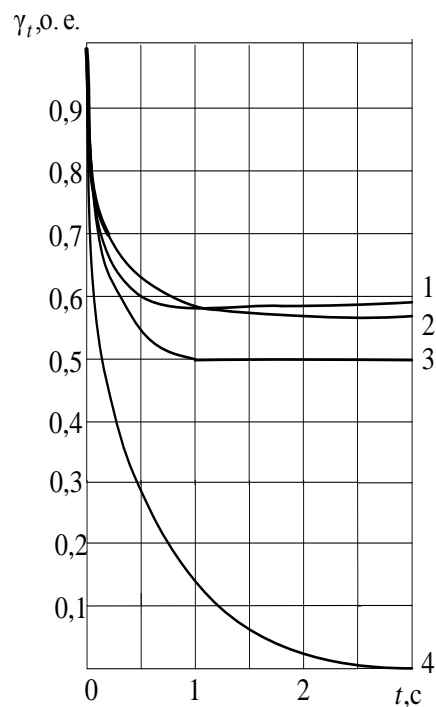


Рис. 2.25. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока при трёхфазных коротких замыканиях на выводах турбогенераторов с различными системами возбуждения:

- 1 – диодной бесщеточной;
- 2 – тиристорной независимой;
- 3 – диодной независимой;
- 4 – тиристорной самовозбуждения

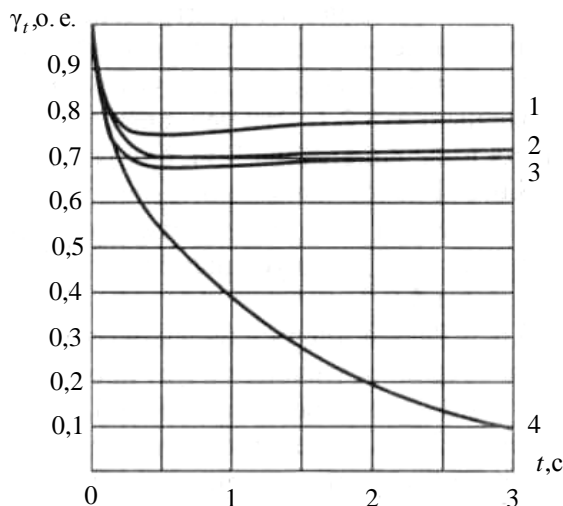


Рис. 2.26. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока при трёхфазных коротких замыканиях на стороне высшего напряжения блочных трансформаторов, подключенных к турбогенераторам с различными системами возбуждения: 1 – диодной бесщеточной; 2 – тиристорной независимой; 3 – диодной независимой; 4 – тиристорной самовозбуждения

На [рис. 2.22–2.26](#) представлены типовые кривые $\gamma(t) = I_{пт} / I_{п0}$, рекомендованные Руководящими указаниями по расчёту токов коротких замыканий и выбору электрооборудования 2002 г. [1] к применению для различных групп турбогенераторов с учётом современной тенденции оснащения генераторов различных типов определёнными системами возбуждения.

2.8. Алгоритм определения периодической составляющей аварийного тока в произвольный момент времени по типовым кривым

Алгоритм определения периодической составляющей аварийного тока:

1. Определяют вариант использования основных или дополнительных типовых кривых.

Основные типовые кривые используют, если электроэнергетическая система представлена одним или несколькими обобщёнными генераторами, радиально связанными с местом короткого замыкания (объединяемые генераторы находятся примерно в одинаковых условиях), [рис. 2.27](#).

Дополнительные типовые кривые применяют, если электроэнергетическая система представлена генераторами (генератором) и шинами неизменно-

го напряжения $G\Sigma$ (генераторы находятся в различных условиях и связаны с местом короткого замыкания через общее для них сопротивление), [рис. 2.28](#).

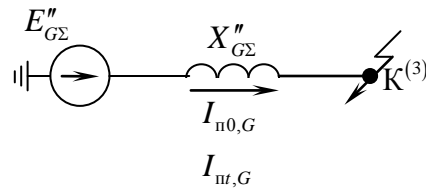


Рис. 2.27. Схема замещения электроэнергетической системы, представленной одиночным или эквивалентным генератором

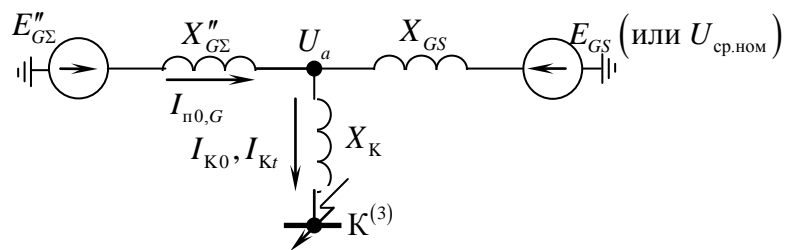


Рис. 2.28. Схема замещения электроэнергетической системы

2. Составляют схему замещения для начального момента времени переходного процесса (нагрузки, даже включённые в узле короткого замыкания, в данную схему не вводят).

3. Схему замещения преобразовывают к одному из нижеследующих видов ([рис. 2.27](#), [2.28](#)).

4. Определяют значения токов, необходимых при использовании типовых кривых:

для основных типовых кривых

$$I_{\text{ном},G\Sigma}^{\circ} = \frac{S_{\text{ном},G\Sigma}}{\sqrt{3}U_{\text{ср.ном}}},$$

$$S_{\text{ном},G\Sigma} = \sum_{i=1}^n S_{\text{ном},G_i},$$

$$I_{\text{п0},G} = \frac{E''_{G\Sigma} - U_{\text{К}}^{(3)}}{X''_{G\Sigma}};$$

для дополнительных типовых кривых

$$E_{\Sigma} = \frac{E_{G\Sigma}'' X_{GS} + E_{GS} X_{G\Sigma}''}{X_{GS} + X_{G\Sigma}''},$$

$$X_{\Sigma} = X_K + X_{GS} \parallel X_{G\Sigma}'',$$

$$I_{K0} = \frac{E_{\Sigma} - U_K^{(3)}}{X_{\Sigma}},$$

$$U_a = U_K^{(3)} + I_{K0} X_K,$$

$$I_{п0,G} = \frac{E_{G\Sigma}'' - U_a}{X_{G\Sigma}''}.$$

5. Находят отношение $I_{п0,G} / I_{ном,G}^{\circ}$.

В том случае, если $I_{п0,G} / I_{ном,G}^{\circ} < 1$, то для основных типовых кривых

$$I_{пт,G} = I_{п0,G};$$

для дополнительных типовых кривых

$$I_{кт} = I_{к0}.$$

6. Определяют отношение $I_{п0,G} / I_{к0}$ (только для дополнительных типовых кривых).

В том случае, если $I_{п0,G} / I_{к0} < 0,5$, то

$$I_{кт} = I_{к0}.$$

7. По основным типовым кривым для интересующего момента времени находят отношение токов:

$$\frac{I_{пт,G}}{I_{п0,G}} = \gamma_t.$$

При заданном времени восстанавливается вертикаль до одной из основных типовых кривых (с применением интерполяции, см. [рис. 2.21](#)) с номером, определяемым отношением $I_{п0,G}/I_{ном,G}$; от точки пересечения движением вправо на одну из дополнительных типовых кривых находят отношение $I_{п0,G}/I_{к0}$. Точку пересечения с дополнительной кривой проектируют на горизонтальную ось и определяют коэффициент k_t :

$$k_t = \frac{I_{кт}}{I_{к0}}.$$

8. Рассчитывают действующие значения токов:
для основных типовых кривых

$$I_{пт,G} = I_{п0,G}\gamma_t;$$

для дополнительных типовых кривых

$$I_{кт} = I_{к0}k_t.$$

2.9. Установившийся режим короткого замыкания

При питании цепи короткого замыкания от источника бесконечной мощности напряжение на зажимах этой цепи предполагается неизменным по амплитуде и частоте:

$$\begin{aligned} U &= \text{const}; \\ R &\approx 0; \\ X &\approx 0. \end{aligned}$$

В этих условиях переходный процесс характеризуется затуханием только апериодической составляющей тока короткого замыкания ([2.3](#)).

По мере приближения короткого замыкания к источнику предположение о постоянстве напряжения на его зажимах U_r будет всё менее и менее приемлемым, напряжение на зажимах генератора при коротком замыкании будет всё более и более снижаться.

С увеличением тока в цепи статора генератора при КЗ увеличивается магнитный поток продольной реакции статора, который направлен навстречу основному магнитному потоку, созданному током возбуждения, что приведёт к размагничиванию машины; поток в воздушном зазоре между статором

и ротором уменьшится, а напряжение на зажимах генератора будет снижаться до уровня, зависящего от удалённости короткого замыкания и параметров синхронного генератора. Для того чтобы компенсировать снижение напряжения в цепи, на генераторах предусмотрены автоматические устройства (автоматические регуляторы возбуждения – АРВ), которые увеличивают ток возбуждения синхронной машины при снижении напряжения, тем самым удаётся частично или полностью компенсировать снижение напряжения.

Под установившимся режимом короткого замыкания понимают такую стадию переходного процесса, когда все возникшие в начальный момент переходного процесса свободные (апериодические) составляющие аварийных токов полностью затухли и закончен подъём тока возбуждения под действием АРВ.

При питании цепи от источника бесконечной мощности установившийся режим наступает через 0,1–0,3 с. При наличии на генераторах АРВ установившийся режим наступает через 3–5 с после возникновения короткого замыкания.

Приведённое определение установившегося режима короткого замыкания соответствует упрощённому представлению о протекании переходного процесса, которое в должной мере соответствует только отдельно работающему генератору. В условиях более сложной электроэнергетической системы протекание переходного процесса имеет значительно более сложный характер. Это связано в первую очередь с изменением скорости вращения роторов генераторов при коротком замыкании и возникающими при этом качаниями роторов, что может привести к выпадению генераторов из синхронизма и переходу их к асинхронному режиму.

Для современных электроэнергетических систем оценка установившегося режима короткого замыкания (в указанном смысле) является до определённой степени условной, однако установившийся режим короткого замыкания в электроэнергетической системе всё же возможен. Установившиеся режимы коротких замыканий возможны при производстве испытаний в электроэнергетических системах, настройке некоторых видов защит (например, токовых защит генераторов).

Для определения начального значения (в момент времени $t = 0$) тока короткого замыкания генераторы представляют сверхпереходным сопротивлением X_d'' , при отсутствии демпферных обмоток переходным сопротивлением X_d' .

Основными характеристиками и параметрами, которыми характеризуется генератор в установившемся режиме короткого замыкания ($t = \infty$), являются: характеристика холостого хода синхронной машины; синхронные ненасыщенные индуктивные сопротивления по продольной оси X_d и по по-

перечной оси X_q ; индуктивное сопротивление рассеяния статора X_σ ; предельный ток возбуждения $I_{fпр}$ (или «потолок» возбуждения).

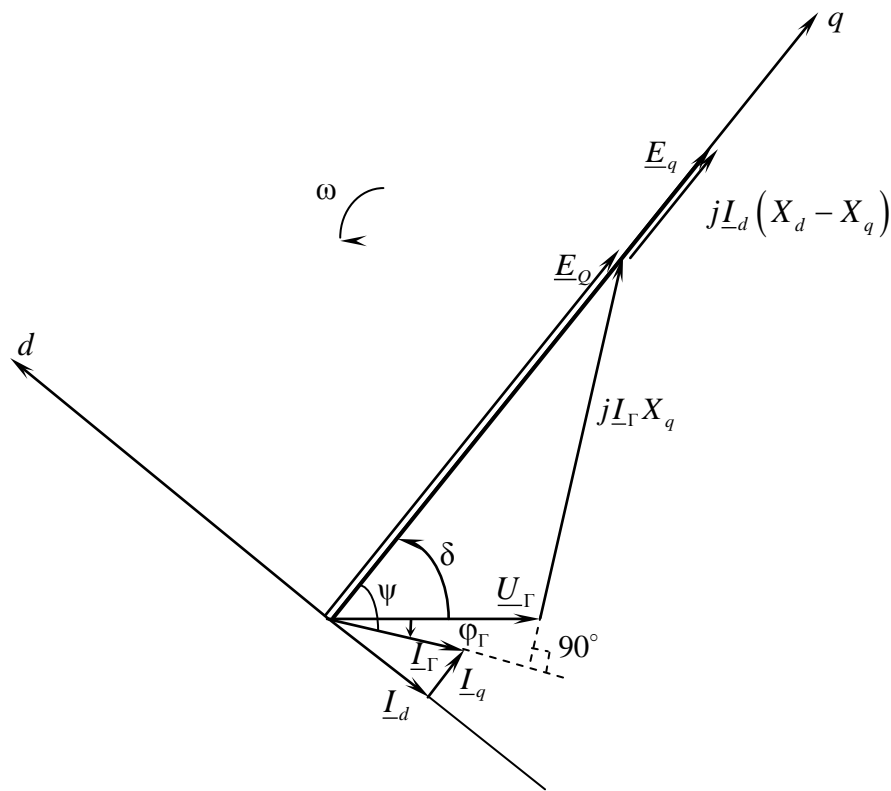


Рис. 2.29. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

Величина предельного тока возбуждения зависит от системы возбуждения и её параметров, а также типа генератора. Значение предельного тока возбуждения может быть принято примерно в два раза больше тока возбуждения машины при номинальной нагрузке.

Если ток возбуждения машины при рассматриваемой её нагрузке не задан, то его можно определить из векторной диаграммы (рис. 2.29).

В первом приближении относительную величину тока возбуждения можно определить из выражения

$$I_f = E_q = \sqrt{(U_\Gamma \cdot \cos \varphi_\Gamma)^2 + (U_\Gamma \cdot \sin \varphi_\Gamma + I_\Gamma \cdot X_d)^2}, \quad (2.8)$$

где U_Γ , I_Γ и $\cos \varphi_\Gamma$ – напряжение, ток и коэффициент мощности, при которых работает машина.

Для неявнополюсного генератора синхронные индуктивные сопротивления в обеих осях одинаковы ($X_d = X_q$) и поэтому в относительных единицах $E_q = I_f$, см. формулу (2.8). Для явнополюсных синхронных машин $X_q < X_d$. При отсутствии значения сопротивления X_q его можно принимать приближённо равным $X_q = 0,6X_d$. Значение синхронной ЭДС E_q для неё больше фиктивной ЭДС E_Q на величину падения напряжения от продольной составляющей тока статора $I_d(X_d - X_q)$. Выражением (2.8) практически можно пользоваться и для явнополюсных машин.

При установившемся режиме короткого замыкания влияние нагрузки проявляется, с одной стороны, в том, что предварительно нагруженный генератор (с отстающим $\cos \varphi$) имеет большее возбуждение, чем генератор, работающий на холостом ходу, и, с другой стороны, нагрузка, оставаясь присоединённой к сети, может существенно изменить величины и распределение токов в схеме. Так, при наличии нагрузки это будет приводить к уменьшению внешнего сопротивления цепи статора и, как следствие, к увеличению тока генератора, уменьшению его напряжения и соответственно пропорциональному уменьшению тока в месте короткого замыкания. С увеличением электрической удалённости короткого замыкания влияние нагрузки сказывается сильнее. При коротком замыкании на выводах генератора присоединённая нагрузка в установившемся режиме не играет никакой роли.

2.10. Влияние АРВ генераторов на установившийся режим короткого замыкания

Представим электроэнергетическую систему (рис. 2.30), для которой оценим влияние АРВ генератора на установившийся режим короткого замыкания при коротких замыканиях в различных её частях.

Точка $K_1^{(3)}$ – удалённое короткое замыкание на шинах нагрузки. При данном коротком замыкании напряжение на выводах генератора, несомненно, будет снижаться, но с помощью АРВ напряжение можно довести до номинального, увеличивая ток возбуждения.

Точка $K_2^{(3)}$ – короткое замыкание в конце линии. При коротком замыкании в этом узле ток возбуждения необходимо увеличивать в большей степени, нежели при коротком замыкании на шинах нагрузки. Однако в данном

случае всё ещё возможно поддержание номинального напряжения при помощи АРВ.

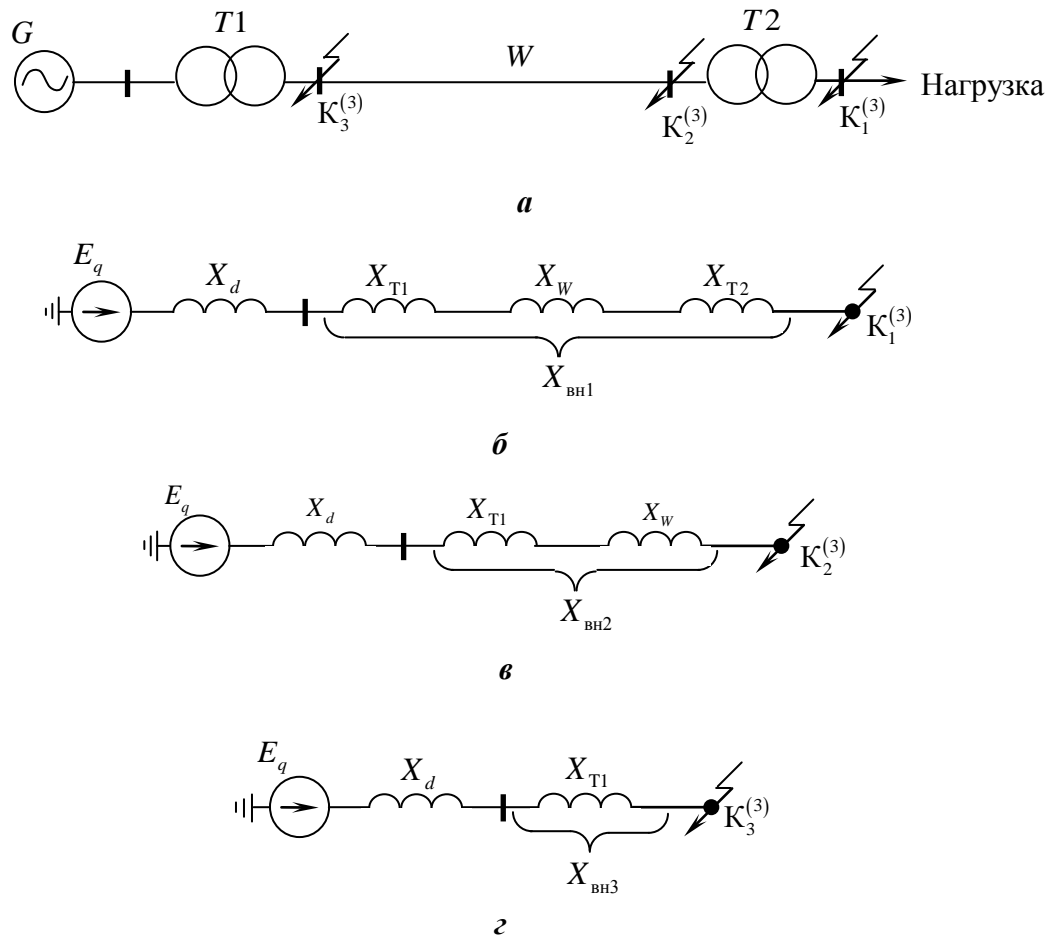


Рис. 2.30. Электроэнергетическая система (а) и схемы замещения (б, в, г) при различной удалённости КЗ

Точка $K_3^{(3)}$ – короткое замыкание в начале линии. При коротком замыкании в этом узле генератор находится на незначительном электрическом удалении от места повреждения, поэтому даже при полностью увеличенном токе возбуждения АРВ не может обеспечить поддержания нормального напряжения как в системе в целом, так и на выводах генератора.

В этих условиях вводится понятие критического режима, который определяется через критическое сопротивление $X_{кр}$.

Критическим сопротивлением называется такое наименьшее внешнее сопротивление, при коротком замыкании за которым на выводах генератора сохраняется нормальное напряжение при предельном токе возбуждения. В случае, когда $X_{вн} = X_{кр}$, значение критического тока примет вид

$$I_{кр} = \frac{U_{норм}}{X_{кр}}$$

В электроэнергетической системе у генераторов при коротком замыкании могут существовать два режима: режим предельного возбуждения и (или) режим нормального напряжения ([табл. 2.3](#)).

Таблица 2.3

Режимы генератора с устройством АРВ

Предельное возбуждение	Нормальное напряжение
Если $X_{\text{вн}} \leq X_{\text{кр}}$, то $I_f = I_{\text{фпр}}$. При этом $U_{\Gamma} \leq U_{\text{норм}}$, а ток определится в виде $I_{\text{К}} = \frac{E_{\text{фпр}}}{X_d + X_{\text{вн}}} \geq I_{\text{кр}}$	Если $X_{\text{вн}} \geq X_{\text{кр}}$, то $I_f < I_{\text{фпр}}$. При этом $U_{\Gamma} = U_{\text{норм}}$, а ток определится в виде $I_{\text{К}} = \frac{U_{\text{норм}}}{X_{\text{вн}}} \leq I_{\text{кр}}$

Если $X_{\text{вн}} = X_{\text{кр}}$, то генератор работает в обоих режимах.

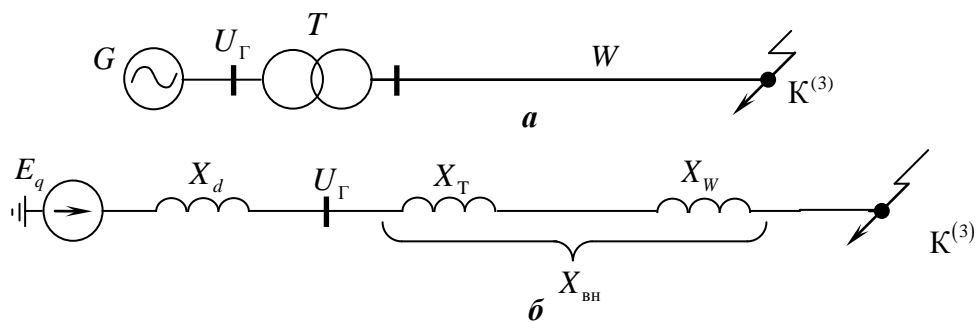


Рис. 2.31. Электроэнергетическая система (а),
 схема замещения электроэнергетической системы (б)

Напряжение на выводах генератора может быть определено двояко ([рис. 2.31](#)):

$$U_{\Gamma} = E_q - IX_d, \quad (2.9)$$

$$U_{\Gamma} = IX_{\text{нагр}} = IX_{\text{вн}}. \quad (2.10)$$

Эти выражения позволяют построить две характеристики:

- 1) внешнюю характеристику генератора по формуле (2.9);
- 2) нагрузочную характеристику генератора по выражению (2.10).

Представим характеристики генератора на [рис. 2.32](#).

Пусть прямая $F_{\Pi}M_{\Pi}$ соответствует внешней характеристике генератора при его предельном возбуждении. Точка K , получаемая при проведении горизонтали на уровне $U_{\text{норм}}$, определяет критический режим.

Характеристика, отвечающая уравнению (2.10), на рис. 2.32 представлена, например, в критическом режиме прямой OK , $\text{tg } \alpha_{\text{кр}} = X_{\text{кр}}$.

Если рассмотреть другие условия возникновения короткого замыкания, т. е. выбрать на внешней характеристике, например, точку L_{Π} , то нагрузочная характеристика будет определяться прямой OL_{Π} , угол наклона которой будет определять внешнее сопротивление:

$$\begin{aligned} \text{tg } \alpha_1 &= X_{\text{вн1}}, \\ X_{\text{вн1}} &< X_{\text{кр}}. \end{aligned}$$

В этих условиях напряжение на выводах генератора будет определяться в масштабе оси напряжений отрезком $R_{\Pi}L_{\Pi}$, а ток – абсциссой точки R_{Π} .

В случае удалённого короткого замыкания режим системы будет определяться положением, например, точки S :

$$\begin{aligned} \text{tg } \alpha_2 &= X_{\text{вн2}}, \\ X_{\text{вн2}} &> X_{\text{кр}}. \end{aligned}$$

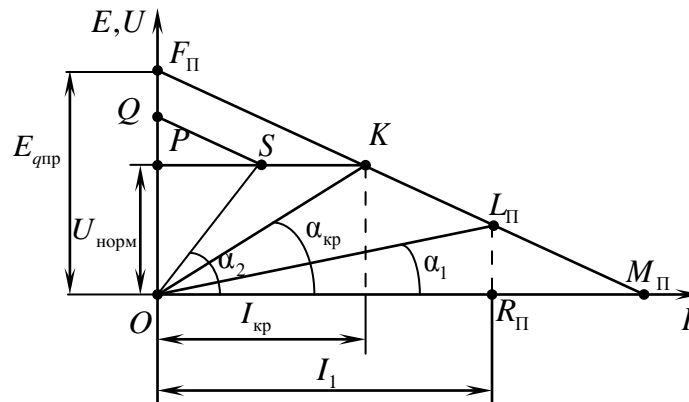


Рис. 2.32. Внешняя и нагрузочная характеристики генератора

Это режим нормального напряжения. Рабочая точка будет находиться в этом случае не на внешней характеристике $F_{\Pi}M_{\Pi}$, а на характеристике PK . При этом OP – это напряжение на выводах генератора при удалённом коротком замыкании, отрезок OQ определяет ЭДС генератора в этих условиях, $QS \parallel F_{\Pi}M_{\Pi}$.

Вопросы для самопроверки

1. Какие составляющие имеются в полном токе КЗ?
2. В чём состоит определение периодической составляющей тока в точке КЗ сложной ЭЭС?
3. Что значит приближённый расчёт аperiodической составляющей тока КЗ в аварийной ветви?
4. Как определяется эквивалентная постоянная времени $T_{\text{аз}}$ затухания аperiodической составляющей КЗ в сложной ЭЭС?
5. Каков порядок расчёта тока КЗ в аварийной ветви?
6. Какой алгоритм расчёта ударного тока КЗ?
7. Как объединяются параллельно работающие источники в один эквивалентный?
8. Каким представляется алгоритм преобразования схемы замещения ЭЭС к простейшему виду?
9. Что означает приближенный учёт нагрузок?
10. Чему равно относительное установившееся значение тока КЗ по отношению к номинальному току КЗ?
11. Значение каких параметров синхронной машины можно использовать для определения активного сопротивления обмотки статора, если данные об этом сопротивлении отсутствуют?
12. В чём заключается метод типовых кривых?
13. Какой величиной характеризуется удалённость точки КЗ от синхронной машины при расчёте периодической составляющей тока КЗ с использованием метода типовых кривых?
14. Какое КЗ называется близким, а какое удалённым?
15. При каких условиях расчёт действующего значения периодической составляющей тока КЗ следует вести с учётом влияния на ток КЗ асинхронных двигателей?
16. Каков физический смысл постоянной времени T_a ?
17. Что такое действующее значение полного тока КЗ?
18. Каковы особенности переходного режима синхронной машины с АРВ?
19. Что такое режим нормального напряжения и предельного возбуждения?

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

3.1. Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов

3.1.1. Общие сведения. Образование высших гармоник

Переходные процессы в электроэнергетических системах рассматриваются в предположении, что симметрия нарушается только в каком-либо одном месте. Такую несимметрию называют однократной, всю остальную систему, согласно принятым ранее допущениям, по-прежнему полагают симметричной.

Несимметрия может быть либо поперечной, например несимметричные короткие замыкания, либо продольной, представляемой включением в фазы в общем случае неодинаковых по величине сопротивлений $\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_C$, например в виде разрыва одной или двух фаз (рис. 3.1).

Аналитическое исследование несимметричных переходных процессов сложнее, чем исследование симметричных режимов, так как уравнения процесса должны быть составлены не для одной фазы, а для каждой фазы исследуемой цепи. Дополнительные трудности анализа связаны с возникновением пульсирующего магнитного поля ротора синхронной машины вследствие нарушения симметрии статорной цепи. Предположим, что в одной из фаз статора явнополюсного синхронного генератора без демпферных обмоток, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.2, протекает ток синхронной частоты f_0 . Образующийся при этом пульсирующий магнитный поток остается в пространстве в одном и том же положении. Этот магнитный поток можно представить двумя магнитными потоками, вращающимися навстречу друг другу с угловой синхронной частотой $\pm\omega_0$. Знак «+» означает вращение против часовой стрелки, а знак «-» – по часовой стрелке (рис. 3.2).

Поток, вращающийся синхронно с ротором, относительно последнего неподвижен и соответственно взаимодействует с магнитным потоком обмотки возбуждения. Другой магнитный поток, вращающийся навстречу ротору, будет иметь по отношению к нему двойную угловую частоту $2\omega_0$, поэтому в обмотке возбуждения наводит ЭДС двойной синхронной частоты $2f_0$. Обусловленный этой ЭДС ток частоты $2f_0$ создает пульсирующий с частотой $2f_0$ магнитный поток $\Phi_{(2f)}$, вращающийся вместе с ротором. Разложе-

ние магнитного потока $\Phi_{(2f)}$ на два потока, вращающихся в противоположные стороны с угловой частотой $2\omega_0$ относительно ротора, показывает, что один из них, вращаясь по отношению к статору с угловой частотой $(2\omega_0 - \omega_0) = \omega_0$ в сторону, противоположную вращению ротора, оказывается неподвижным относительно потока, вызвавшего пульсирующий с частотой $2f_0$ поток ротора, и стремится его компенсировать. Другой поток вращается относительно статора с угловой частотой $(2\omega_0 + \omega_0) = 3\omega_0$. Данный поток наводит в статоре ЭДС и ток тройной синхронной частоты $3f_0$. Этот ток создает в расточке статора пульсирующий магнитный поток этой же частоты.

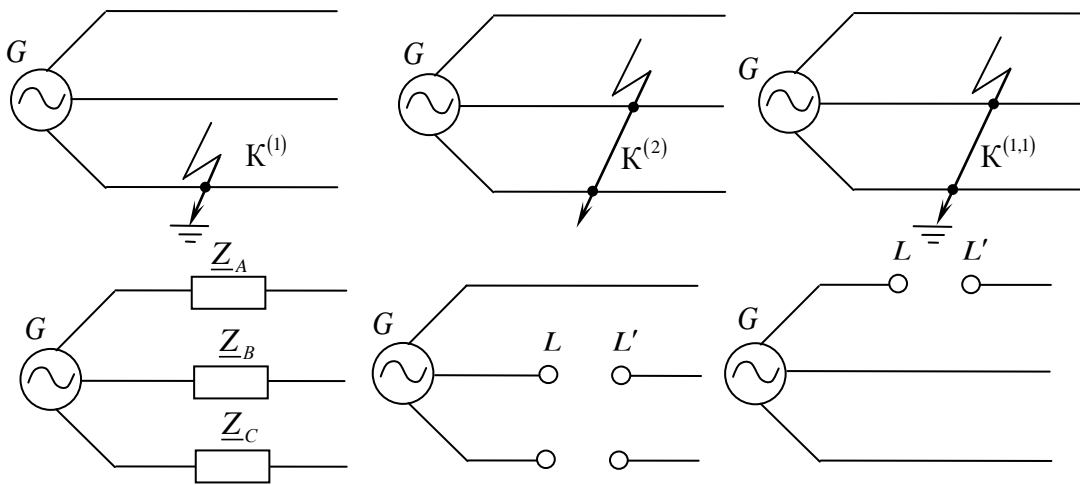


Рис. 3.1. Принципиальные схемы несимметрий в ЭЭС

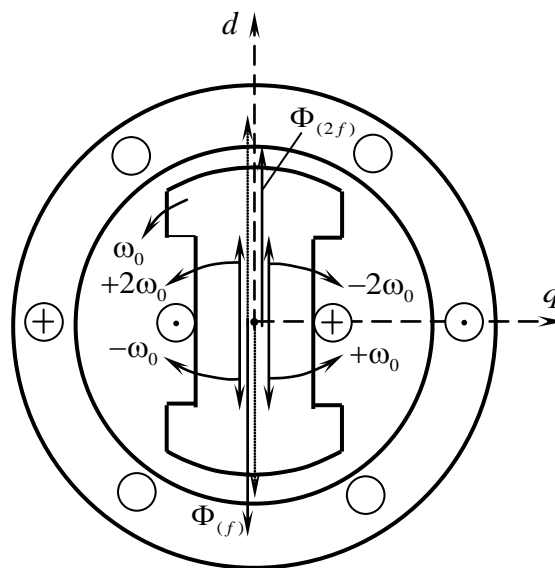


Рис. 3.2. Принципиальная схема явнополюсного синхронного генератора без демферных обмоток при несимметричном режиме статора

Дальнейший анализ показывает, что в обмотке статора под влиянием токов четных гармоник в обмотке возбуждения появляется весь спектр нечетных гармоник. Под влиянием нечетных гармоник тока статора в обмотке возбуждения возникают четные гармоники. Подобно этому нечетные гармоники тока ротора обуславливают четные гармоники тока в обмотке статора и наоборот. Таким образом появляется весь спектр гармонических составляющих.

В синхронной машине с демпферными обмотками, ротор которой симметричен ($X_d' = X_q$, $X_d'' = X_q''$) по отношению к любому перемещающемуся относительно него магнитному потоку, при несимметричном режиме высшие гармонические весьма малы.

3.1.2. Некоторые положения метода симметричных составляющих

При несимметричных режимах в трехфазной симметричной системе явления во всех трех фазах различны, поскольку неодинаковы токи, напряжения в фазах и различны углы сдвига между векторами этих величин. Поэтому нельзя рассчитывать изменения тока и напряжения только в одной фазе системы (как это делается при симметричных режимах). Необходимо составить достаточное число уравнений для контуров всех трех фаз. Количество необходимых уравнений значительно возрастает и увеличивается трудоемкость и объем вычислений.

Задача может быть упрощена, если применить метод симметричных составляющих – основной расчетный метод несимметричных режимов. Этот метод позволяет рассматривать несимметричную трехфазную систему токов, напряжений (в симметричной трехфазной системе сопротивлений), состоящую из нескольких симметричных систем токов и напряжений, для каждой из которых явления в фазах подобны.

Любую несимметричную систему $\underline{f}_A, \underline{f}_B, \underline{f}_C$ (рис. 3.3) на основе метода симметричных составляющих можно однозначно представить тремя системами: прямой последовательности – $\underline{f}_{A1}, \underline{f}_{B1}, \underline{f}_{C1}$ с тем же порядком чередования фаз, что и в несимметричной системе; обратной последовательности – $\underline{f}_{A2}, \underline{f}_{C2}, \underline{f}_{B2}$ с обратным порядком чередования фаз; нулевой последовательности – $\underline{f}_{A0}, \underline{f}_{B0}, \underline{f}_{C0}$, совпадающих по направлению друг с другом. Системы прямой и обратной последовательности являются симметричными (равными по величине, сдвинутыми в пространстве на 120°) и уравновешенными (векторная сумма равна нулю). Система нулевой последовательности симметрична, но неуравновешенна.

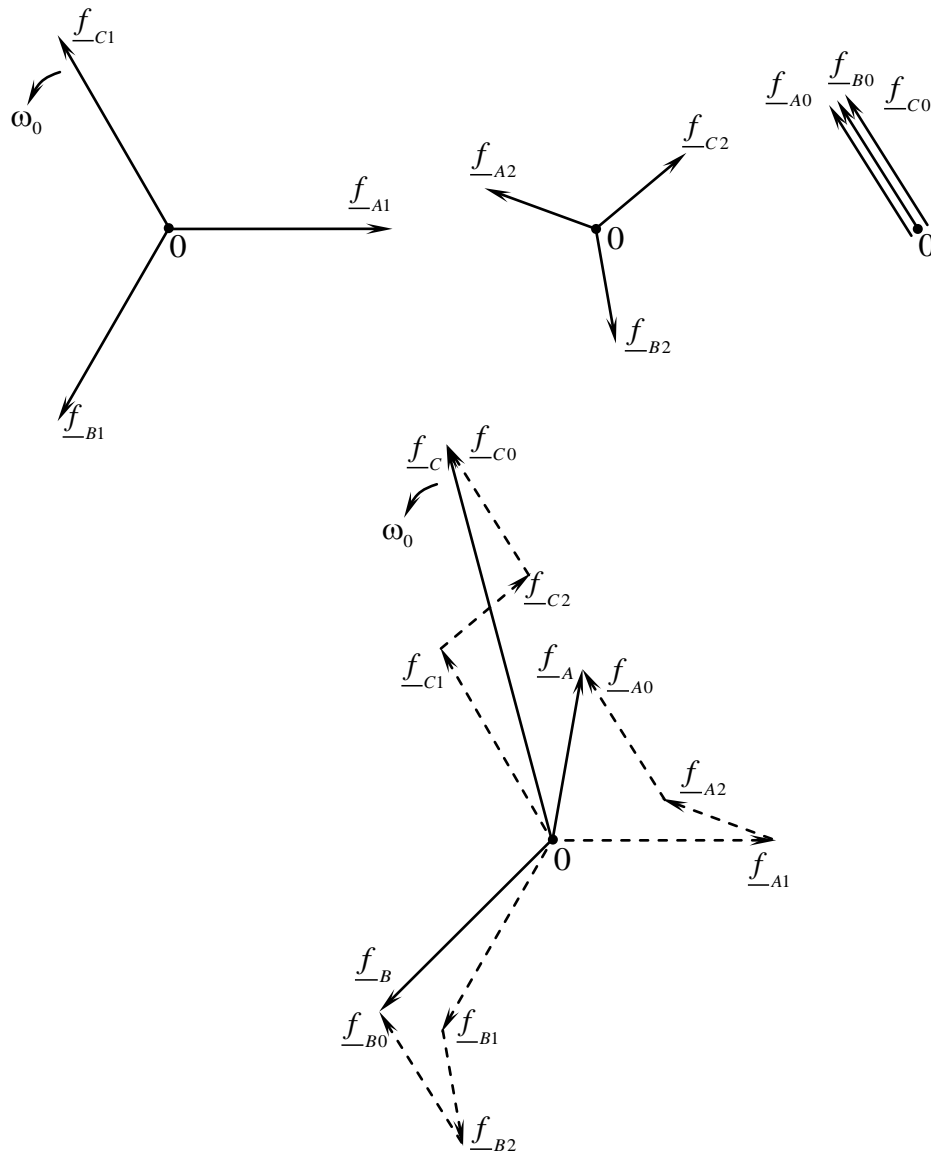


Рис. 3.3. Системы прямой, обратной и нулевой последовательностей и несимметричная система $\underline{f}_A, \underline{f}_B, \underline{f}_C$

Таким образом, несимметричная система $\underline{f}_A, \underline{f}_B, \underline{f}_C$ состоит из трех симметричных систем:

$$\begin{aligned}\underline{f}_A &= \underline{f}_{A1} + \underline{f}_{A2} + \underline{f}_{A0}, \\ \underline{f}_B &= \underline{f}_{B1} + \underline{f}_{B2} + \underline{f}_{B0}, \\ \underline{f}_C &= \underline{f}_{C1} + \underline{f}_{C2} + \underline{f}_{C0}.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Использование системы единичных векторов – операторов поворота $1, a^2, a$ (рис. 3.4) – позволяет уменьшить размерность решаемой задачи.

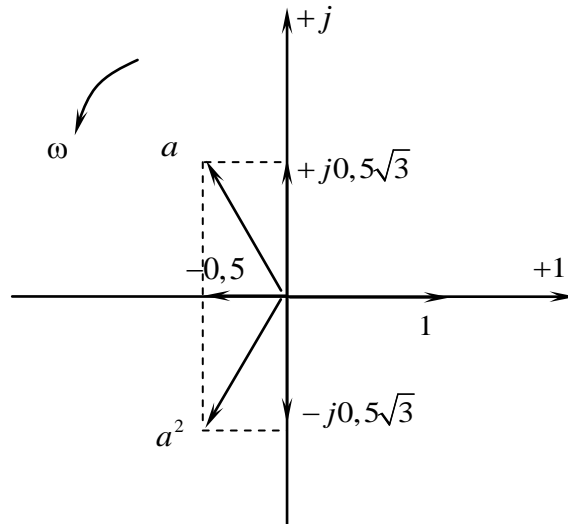


Рис. 3.4. Система единичных векторов

$$1 = e^{j0^\circ} = e^{j360^\circ},$$

$$a = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ} = -0,5 + j0,5\sqrt{3},$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -0,5 - j0,5\sqrt{3}.$$

Сумма этих трех единичных векторов равна нулю:

$$1 + a + a^2 = 0.$$

Вектор $\underline{f}_B = \underline{f}_{B1} + \underline{f}_{B2} + \underline{f}_{B0}$ можно определить через симметричные составляющие фазы A :

$$\underline{f}_B = a^2 \underline{f}_{A1} + a \underline{f}_{A2} + \underline{f}_0,$$

где $a^2 \underline{f}_{A1} = \underline{f}_{B1}$, $a \underline{f}_{A2} = \underline{f}_{B2}$, $\underline{f}_{A0} = \underline{f}_{B0} = \underline{f}_{C0} = \underline{f}_0$.

Вектор $\underline{f}_C = \underline{f}_{C1} + \underline{f}_{C2} + \underline{f}_{C0}$ можно определить через симметричные составляющие фазы A :

$$\underline{f}_C = a \underline{f}_{A1} + a^2 \underline{f}_{A2} + \underline{f}_0,$$

где $a \underline{f}_{A1} = \underline{f}_{C1}$, $a^2 \underline{f}_{A2} = \underline{f}_{C2}$.

Таким образом, несимметричную систему векторов (3.1) можно выразить через системы трех симметричных составляющих одной фазы (принята фаза A).

$$\underline{f}_A = \underline{f}_{A1} + \underline{f}_{A2} + \underline{f}_0,$$

$$\begin{aligned}\underline{f}_B &= a^2 \underline{f}_{A1} + a \underline{f}_{A2} + \underline{f}_0, \\ \underline{f}_C &= a \underline{f}_{A1} + a^2 \underline{f}_{A2} + \underline{f}_0.\end{aligned}\quad (3.2)$$

Решая обратную задачу, можно выразить симметричные составляющие через несимметричную систему векторов \underline{f}_A , \underline{f}_B , \underline{f}_C . Если сложить левые и правые части всех уравнений (3.2):

$$\underline{f}_A + \underline{f}_B + \underline{f}_C = (1 + a^2 + a) \underline{f}_{A1} + (1 + a + a^2) \underline{f}_{A2} + 3 \underline{f}_0,$$

то

$$\underline{f}_0 = \frac{1}{3} (\underline{f}_A + \underline{f}_B + \underline{f}_C).$$

Вектор прямой последовательности фазы A определяется умножением второго уравнения (3.2) на оператор a , а третьего на a^2 . После суммирования левых и правых частей всех трех уравнений (3.2) имеем:

$$\underline{f}_A + a \underline{f}_B + a^2 \underline{f}_C = (1 + a^3 + a^3) \underline{f}_{A1} + (1 + a^2 + a^4) \underline{f}_{A2} + (1 + a + a^2) \underline{f}_0.$$

Поскольку $a^3 = e^{j360^\circ} = 1$ и $1 + a^2 + a^4 = 1 + a^2 + a \cdot 1 = 0$, получаем

$$\underline{f}_{A1} = \frac{\underline{f}_A + a \underline{f}_B + a^2 \underline{f}_C}{3}.$$

Вектор обратной последовательности фазы A определяется умножением второго уравнения (3.2) на оператор a^2 , а третьего на a . После суммирования левых и правых частей всех трех уравнений имеем:

$$\underline{f}_A + a^2 \underline{f}_B + a \underline{f}_C = (1 + a^4 + a^2) \underline{f}_{A1} + (1 + a^3 + a^3) \underline{f}_{A2} + (1 + a^2 + a) \underline{f}_0,$$

а затем по аналогии с предыдущим получаем

$$\underline{f}_{A2} = \frac{\underline{f}_A + a^2 \underline{f}_B + a \underline{f}_C}{3}.$$

Полученные соотношения метода симметричных составляющих можно применять к токам и напряжениям несимметричной системы.

3.1.3. Применение метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов

Метод симметричных составляющих применяют для расчетов несимметричных режимов в ЭЭС при условии ограничения спектра колебаний тока и напряжения основной гармоникой.

Из теоретической электротехники известно, что симметричные составляющие токов связаны законом Ома с симметричными составляющими напряжений одноименной последовательности. Иными словами, если какой-либо элемент электроэнергетической системы симметричен и обладает по отношению к токам прямой, обратной и нулевой последовательностей $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$ сопротивлениями тех же последовательностей $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_0$, то симметричные составляющие падения напряжения $\Delta\underline{U}_1, \Delta\underline{U}_2, \Delta\underline{U}_0$ в этих элементах могут быть рассчитаны по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}\Delta\underline{U}_1 &= \underline{I}_1 \underline{Z}_1, \\ \Delta\underline{U}_2 &= \underline{I}_2 \underline{Z}_2, \\ \Delta\underline{U}_0 &= \underline{I}_0 \underline{Z}_0.\end{aligned}$$

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей для одного и того же элемента в общем случае различны.

Протекающие по обмотке статора синхронной машины токи прямой, обратной и нулевой последовательностей создают магнитные потоки одноименных последовательностей. Магнитные потоки наводят в статорных обмотках соответствующие ЭДС. Вводить эти ЭДС в расчет нецелесообразно, так как они пропорциональны (при пренебрежении насыщением магнитной системы машины) токам отдельных последовательностей, которые в условиях рассматриваемых задач являются неизвестными. Поэтому в расчет вводятся только ЭДС прямой последовательности, а ЭДС, обусловленные реакцией токов отдельных последовательностей, учитывают в виде падений напряжений с обратным знаком на сопротивлениях соответствующих схем замещения.

Установленные на генераторах АРВ (независимо от конструкции этих устройств) реагируют только на отклонение напряжения прямой последовательности, тем самым полагаем, что АРВ включены через фильтры напряжения прямой последовательности, и поддерживают напряжения прямой последовательности на выводах генератора на номинальном уровне.

Чтобы решить задачу любого несимметричного режима методом симметричных составляющих, необходимо прежде всего составить схемы замещения соответствующих последовательностей, которые после эквивалентных преобразований при неучете активных сопротивлений приобретают вид, представленный на [рис. 3.5–3.7](#).

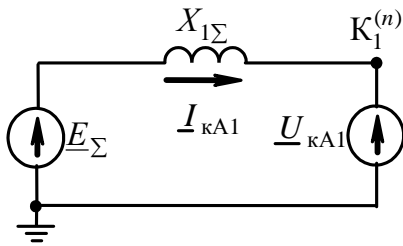


Рис. 3.5. Схема замещения прямой последовательности

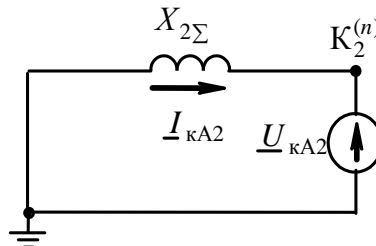


Рис. 3.6. Схема замещения обратной последовательности

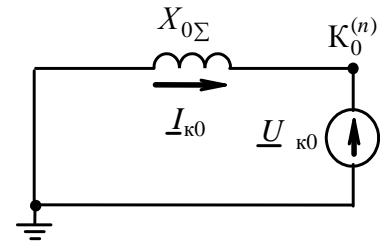


Рис. 3.7. Схема замещения нулевой последовательности

Для этих схем напряжения в узлах K_1 , K_2 , K_0 определяются выражениями:

$$\underline{U}_{кA1} = \underline{E}_{\Sigma} - \underline{I}_{кA1} jX_{1\Sigma}, \quad (3.3)$$

$$\underline{U}_{кA2} = 0 - \underline{I}_{кA2} jX_{2\Sigma}, \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_{к0} = 0 - \underline{I}_{к0} jX_{0\Sigma}. \quad (3.5)$$

Уравнения (3.4)–(3.5), составленные по второму закону Кирхгофа, – это основные уравнения или уравнения связи для расчета несимметричных режимов. Таким образом, чтобы рассчитать несимметричный режим, необходимо знать параметры схем замещения всех последовательностей. К уравнениям (3.3)–(3.5) необходимо добавить еще три уравнения, поскольку в задаче шесть неизвестных: три составляющие напряжения и три составляющие тока. Этими дополнительными уравнениями являются уравнения граничных условий, которыми характеризуется конкретный вид повреждения. Следовательно, задача расчета любого несимметричного режима сводится к определению симметричных составляющих токов и напряжений заданного вида повреждения, а затем определяются их фазные величины по соотношениям теории симметричных составляющих.

3.2. Параметры элементов электроэнергетических систем для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей

Все сопротивления схемы замещения, которыми характеризуются отдельные элементы ЭЭС в нормальном симметричном режиме или в симметричном переходном процессе, по существу являются сопротивлениями прямой последовательности.

При отсутствии магнитной связи между фазами какого-либо элемента ЭЭС его сопротивление не зависит от порядка чередования фаз тока: $\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{B1}, \underline{I}_{C1}$ или $\underline{I}_{A2}, \underline{I}_{C2}, \underline{I}_{B2}$. Активные и индуктивные сопротивления такого элемента зависят только от частоты переменного тока, следовательно, для всех последовательностей эти сопротивления одинаковы:

$$\begin{aligned}R_1 &= R_2 = R_0, \\X_1 &= X_2 = X_0, \\Z_1 &= Z_2 = Z_0.\end{aligned}$$

Для элемента, магнитносвязанные цепи которого неподвижны относительно друг друга, сопротивления прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз симметричной трехфазной системы токов взаимная индукция между фазами такого элемента не изменяется. Таким образом, для трансформаторов, автотрансформаторов, токоограничивающих реакторов, воздушных и кабельных линий

$$\begin{aligned}R_1 &= R_2, \\X_1 &= X_2, \\Z_1 &= Z_2.\end{aligned}$$

Поскольку система токов нулевой последовательности отличается от систем токов прямой и обратной последовательностей, то сопротивления токам нулевой последовательности в общем случае существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

3.2.1. Параметры синхронных машин

При возникновении несимметричного режима в обмотках статора протекают токи прямой, обратной и нулевой последовательностей. Магнитный поток обратной последовательности Φ_2 , создаваемый токами обратной последовательности, вращаясь относительно ротора с двойной синхронной скоростью $2\omega_0$, встречает на своем пути непрерывно изменяющееся магнитное сопротивление. Это сопротивление связано с магнитной несимметрией ротора и тем, что в продольных и поперечных контурах ротора наводятся токи, создающие разные ответные реакции. При неизменной намагничивающей силе статора поток обратной последовательности гармонически изменяется с двойной синхронной скоростью в пределах между его наибольшим и наименьшим значениями. Разница между этими значениями зависит от степени несимметрии ротора: она велика при резкой несимметрии и полностью исчезает при полной симметрии.

При несимметричных режимах ЭЭС образуются высшие гармоники, которые приводят к искажению синусоидальной формы магнитного поля статора. Это обстоятельство существенно затрудняет определение индуктивного сопротивления обратной последовательности синхронной машины и приводит к тому, что данное сопротивление не является параметром машины, так как зависит от внешних условий.

Для явнополюсной синхронной машины без демпферных обмоток на роторе магнитный поток обратной последовательности при совпадении с продольной осью ротора вытесняется ответной реакцией обмотки возбуждения на пути рассеяния этой обмотки. Но точно такая же картина с вытеснением магнитного потока происходит в момент возникновения КЗ ($t = 0$, сопротивление X_d'). В поперечной оси магнитный поток Φ_2 проникает через ротор беспрепятственно и поэтому ему соответствует сопротивление машины X_q . Таким образом, сопротивление обратной последовательности этой машины гармонически изменяется:

$$X_d' \leq X_2 \leq X_q.$$

При неучете нечетных гармоник

$$X_2 = \frac{X_d + X_q}{2}.$$

Для этой же машины при учете третьей гармоники

$$X_2 = \frac{2X_d'X_q}{X_d' + X_q}.$$

При симметричном роторе ($X_q = X_d'$) оба выражения дают одно и то же значение $X_2 = X_d'$.

При учете всего спектра нечетных гармоник сопротивление X_2 определяется в виде

$$X_2 = \sqrt{X_d'X_q}.$$

Для явнополюсной синхронной машины с продольными и поперечными демпферными обмотками сопротивление X_2 находится в пределах между X_d'' и X_q'' . В этих условиях принимают

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}.$$

При необходимости учета высших гармоник применяют более точное выражение:

$$X_2 = \sqrt{X_d'' X_q''}.$$

Сопротивление обратной последовательности синхронных машин X_2 приводится в справочной литературе. При отсутствии точных данных по параметрам обратной последовательности рекомендуется определять это сопротивление по следующим выражениям: $X_2 \approx 1,22 X_d''$ – для турбо- и гидрогенераторов с демпферными обмотками; $X_2 \approx X_d''$ – в упрощенных практических расчетах; $X_2 \approx 1,45 X_d'$ – для гидрогенераторов без демпферных обмоток.

Токи нулевой последовательности синхронных машин создают только магнитные потоки рассеяния обмотки статора. Они, как правило, меньше, чем при токах прямой или обратной последовательности, причем это уменьшение сильно зависит от типа обмотки. Величина сопротивления токам нулевой последовательности находится в пределах

$$X_0 = (0,15 - 0,6) X_d''.$$

3.2.2. Параметры асинхронных электродвигателей

Если скольжение асинхронного электродвигателя в нормальных условиях s_0 , то по отношению к магнитному потоку обратной последовательности синхронной частоты при несимметричном режиме ротор двигателя имеет скольжение $(2 - s_0)$. Следовательно, сопротивление обратной последовательности электродвигателя представляет собой его сопротивление при скольжении $(2 - s_0)$. Характер относительного изменения индуктивного сопротивления асинхронного электродвигателя в функции скольжения приведен на рис. 3.8, где за единицу реактивности принята реактивность при номинальном скольжении $S_{\text{ном}}$. Из этой кривой следует, что сопротивления при скольжениях $(2 - S_{\text{ном}})$ и $s = 1$, $s = 2$ примерно равны. При скольжении $s = 2$ двигатель работает в режиме электромагнитного тормоза.

Индуктивное сопротивление $X_{S=1к}$ определяется при пуске электродвигателя как величина, обратная относительному номинальному пусковому току:

$$X_{S=1к} = X'' = \frac{1}{I_{п*}}.$$

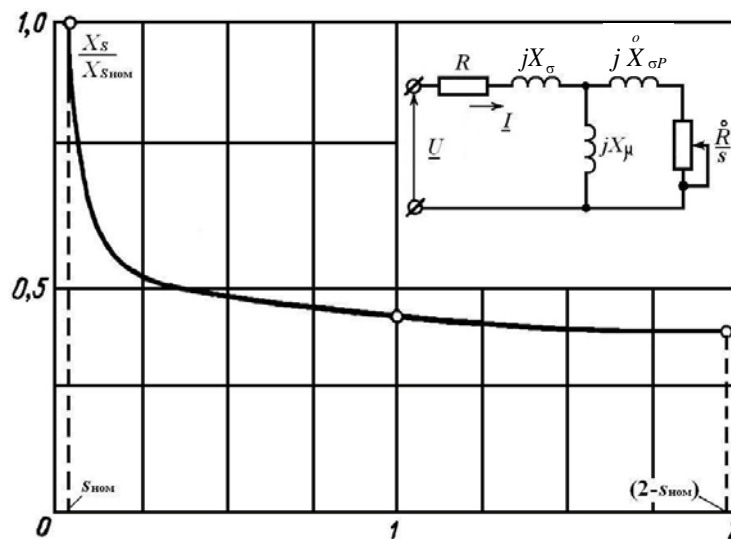


Рис. 3.8. Относительное изменение индуктивного сопротивления асинхронного электродвигателя в зависимости от скольжения

Поскольку $X_{(2-s_{ном})} \approx X_{s=1}$, то принимаем $X_{2 \overline{k}} X_1 = X''$.

Сопротивление асинхронного электродвигателя токам нулевой последовательности определяется только рассеянием статорной обмотки и сильно зависит от типа и конструкции этой обмотки. Достаточно достоверные сведения о сопротивлении токам нулевой последовательности могут быть получены либо с помощью эксперимента, либо по данным завода-изготовителя.

3.2.3. Параметры обобщенной нагрузки

Индуктивное сопротивление обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. Примерный типовой состав узла промышленной нагрузки: асинхронные электродвигатели – 48 %; освещение – 25 %; синхронные электродвигатели – 10 %; прочие (химическая, выпрямительная и т. д.) – 10 %; потери в линиях и трансформаторах – 7 %.

Для средней типовой промышленной нагрузки можно считать, что основная ее часть состоит из асинхронных электродвигателей, индуктивное сопротивление обратной последовательности которых практически то же, что и в начальной стадии переходного процесса; поэтому можно принять

$$X_{2нагр} = X''_{нагр} = 0,35.$$

Это сопротивление дано в относительных единицах при полной мощности в мегавольтамперах и среднем номинальном напряжении ступени, где эта нагрузка присоединена. Поскольку обобщенная нагрузка обычно включает в себя сеть и понижающие трансформаторы, ее сопротивление токам нулевой последовательности определяется именно этими элементами.

3.2.4. Схемы замещения и параметры трансформаторов и автотрансформаторов

Схемы замещения и параметры трансформаторов и автотрансформаторов зависят от схем соединения обмоток и их конструкций. Для циркуляции токов нулевой последовательности в какой-либо обмотке трансформатора или автотрансформатора (АТ) при появлении на ее выводах напряжения нулевой последовательности относительно земли необходима заземленная нейтраль.

Если к обмотке, соединенной в треугольник, приложить напряжение нулевой последовательности, то в силу равенства потенциалов в каждой из фаз, разность потенциалов (напряжения) между любыми фазами равна нулю, следовательно, ток по этой обмотке протекать не будет. К аналогичному выводу можно прийти, если напряжение нулевой последовательности приложено к обмотке, соединенной в звезду без заземленной нейтрали Y . Следовательно, сопротивление нулевой последовательности со стороны обмотки, соединенной в треугольник или в звезду с изолированной нейтралью, бесконечно велико, так как приложенное напряжение нулевой последовательности со стороны указанных обмоток не может вызвать в трансформаторе или АТ тока нулевой последовательности, независимо от схемы соединения других обмоток. При приложении напряжения нулевой последовательности к обмотке, соединенной в звезду с заземленной нейтралью, сопротивление нулевой последовательности (авто)трансформатора зависит от схем соединения других обмоток.

Рассмотрим основные варианты схем соединения обмоток двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

При появлении на выводах обмотки I двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y_0/Δ (рис. 3.9) напряжения нулевой последовательности в фазных обмотках II , соединенных в треугольник, начинают циркулировать токи нулевой последовательности. Их значения таковы, что обусловленные ими падения напряжения в каждой фазе численно равны наводимым в них ЭДС нулевой последовательности. Вследствие этого потенциалы линейных проводников за выводами трансформатора оказываются равными нулю и токи в эти проводники не поступают.

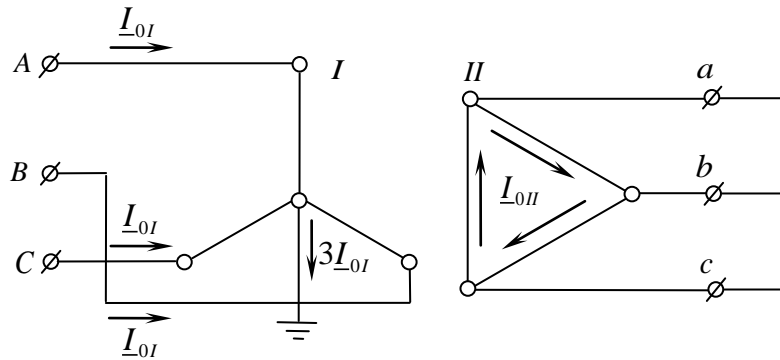


Рис. 3.9. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0 / Δ

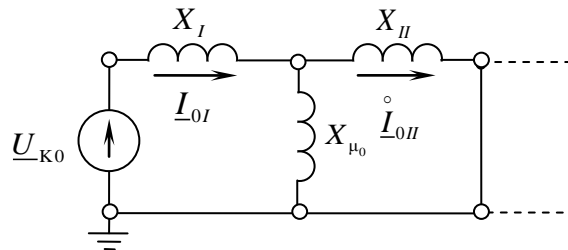


Рис. 3.10. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0 / Δ для токов нулевой последовательности

T-образная схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности включает в себя сопротивление рассеяния первичной X_I , вторичной X_{II} обмоток и сопротивление ветви намагничивания X_{μ_0} (рис. 3.10), где точка, соответствующая линейным выводам обмотки II, соединяется с точкой нулевого потенциала (с землей); таким образом, сопротивление рассеяния обмотки, соединённой в треугольник, является крайним элементом схемы замещения нулевой последовательности, независимо от других элементов, подключенных к этой обмотке, т. е. сопротивлением X_{II} заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

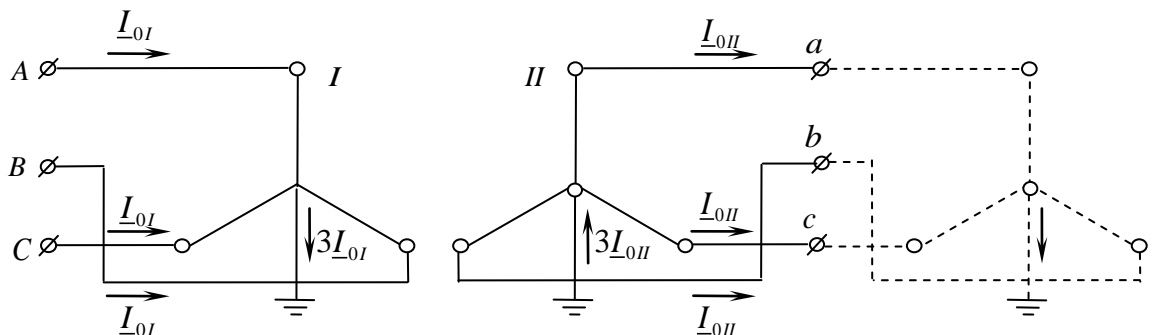


Рис. 3.11. Схема соединения обмоток двухобмоточного трансформатора Y_0 / Y_0

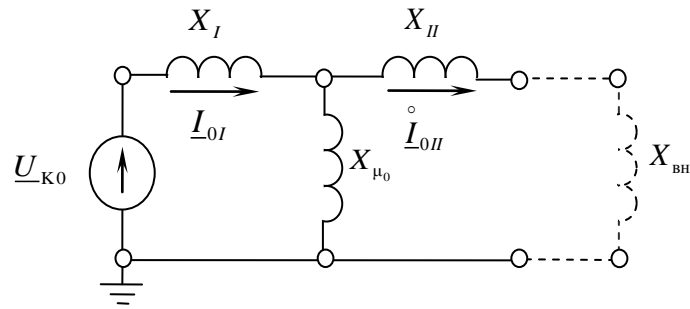


Рис. 3.12. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0/Y_0 для токов нулевой последовательности

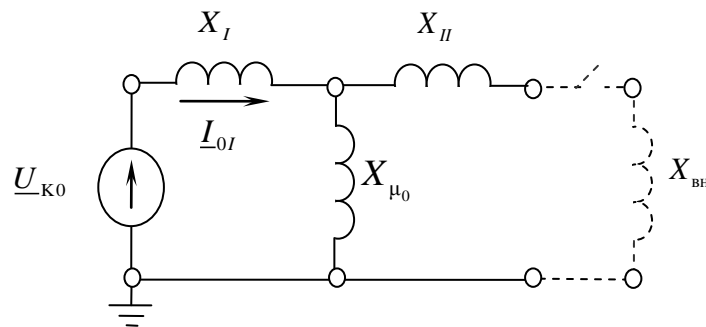


Рис. 3.13. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0/Y для токов нулевой последовательности

Для двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 (рис. 3.11) циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке II возможна лишь в том случае, когда фазы этой обмотки по отношению

к указанным токам являются частью замкнутого контура, включающего в себя и землю. Путь для токов нулевой последовательности обеспечивается через заземленную нейтраль какого-либо внешнего элемента, например трансформатора, электрически связанного с обмоткой II .

В схему замещения цепи с таким трансформатором (рис. 3.12) для токов нулевой последовательности входят сопротивления рассеяния обмоток I и II , сопротивление ветви намагничивания X_{μ_0} и сопротивление внешнего элемента $X_{вн}$.

Если такого внешнего элемента нет, то трансформатор с соединением обмоток Y_0/Y_0 имеет такую же схему замещения, как и трансформатор Y_0/Y (рис. 3.13). В этом случае ток нулевой последовательности в первичной обмотке может циркулировать только через сопротивление X_{μ_0} .

Величина X_{μ_0} зависит от конструкции трансформатора.

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также трехфазных четырех- и пятистержневых (броневых) ток намагничивания нулевой после-

довательности очень мал, так как в этом случае условия для замыкания магнитного потока нулевой последовательности практически те же, что и для магнитных потоков, создаваемых токами прямой (обратной) последовательности. В этом случае, как и в симметричных режимах, пренебрегаем ветвью намагничивания ($X_{\mu_0} = \infty$).

Иные условия для замыкания потоков нулевой последовательности в трехфазных трехстержневых трансформаторах (рис. 3.14).

Намагничивающие потоки нулевой последовательности Φ_0 каждого стержня не могут проходить по магнитопроводу других стержней, так как они заняты потоками от токов своих фаз, и замыкаются через изолирующую среду и железо бака трансформатора. Для проведения магнитного потока нулевой последовательности со столь высоким магнитным сопротивлением необходим достаточно большой ток намагничивания; следовательно, индуктивное сопротивление X_{μ_0} у трансформаторов такого типа значительно меньше X_{μ_1} . В зависимости от конструкции этого типа трансформатора оно находится в пределах $X_{\mu_0} = (0,3-1,0)$.

Имея в виду, что сопротивление вторичной обмотки трансформатора $X_{II} \ll X_{\mu_0}$, можно практически считать, что и для трехфазных трехстержневых трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Δ $X_{\mu_0} \approx \infty$ (иногда для трехфазных трехстержневых трансформаторов сопротивление нулевой последовательности принимают равным 0,85–0,9 от сопротивления прямой последовательности).

Подводя итог, можно представить сопротивления токам нулевой последовательности рассмотренных трансформаторов в виде табл. 3.1.

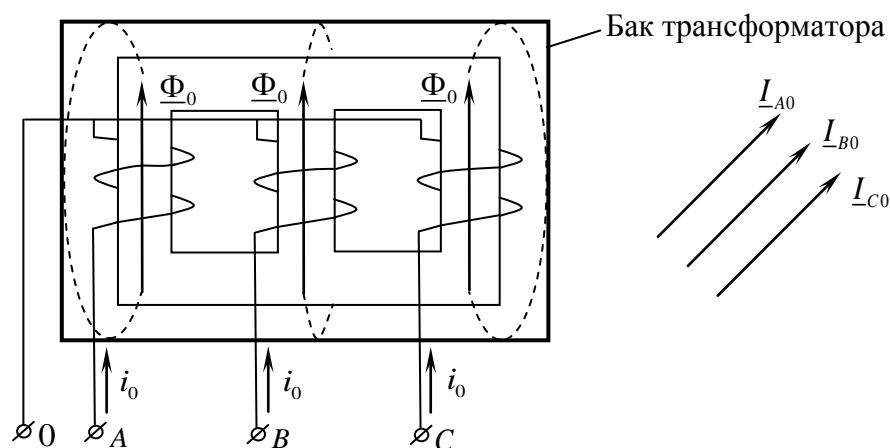


Рис. 3.14. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном трехстержневом трансформаторе

Таблица 3.1

Сопротивления X_0 токам нулевой последовательности

Тип трансформатора и схема соединения обмоток	X_0
Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0 / Δ	X_1
Трехфазная группа однофазных трансформаторов, трехфазные четырех- и пятистержневой трансформаторы: с соединением обмоток Y_0 / Y ,	∞
то же Y_0 / Y_0	X_1
Трехфазный трехстержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0 / Y ,	$X_1 + X_{\mu_0}$
то же Y_0 / Y_0	Т-образная схема (рис. 3.12)

У трехобмоточных трансформаторов с соединением обмотки I в звезду с заземленной нейтралью обмотка II , как и у двухобмоточных трансформаторов, может иметь разные схемы соединения, а дополнительная обмотка III обычно соединена в треугольник. Поэтому в практических расчетах для таких трансформаторов можно принимать $X_{\mu_0} = \infty$.

Основные варианты схем соединения обмоток трехобмоточных трансформаторов и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности приведены на рис. 3.15–3.20.

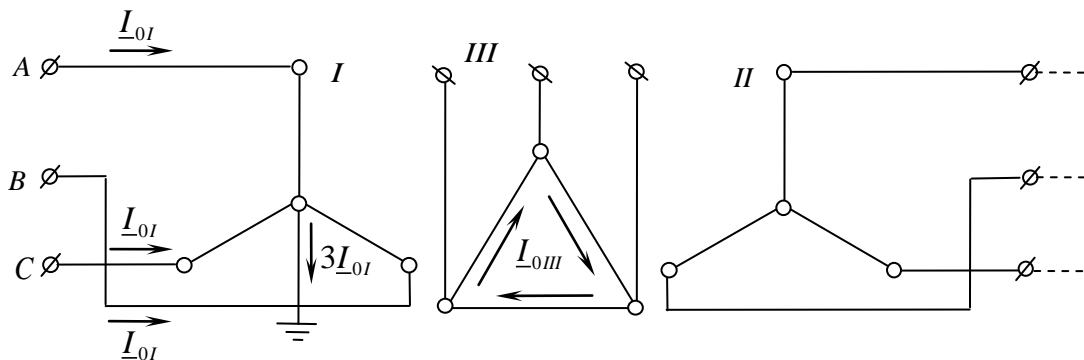


Рис. 3.15. Схема соединения обмоток трехобмоточного трансформатора $Y_0 / Y / \Delta$

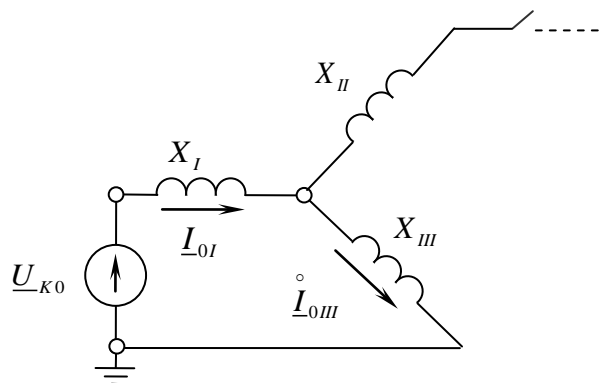


Рис. 3.16. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0 / Y / \Delta$ для токов нулевой последовательности

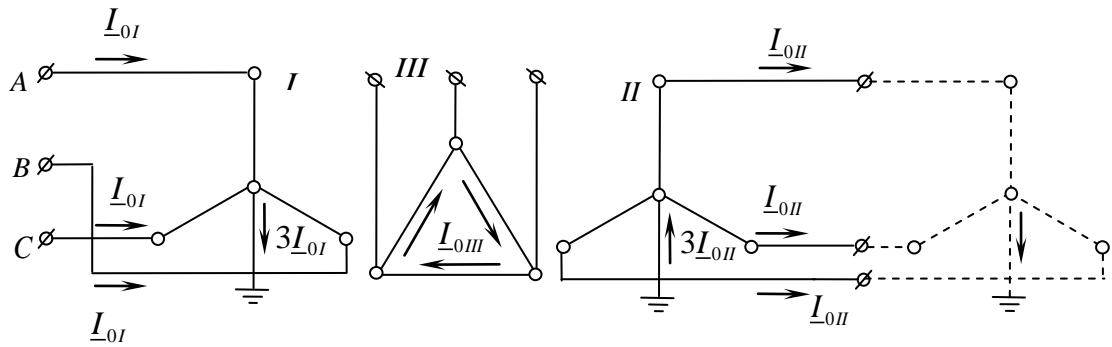


Рис. 3.17. Схема соединения обмоток трехобмоточного трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta$

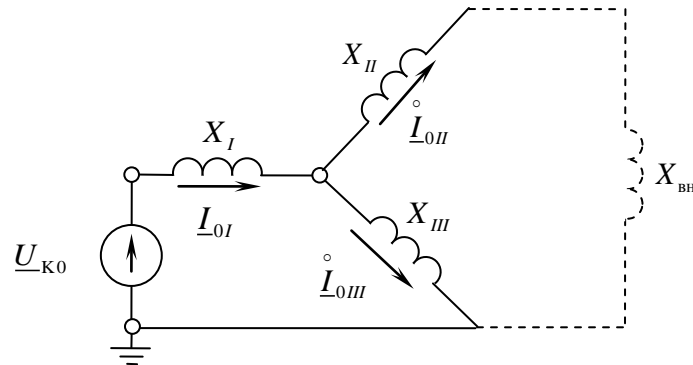


Рис. 3.18. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta$ для токов нулевой последовательности

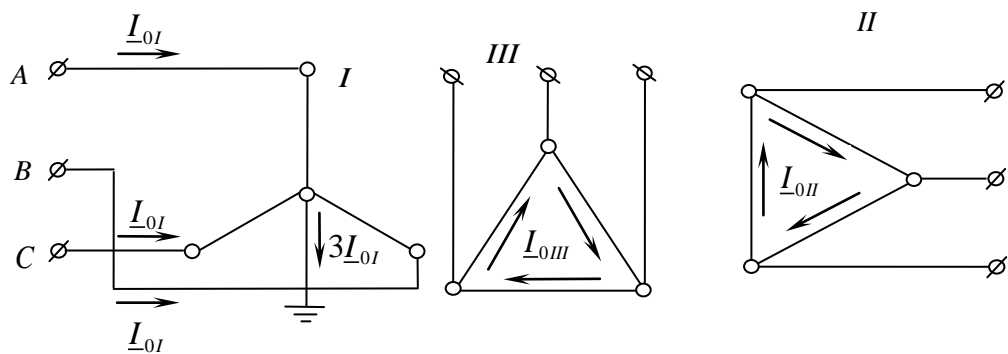


Рис. 3.19. Схема соединения обмоток трехобмоточного трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$

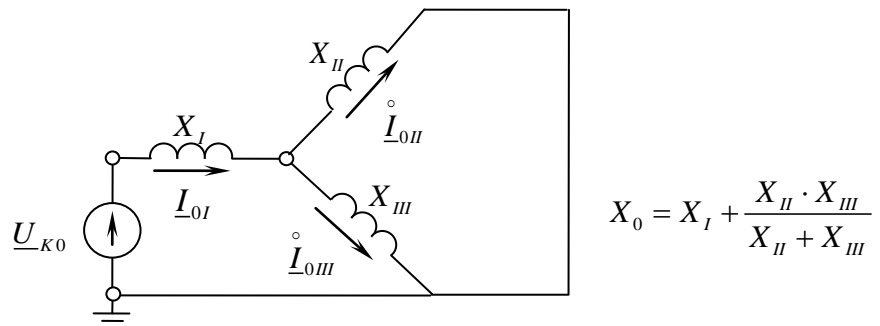


Рис. 3.20. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$ (двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой, $Y_0/\Delta-\Delta$) для токов нулевой последовательности

Для циркуляции в обмотке II токов нулевой последовательности необходимо, чтобы в электрически связанной цепи был хотя бы один трансформатор с заземленной нейтралью.

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что обмотка среднего напряжения (СН) электрически связана с обмоткой высшего напряжения (ВН), т. е. является частью обмотки ВН.

Сопротивление обмотки СН X_{II} войдет в схему нулевой последовательности при условии, если в электрически связанной цепи обмотки II есть еще хотя бы один трансформатор с заземленной нейтралью, иначе по цепи обмотки II тока нулевой последовательности не будет. Ток в нейтрали автотрансформатора будет определяться утроенной разностью токов первичной и вторичной обмоток $3(I_{0I} - I_{0II})$, причем каждый из токов должен быть определен при напряжении $U_{ВН}$ и $U_{СН}$, соответственно.

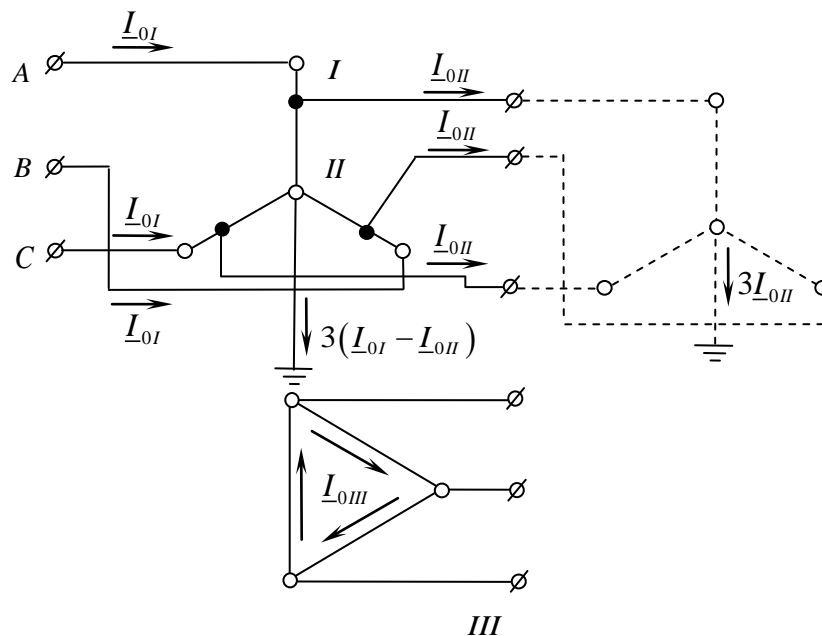


Рис. 3.21. Схема соединения обмоток автотрансформатора $Y_{\text{авт}} / Y / \Delta$

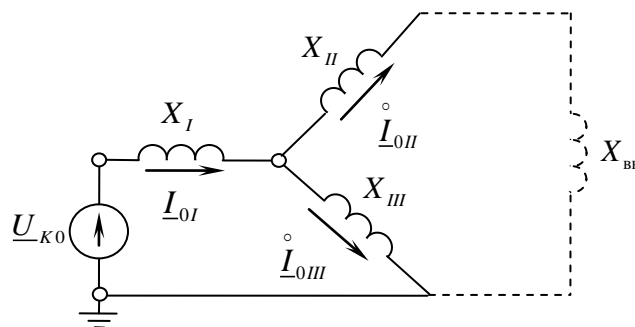


Рис. 3.22. Схема замещения автотрансформатора $Y_{\text{авт}} / Y / \Delta$
 для токов нулевой последовательности

Иногда нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов заземляют не непосредственно, а через резистор, реактор и т. п. Поскольку по этим элементам возможна циркуляция токов нулевой последовательности, то они должны быть учтены в схеме замещения нулевой последовательности.

При заземлении нейтрали обмотки, соединенной в звезду через сопротивление R_N или X_N , каждое из сопротивлений по отношению к токам нулевой последовательности оказывается включенным последовательно трем фазам этой обмотки. При этом падение напряжения в сопротивлении R_N или X_N от токов нулевой последовательности всех фаз в три раза больше, чем от тока одной фазы. Вследствие этого в схеме замещения нулевой последовательности сопротивление R_N или X_N соединяется последовательно с сопротивлением такой обмотки и учитывается утроенной величиной $3R_N$.

3.2.5. Параметры воздушных линий электропередачи

Для токов прямой и обратной последовательностей сопротивления X_1 и X_2 линий электропередачи (ЛЭП) одинаковы, так как магнитносвязанные цепи ЛЭП неподвижны друг относительно друга.

Ток нулевой последовательности воздушных линий (ВЛ) возвращается через землю и по заземленным цепям, расположенным параллельно ВЛ (грозозащитные тросы, рельсовые пути, трубопроводы, проводящие оболочки кабелей).

Основная трудность достоверного определения сопротивления ВЛ токам нулевой последовательности связана с учетом распределения тока в земле, которое зависит от свойств грунта. Точное определение тока в земле в общем виде является решением трудоемкой задачи.

Рассмотрим однопроводную линию переменного тока, подвешенную на высоте h над поверхностью земли (рис. 3.23), обратным проводом которой предполагается земля.

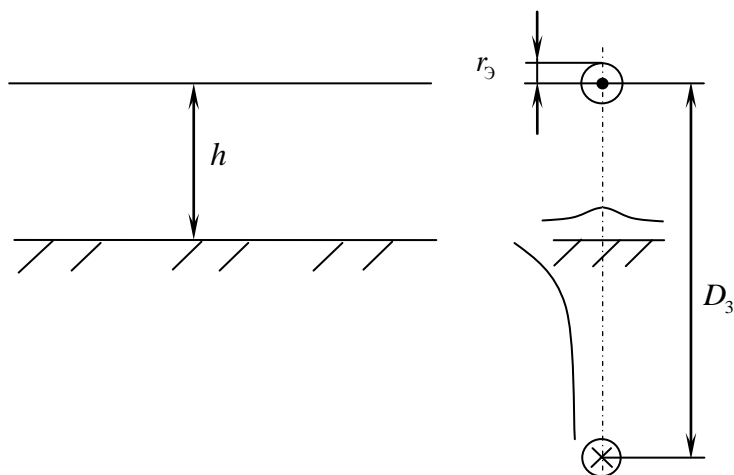


Рис. 3.23. Однопроводная линия «провод – земля» и характеристика распределения плотности тока в земле

Такую линию иначе называют петлей «провод – земля». Характер изменения плотности тока в земле по мере удаления от провода и углубления представлен на [рис. 3.23](#).

Плотность тока, наибольшая на поверхности земли под проводником, уменьшается по мере удаления в сторону и вглубь.

Индуктивность такой линии может быть определена как индуктивность эквивалентной двухпроводной линии с расстоянием D_3 между прямым и обратным проводами. D_3 – эквивалентная глубина возврата тока через землю (глубина залегания фиктивного обратного провода) определяется, м, по формуле

$$D_3 = \frac{65,93}{\sqrt{f\lambda}},$$

где f – частота тока, Гц; λ – удельная проводимость земли, См/см.

При промышленной частоте переменного тока $f_0 = 50$ Гц и среднем значении проводимости земли $\lambda = 10^{-4}$ См/см величина $D_3 = 932,4$ м. В случае отсутствия данных о проводимости земли принимают $D_3 = 1000$ м.

Индуктивное сопротивление линии «провод – земля» определяется как сопротивление эквивалентной двухпроводной линии, Ом/км:

$$X_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_3},$$

где r_3 – эквивалентный радиус провода, м; для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов $r_3 = 0,95r$; r – истинный радиус провода.

Для линии с расщепленными проводами вместо r_3 надо подставить r_{cp} :

$$r_{cp} = \sqrt[n]{r_3 \cdot a_{cp}^{n-1}},$$

где a_{cp} – среднее геометрическое расстояние между проводами расщепленной фазы, м; n – количество проводов в фазе.

Активное сопротивление петли «провод – земля» складывается из активного сопротивления провода R_{II} и дополнительного сопротивления R_3 , учитывающего потерю активной мощности в земле от протекающего в ней тока:

$$R = R_{II} + R_3.$$

Сопротивление R_3 может быть определено из приближенного выражения

$$R_3 = \pi^2 f \cdot 10^{-4}. \quad (3.6)$$

При частоте $f = 50$ Гц значение R_3 практически равно $0,05$ Ом/км.

Как следует из выражения (3.6), R_3 практически не зависит от проводимости земли. Это объясняется тем, что с изменением проводимости земли плотность тока в ней меняется. При этом потери активной мощности в земле при заданной частоте тока остаются практически неизменными.

Сопротивление, обусловленное взаимной индукцией между двумя парами петель «провод – земля» с расстоянием d между осями проводов (рис. 3.24), можно определить из выражения

$$\underline{Z}_M = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{d}. \quad (3.7)$$

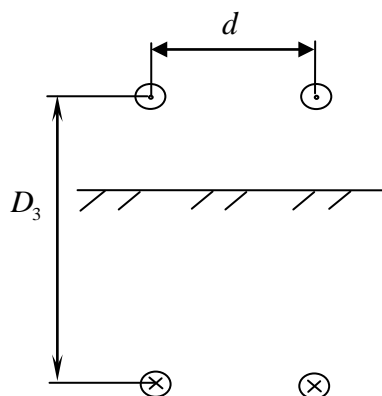
Для трехфазной одноцепной ЛЭП с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимоиндукции между фазами определяется по выражению (3.7) при замене расстояния d на $D_{\text{ср}}$:

$$\underline{Z}_{M\text{ср}} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}},$$

где $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{AC} \cdot d_{BC}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A, B, C .

Зная $\underline{Z}_L = R + jX_L$ и $\underline{Z}_{M\text{ср}}$, нетрудно определить сопротивление \underline{Z}_0 токам нулевой последовательности рассматриваемой трехфазной одноцепной

линии. Оно численно равно эффективному (действующему) значению напряжения, которое должно быть приложено к каждому проводу данной линии, чтобы покрыть падение напряжения при протекании в каждой фазе токов нулевой последовательности с эффективным значением $I_{A0} = I_{B0} = I_{C0} = 1$ А.



$$1 \cdot \underline{Z}_{0\text{ср}} = 1 \cdot \underline{Z}_L + 1 \cdot \underline{Z}_M + 1 \cdot \underline{Z}_M,$$

Рис. 3.24. Две пары петель «провод – земля»

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_L + \underline{Z}_{M\text{ср}} + \underline{Z}_{M\text{ср}} = \underline{Z}_L + 2 \cdot \underline{Z}_{M\text{ср}}.$$

С учетом вышеприведенных выражений и потерь мощности в земле

$$\underline{Z}_0 = R_{\Pi} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{R_{\text{ср}}},$$

где $R_{\text{ср}} = \sqrt[3]{r_3 D_{\text{ср}}^2}$ – средний геометрический радиус системы трех проводов.

Отметим, что если по линии протекает ток прямой последовательности с эффективным значением 1 А ($\underline{I}_{A1} = 1, \underline{I}_{B1} = a^2, \underline{I}_{C1} = a$), то

$$1 \cdot \underline{Z}_1 = 1 \cdot \underline{Z}_L + a^2 \underline{Z}_{M\text{ср}} + a \underline{Z}_{M\text{ср}},$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_L + (a^2 + a) \underline{Z}_{M\text{ср}} = \underline{Z}_L - \underline{Z}_{M\text{ср}}.$$

После подстановки и преобразования имеем:

$$\underline{Z}_1 = R_{\Pi} + j0,145 \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_3}.$$

Сравним \underline{Z}_0 и \underline{Z}_1 :

$$\underline{Z}_{1\text{ср}} = \underline{Z}_L - \underline{Z}_M,$$

$$\underline{Z}_{0\text{ср}} = \underline{Z}_L + 2\underline{Z}_M.$$

Наличие взаимной индукции уменьшает сопротивление токам прямой (обратной) последовательности и увеличивает сопротивление токам нулевой последовательности.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной ЛЭП дополнительно увеличивается из-за взаимной индукции \underline{Z}_{0I-II} с проводами параллельной линии. Принципиальная схема двухцепной ЛЭП представлена на [рис. 3.25](#).

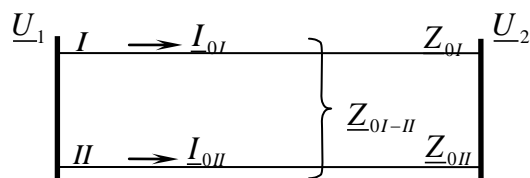


Рис. 3.25. Принципиальная схема двухцепной ЛЭП

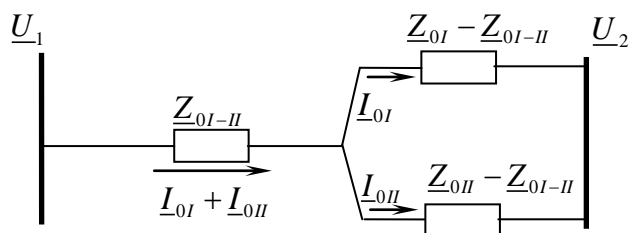


Рис. 3.26. Схема замещения двухцепной ЛЭП

Таблица 3.2

Средние значения соотношений между X_0 и X_1

Характеристика воздушной линии	X_0 / X_1
Одноцепная линия без тросов	3,5
То же со стальными тросами	3,0
То же с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная линия без тросов	5,5
То же со стальными тросами	4,7
То же с хорошо проводящими тросами	3,0

Примечание. В ориентировочных расчетах для трехжильных кабелей можно принимать сопротивления токам нулевой последовательности $R_0 \approx 10R_1$, $X_0 \approx (3,5 - 4,6) X_1$.

В этих условиях схему замещения двухцепной ЛЭП для токов нулевой последовательности принято представлять трехлучевой звездой (рис. 3.26).

При практических расчетах для оценки поперечной несимметрии можно использовать обычную схему замещения, а сопротивления должны учитывать взаимоиндуктивное влияние цепей друг на друга.

При продольной несимметрии схема замещения двухцепной ЛЭП может быть только трехлучевой звездой.

Грозозащитные тросы (заземленные) снижают индуктивное сопротивление нулевой последовательности линии.

В приближенных практических расчетах можно использовать соотношения между сопротивлениями токам нулевой и прямой последовательностей, приведенными в табл. 3.2.

3.3. Схемы отдельных последовательностей

Первоочередной задачей расчета несимметричного переходного процесса является в общем случае составление схем замещения всех трех последовательностей. При аналитическом решении задачи по этим схемам находят результирующие сопротивления схем: $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$. По схеме прямой последовательности необходимо найти результирующую ЭДС эквивалентного источника E_Σ .

Элементы схем замещения представляются в относительных или в именованных единицах, приведенных в первом случае к выбранным базисным условиям, а во втором – к одной ступени напряжения.

3.3.1. Схемы прямой и обратной последовательностей

Схема замещения прямой последовательности является обычной схемой, которую составляют при расчете любого симметричного трехфазного установившегося или переходного режима.

Началом схемы прямой последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей (при применении метода типовых кривых нагрузки из схемы замещения исключают); это точка нулевого потенциала схемы прямой последовательности.

Концом схемы прямой последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия, в которой указывают напряжение прямой последовательности.

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и токов прямой последовательности, схема обратной последовательности по структуре аналогична схеме прямой последовательности и состоит из тех же элементов.

Различие между ними состоит прежде всего в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимаются равными нулю; кроме того, генераторы и нагрузки (при необходимости учета последних) входят в нее своими сопротивлениями обратной последовательности, а все остальные элементы – теми же сопротивлениями, что и в схему прямой последовательности.

Началом и концом схемы обратной последовательности считаются соответственно те же точки, что и для схемы замещения прямой последовательности.

Рассмотрим пример составления схем прямой и обратной последовательностей при несимметричном коротком замыкании на линии $W1$ в схеме, представленной на [рис. 3.27](#).

Схема прямой последовательности приведена на [рис. 3.28](#).

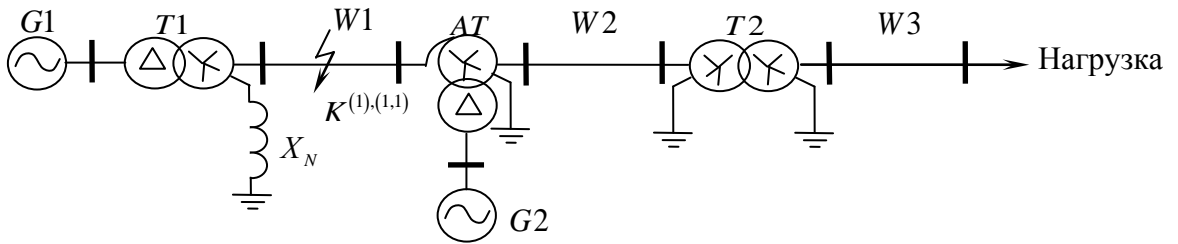


Рис. 3.27. Электрическая схема ЭЭС

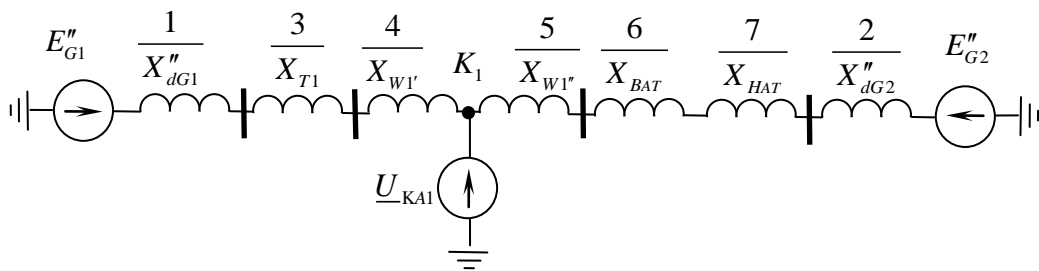


Рис. 3.28. Схема замещения прямой последовательности

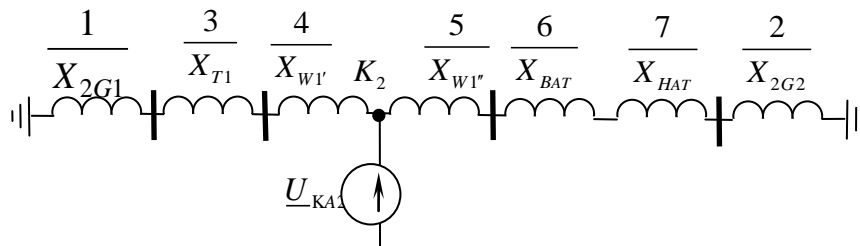


Рис. 3.29. Схема замещения обратной последовательности

Суммарное сопротивление прямой последовательности:

$$X_{1\Sigma} = (X_1 + X_3 + X_4) \parallel (X_2 + X_7 + X_6 + X_5).$$

ЭДС эквивалентного источника

$$E_{\Sigma} = \frac{E_{G1}'' (X_2 + X_5 + X_6 + X_7) + E_{G2}'' (X_1 + X_3 + X_4)}{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7}.$$

По такому алгоритму рассчитывается только поперечная несимметрия. Схема обратной последовательности представлена на [рис. 3.29](#).

$$X_{2\Sigma} = (X_1 + X_3 + X_4) \parallel (X_2 + X_7 + X_6 + X_5).$$

3.3.2. Схема замещения нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю и параллельные ей цепи. В силу этого путь циркуляции токов нулевой последовательности отличается от пути токов прямой и обратной последовательностей. Схема нулевой последовательности в значительной мере определяется схемами соединения обмоток (авто)трансформаторов. Составление схемы нулевой последовательности следует начинать от узла, где возникла несимметрия, считая, что в этом узле все фазы замкнуты накоротко и в нём приложено напряжение нулевой последовательности. Далее следует выявить в пределах каждой электрически связанной цепи возможные пути протекания токов нулевой последовательности.

Замкнутый контур для токов нулевой последовательности возможен только в том случае, если в цепи, электрически связанной с узлом КЗ, имеется по меньшей мере одна заземлённая нейтраль. При наличии нескольких заземлённых нейтралей в этой цепи образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности.

Циркуляция токов нулевой последовательности возможна только при соблюдении определённых условий. Так, если трансформатор имеет соединение обмоток Y_0/Δ , то ток нулевой последовательности в обмотке, соединённой в звезду, наводит в обмотке, соединённой в треугольник, ЭДС, и, следовательно, ток, который, протекая по фазам треугольника, не выходит за его пределы. Вся сеть, которая присоединена со стороны треугольника, в схему нулевой последовательности не входит, независимо от того, имеются ли в ней заземлённые нейтралы или их нет.

В (авто)трансформаторе с соединением обмоток по схеме $(Y_{0\text{ авто}}/Y_0)$ Y_0/Y_0 трансформация токов нулевой последовательности возможна при условии, что в каждой обмотке обеспечен путь для этих токов. При соблюдении этого в схему нулевой последовательности входят как (авто)трансформатор, так и все элементы, по которым циркулируют токи нулевой последовательности с обеих сторон (авто)трансформатора.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль (авто)трансформатора (как указывалось ранее), генератора, двигателя, нагрузки должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схему замещения составляют на одну фазу, а через указанное сопротивление протекает сумма токов нулевой последовательности всех трёх фаз.

Началом схемы нулевой последовательности считают узел, в котором объединены ветви с нулевым потенциалом, а её концом – узел, где возникла несимметрия.

На [рис. 3.30](#) показан пример составления схемы замещения нулевой последовательности для электроэнергетической системы, принципиальная схема которой приведена на [рис. 3.27](#).

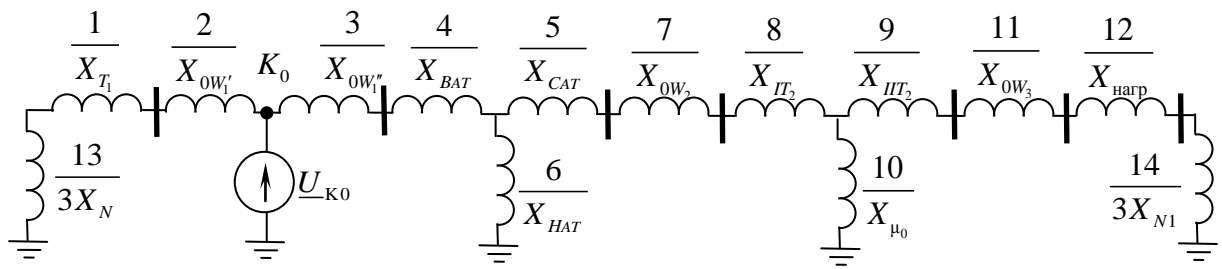


Рис. 3.30. Схема замещения нулевой последовательности

Однофазное КЗ или двухфазное КЗ на землю предполагается в указанном узле K линии электропередачи $W1$. Трансформатор $T2$ предполагается трёхстержневым, конструкция автотрансформатора и трансформатора $T1$ не влияет на схему замещения, так как они имеют обмотки, соединенные треугольником. Сопротивления X_N и X_{N1} , через которые заземлены нейтрали трансформатора $T1$ и нагрузки, введены в схему замещения утроенной величиной, поскольку в них протекают утроенные значения токов нулевой последовательности.

Суммарное сопротивление нулевой последовательности:

$$X_{0\Sigma} = (X_1 + X_2 + X_{13}) \parallel \left\{ \begin{array}{l} [(X_9 + X_{11} + X_{12} + X_{14}) \parallel X_{10} + (X_5 + X_7 + X_8)] \parallel X_6 + \\ + (X_3 + X_4) \end{array} \right\}.$$

3.4. Распределение и трансформация токов и напряжений

Фазные токи и напряжения при несимметричных режимах проще всего находить суммированием симметричных составляющих. Поскольку рассматриваемые схемы или устройства ЭЭС предполагаются выполненными симметрично, распределение токов и напряжений в каждой последовательности находим в схеме одноименной последовательности, руководствуясь правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях. При определении фазных величин токов и напряжений через их симметричные составляющие за трансформаторами или автотрансформаторами следует иметь в виду, что симметричные составляющие токов и напряжений при переходе через них изменяются не только по величине, в соответствии с коэффициентом трансформации, но и по фазе в зависимости от соединения обмоток.

Рассмотрим двухобмоточный трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$ (рис. 3.31).

3.4. Распределение и трансформация токов и напряжений

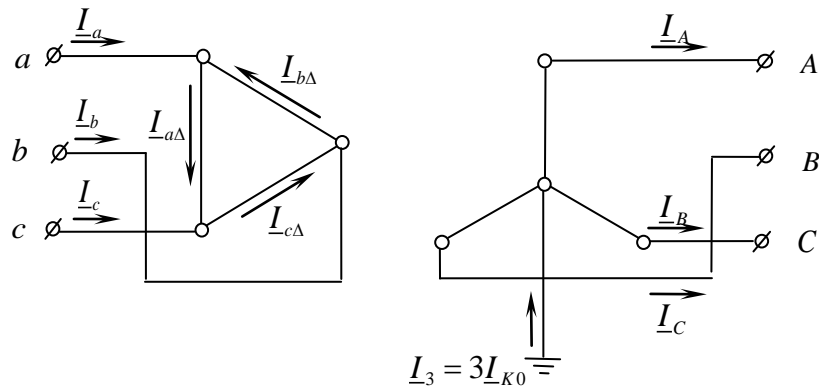


Рис. 3.31. Схема трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

Если число витков обмотки, соединенной в треугольник, – w_Δ , а обмотки, соединенной в звезду, – w_Y , то линейный коэффициент трансформации

$$k = \sqrt{3} \frac{w_Y}{w_\Delta}.$$

При заданных положительных направлениях фазных токов на стороне звезды $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ величины токов в линейных проводах за треугольником могут быть определены как

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{a\Delta} - \underline{I}_{b\Delta} = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_A - \underline{I}_B}{\sqrt{3}} k,$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_{b\Delta} - \underline{I}_{c\Delta} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_B - \underline{I}_C}{\sqrt{3}} k,$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{c\Delta} - \underline{I}_{a\Delta} = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_C - \underline{I}_A}{\sqrt{3}} k.$$

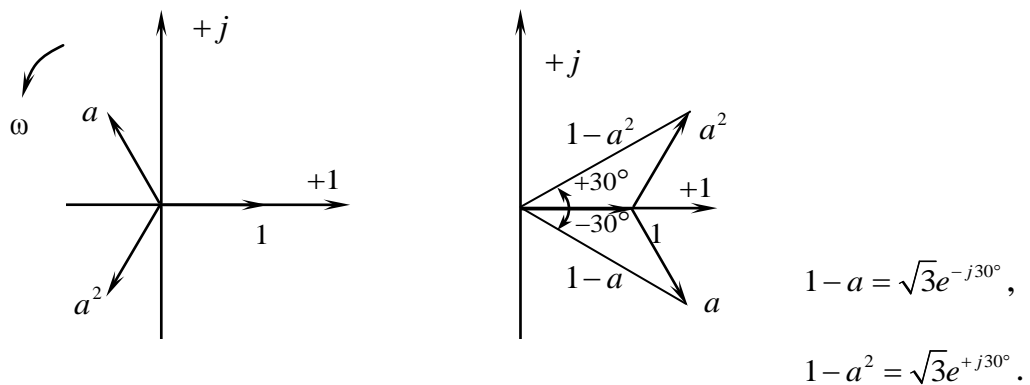


Рис. 3.32. К определению векторов при трансформации симметричных составляющих

Если фазные токи и напряжения на стороне обмотки, соединенной в звезду, выразить через симметричные составляющие, то величины фазных тока и напряжения за обмоткой, соединенной в треугольник, фазы A будут:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \frac{\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} - a^2 \underline{I}_{A1} - a \underline{I}_{A2} - \underline{I}_0}{\sqrt{3}} k = \frac{\underline{I}_{A1}(1 - a^2) + \underline{I}_{A2}(1 - a)}{\sqrt{3}} k = \\ &= \frac{\underline{I}_{A1} \sqrt{3} e^{+j30^\circ} + \underline{I}_{A2} \sqrt{3} e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} k = \left(\underline{I}_{A1} e^{+j30^\circ} + \underline{I}_{A2} e^{-j30^\circ} \right) k, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\sqrt{3}} \frac{1}{k} = \frac{\underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0 - (a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{k} = \\ &= \left(\underline{U}_{A1} e^{+j30^\circ} + \underline{U}_{A2} e^{-j30^\circ} \right) \frac{1}{k}. \end{aligned}$$

Это позволяет сделать вывод о том, что симметричные составляющие прямой последовательности при переходе через трансформатор $Y_0/\Delta - 11$ поворачиваются на плюс 30° , векторы обратной последовательности поворачиваются на минус 30° . Векторные диаграммы напряжений прямой и обратной последовательностей при переходе через трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 11$ представлены на [рис. 3.33](#).

Правилу трансформации симметричных составляющих можно придать более общий характер: смещение систем прямой и обратной последовательностей по углу при трансформации со стороны Y на сторону Δ производится поворотом векторов прямой последовательности (против хода часовой стрелки) на угол $(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$, а векторов обратной последовательности (по ходу часовой стрелки) на угол минус $(360^\circ - 30^\circ \cdot N)$. При трансформации от Δ к Y знаки углов поворота меняются на обратные; здесь N – номер группы соединения обмоток (авто)трансформатора.

Для трансформаторов с соединением Y_0/Y_0 необходимо учитывать трансформацию симметричных составляющих нулевой последовательности.

При нечётной группе соединения обмоток, когда не требуется знать истинной взаимной ориентировки векторных диаграмм на обеих сторонах трансформатора, считают его соединение по группе 3 (или 9). При этом векторы прямой и обратной последовательностей поворачиваются на 270° (или 90°) в противоположные направления ([рис. 3.34](#)).

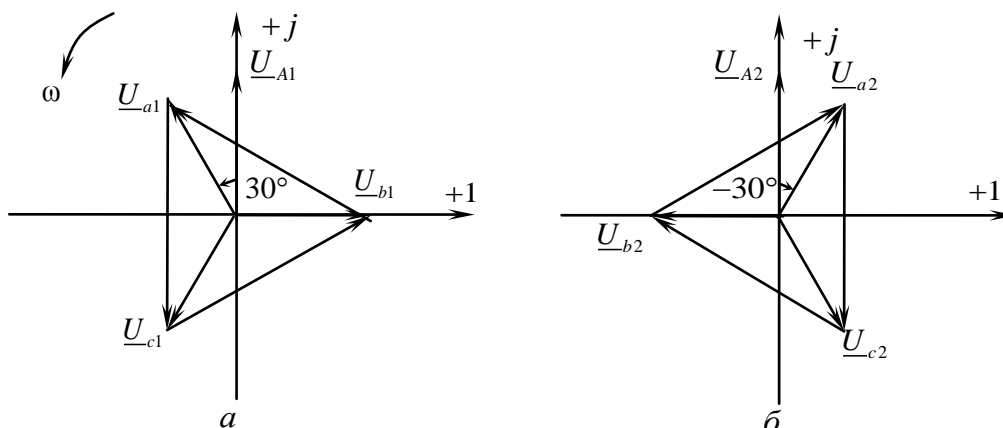


Рис. 3.33. Сдвиг напряжений прямой (*a*) и обратной (*б*) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 11$

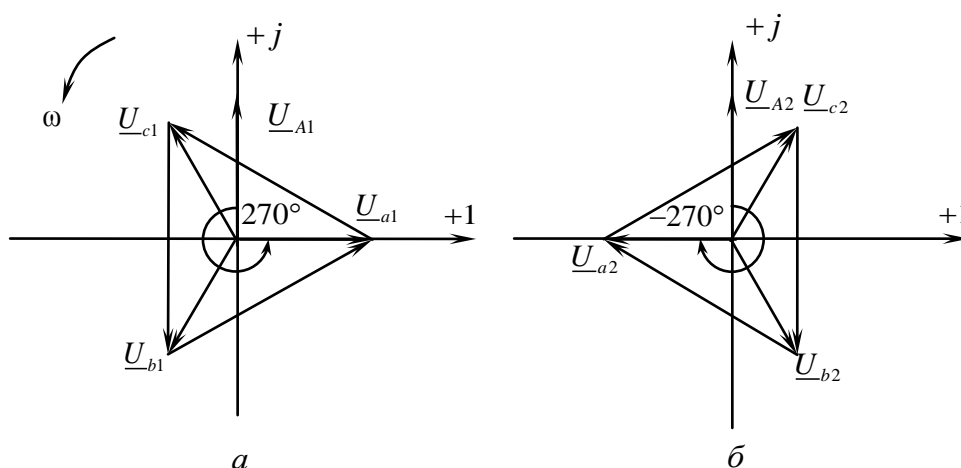


Рис. 3.34. Сдвиг напряжений прямой (*a*) и обратной (*б*) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 3$

Отсюда вытекает удобное для практики правило: при переходе через трансформатор с соединением Y/Δ (или Δ/Y) векторы прямой последовательности не смещать, а векторы обратной последовательности повернуть на 180° , т. е. у последних изменить знак на противоположный.

Отказ от учета действительной группы соединения обмоток трансформатора приводит к несовпадению обозначений линейных проводов за трансформатором с маркировкой, отвечающей действительной группе соединений.

При определении фазных токов и напряжений, выраженных в относительных единицах, следует помнить, что при трансформации симметричных составляющих должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные соответствующей группой соединения обмоток (авто)трансформатора.

3.5. Однократная поперечная несимметрия

Однократная поперечная несимметрия в аварийном узле системы может быть в общем случае представлена присоединением неодинаковых по величине сопротивлений \underline{Z}_A , \underline{Z}_B и \underline{Z}_C (рис. 3.35).

Решение задачи в общем виде приводит к весьма громоздким выражениям. Поэтому проще и наглядней проводить расчеты однократной поперечной несимметрии на основе использования граничных условий, характеризующих каждое конкретное замыкание.

Наиболее просто и наглядно граничные условия для любого несимметричного КЗ записывают, если предположить, что короткое замыкание происходит не в действительном узле заданной схемы, а на некоторых условно сверхпроводящих ответвлениях, подключенных в месте повреждения.

Будем полагать, что все несимметричные КЗ — металлические. Схемы отдельных последовательностей предполагаем состоящими только из индуктивных сопротивлений. В расчетах учитываем только основные гармоники тока и напряжения.

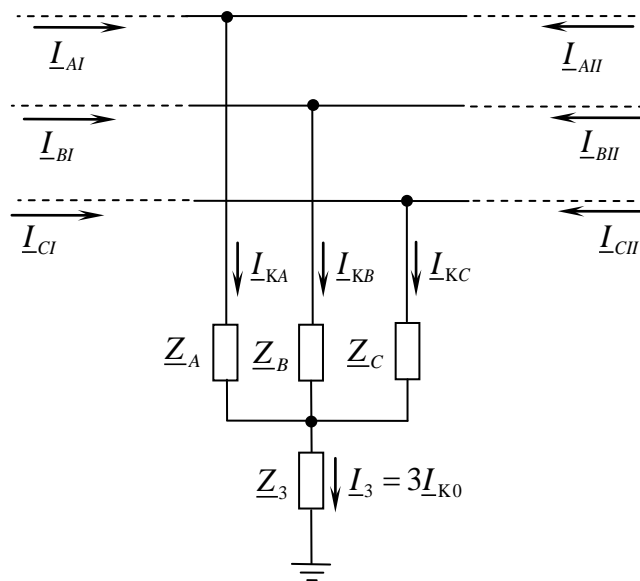


Рис. 3.35. Представление поперечной несимметрии в виде включения в фазы неодинаковых сопротивлений

При записи граничных условий примем, что режим работы фазы A отличается от режима работы фаз B и C , т. е. считаем фазу A особой фазой. За положительное направление фазных токов и их симметричных составляющих будем принимать направление к месту КЗ. Чтобы упростить записи, индекс вида короткого замыкания сохраним только в записи граничных условий и в окончательных результатах.

3.5.1. Однофазное короткое замыкание

Принципиальная схема однофазного КЗ (короткое замыкание одной фазы на землю) в ЭЭС, нейтрали (авто)трансформаторов которой заземлены, представлена на [рис. 3.36](#).

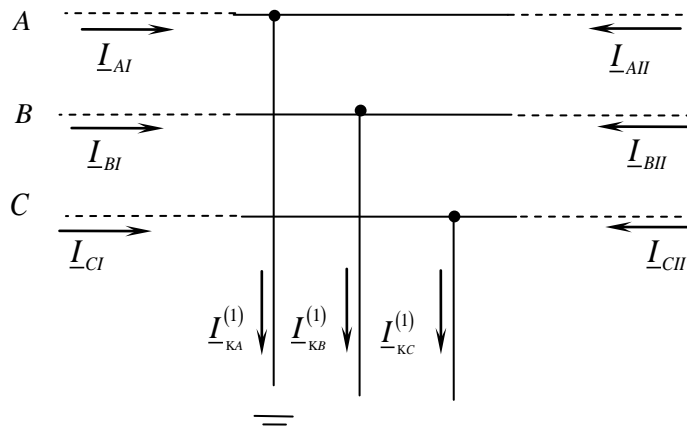


Рис. 3.36. Однофазное короткое замыкание

Оценивая эту схему, можем записать три уравнения граничных условий:

$$\underline{U}_{KA}^{(1)} = 0; \quad (3.8)$$

$$\underline{I}_{KB}^{(1)} = 0; \quad (3.9)$$

$$\underline{I}_{KC}^{(1)} = 0. \quad (3.10)$$

Для определения шести неизвестных – трех симметричных составляющих токов \underline{I}_{KA1} , \underline{I}_{KA2} , \underline{I}_{K0} и трех симметричных составляющих напряжений \underline{U}_{KA1} , \underline{U}_{KA2} , \underline{U}_{K0} – основных уравнений второго закона Кирхгофа, связывающих симметричные составляющие напряжений с симметричными составляющими токов в схемах своих последовательностей, формулы (3.3)–(3.5), решаем систему из шести уравнений (3.8)–(3.13):

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{E}_{\Sigma} - \underline{I}_{KA1} jX_{1\Sigma}, \quad (3.11)$$

$$\underline{U}_{KA2} = 0 - \underline{I}_{KA2} jX_{2\Sigma}, \quad (3.12)$$

$$\underline{U}_{K0} = 0 - \underline{I}_{K0} jX_{0\Sigma}. \quad (3.13)$$

Для заземленной фазы в соответствии с (3.8) имеем:

$$\underline{U}_{KA} = \underline{U}_{KA1} + \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = 0, \quad (3.8a)$$

$$\underline{U}_{KA1} = -(\underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}).$$

Установим соотношения, связывающие симметричные составляющие тока фазы A в месте короткого замыкания:

$$\underline{I}_{KB} = \underline{I}_{KB1} + \underline{I}_{KB2} + \underline{I}_{KB0} = a^2 \underline{I}_{KA1} + a \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 0, \quad (3.9a)$$

$$\underline{I}_{K0} = -a^2 \underline{I}_{KA1} - a \underline{I}_{KA2},$$

$$\underline{I}_{KC} = \underline{I}_{KC1} + \underline{I}_{KC2} + \underline{I}_{KC0} = a \underline{I}_{KA1} + a^2 \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 0. \quad (3.10a)$$

Подставив \underline{I}_{K0} из (3.9a) в (3.10a), получим:

$$a \underline{I}_{KA1} + a^2 \underline{I}_{KA2} - a^2 \underline{I}_{KA1} - a \underline{I}_{KA2} = 0,$$

$$\underline{I}_{KA1} (a - a^2) = \underline{I}_{KA2} (a - a^2),$$

$$\underline{U}_{K0} = -a^2 \underline{U}_{KA1} - a \underline{U}_{KA1} = -\underline{U}_{KA1} (a^2 + a) = \underline{U}_{KA1},$$

$$\underline{I}_{K0} = -a^2 \underline{I}_{KA1} - a \underline{I}_{KA2} = -\underline{I}_{KA1} (a^2 + a) = \underline{I}_{KA1}.$$

Искомые соотношения составят:

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2} = \underline{I}_{K0}. \quad (3.14)$$

На основании выражений (3.8a), (3.11)–(3.14) получим:

$$\begin{aligned} \underline{E}_{\Sigma} - \underline{I}_{KA1} j X_{1\Sigma} &= \underline{I}_{KA2} j X_{2\Sigma} + \underline{I}_{K0} j X_{0\Sigma} = \underline{I}_{KA1} j X_{2\Sigma} + \underline{I}_{KA1} j X_{0\Sigma} = \underline{I}_{KA1} j (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}); \\ \underline{E}_{\Sigma} &= \underline{I}_{KA1} j (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}), \end{aligned}$$

откуда ток прямой последовательности

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma}}{j (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}. \quad (3.15)$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{I}_{KA1} j (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}). \quad (3.16)$$

Ток поврежденной фазы в месте короткого замыкания

$$\underline{I}_{KA}^{(1)} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 3\underline{I}_{KA1}.$$

Отношение тока в поврежденной фазе к току прямой последовательности:

$$m^{(1)} = \frac{\underline{I}_{KA}}{\underline{I}_{KA1}} = \frac{3\underline{I}_{KA1}}{\underline{I}_{KA1}} = 3.$$

Фазные напряжения в аварийном узле:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KB}^{(1)} &= a^2 \underline{U}_{KA1} + a \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = a^2 \underline{I}_{KA1} j (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - a \underline{I}_{KA1} j X_{2\Sigma} - \underline{I}_{KA1} j X_{0\Sigma} = \\ &= j \left[(a^2 - a) X_{2\Sigma} + (a^2 - 1) X_{0\Sigma} \right] \underline{I}_{KA1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KC} &= a \underline{U}_{KA1} + a^2 \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = a \underline{I}_{KA1} j (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - a^2 \underline{I}_{KA1} j X_{2\Sigma} - \underline{I}_{KA1} j X_{0\Sigma} = \\ &= j \left[(a - a^2) X_{2\Sigma} + (a - 1) X_{0\Sigma} \right] \underline{I}_{KA1}. \end{aligned}$$

Соотношения между симметричными составляющими аварийных тока (3.14) и напряжения (3.8a) используют для построения соответствующих векторных диаграмм.

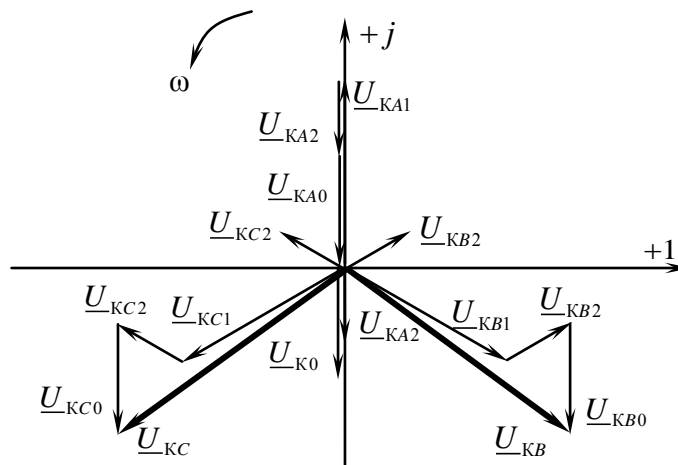


Рис. 3.37. Векторная диаграмма напряжений при однофазном КЗ

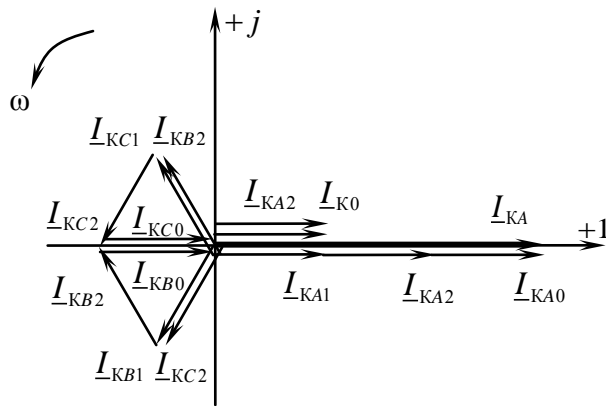


Рис. 3.38. Векторная диаграмма токов при однофазном КЗ

На [рис. 3.37](#) представлена векторная диаграмма напряжений в узле однофазного КЗ, а на [рис. 3.38](#) – векторная диаграмма токов.

Векторные диаграммы строят в координатах комплексной плоскости в выбранном масштабе, например, $\mu_U = 3,5$ кВ/км или $\mu_I = 0,8$ кА/см (цифры даны произвольно).

3.5.2. Двухфазное короткое замыкание на землю

Принципиальная схема двухфазного КЗ на землю (одновременное КЗ двух фаз *B* и *C* в одной и той же точке на землю) в ЭЭС, где нейтрали авто- и трансформаторов заземлены, представлена на [рис. 3.40](#).

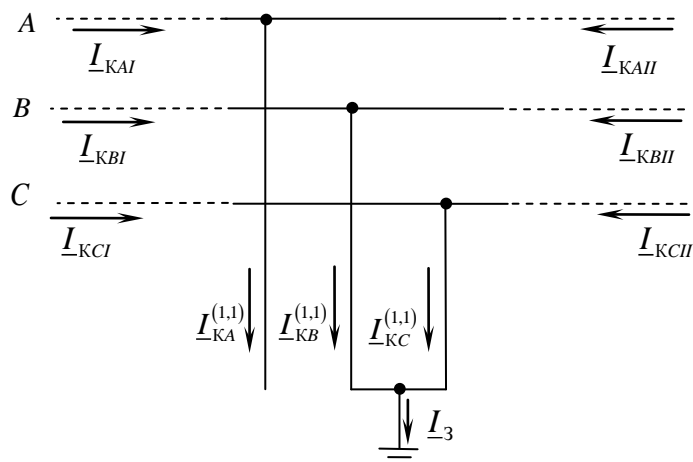


Рис. 3.40. Двухфазное короткое замыкание на землю

Такое повреждение характеризуется следующими граничными условиями:

$$\underline{I}_{KA}^{(1,1)} = 0; \quad (3.17)$$

$$\underline{U}_{KB}^{(1,1)} = 0; \quad (3.18)$$

$$\underline{U}_{KC}^{(1,1)} = 0. \quad (3.19)$$

Решим систему из шести уравнений (3.11)–(3.13) и (3.17)–(3.19).

Граничное условие (3.17) дает соотношение между симметричными составляющими токов (3.17a).

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = 0, \quad (3.17a)$$

$$\underline{I}_{KA1} = -(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0}).$$

$$\underline{U}_{KB} = \underline{U}_{KB1} + \underline{U}_{KB2} + \underline{U}_{KB0} = a^2 \underline{U}_{KA1} + a \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = 0, \quad (3.18a)$$

$$\underline{U}_{K0} = -a^2 \underline{U}_{KA1} - a \underline{U}_{KA2}.$$

$$\underline{U}_{KC} = \underline{U}_{KC1} + \underline{U}_{KC2} + \underline{U}_{KC0} = a \underline{U}_{KA1} + a^2 \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} = 0, \quad (3.19a)$$

$$a \underline{U}_{KA1} + a^2 \underline{U}_{KA2} - a^2 \underline{U}_{KA1} - a \underline{U}_{KA2} = 0,$$

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2}.$$

$$\underline{U}_{K0} = -a^2 \underline{U}_{KA1} - a \underline{U}_{KA1} = -\underline{U}_{KA1} (a^2 + a) = \underline{U}_{KA1}.$$

Соотношения между симметричными составляющими напряжения фазы *A* в аварийном узле:

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{U}_{KA2} = \underline{U}_{K0}. \quad (3.20)$$

Равенство симметричных составляющих напряжений позволяет приравнять правые части уравнений (3.12) и (3.13):

$$-\underline{I}_{KA2} jX_{2\Sigma} = -\underline{I}_{K0} jX_{0\Sigma}, \quad (3.21)$$

$$\underline{I}_{KA2} X_{2\Sigma} = \underline{I}_{K0} X_{0\Sigma}.$$

Прибавляем к левой и правой частям тождества (3.21) слагаемое $\underline{I}_{KA2} X_{0\Sigma}$:



$$\underline{I}_{KA2}X_{2\Sigma} + \underline{I}_{KA2}X_{0\Sigma} = \underline{I}_{K0}X_{0\Sigma} + \underline{I}_{KA2}X_{0\Sigma} = X_{0\Sigma}(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0}) = -\underline{I}_{KA1}X_{0\Sigma},$$

$$\underline{I}_{KA2}(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) = -\underline{I}_{KA1}X_{0\Sigma},$$

откуда

$$\underline{I}_{KA2}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}. \quad (3.22)$$

Прибавляем к левой и правой частям тождества (3.21) слагаемое $\underline{I}_{KA0}X_{2\Sigma}$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KA2}X_{2\Sigma} + \underline{I}_{K0}X_{2\Sigma} &= \underline{I}_{K0}X_{0\Sigma} + \underline{I}_{K0}X_{2\Sigma} = \underline{I}_{K0}(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}), \\ X_{2\Sigma}(\underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0}) &= -\underline{I}_{KA1}X_{2\Sigma} = \underline{I}_{K0}(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}), \end{aligned}$$

откуда

$$\underline{I}_{K0}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}. \quad (3.23)$$

Поскольку левые части уравнений (3.11) и (3.12) равны, приравниваем их правые части и произведем дальнейшие преобразования:

$$\underline{E}_{\Sigma} - \underline{I}_{KA1}jX_{1\Sigma} = -\underline{I}_{KA2}jX_{2\Sigma} = -\left(\underline{I}_{KA1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)jX_{2\Sigma} = \underline{I}_{KA1}j \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}},$$

$$\underline{E}_{\Sigma} = \underline{I}_{KA1}jX_{1\Sigma} + \underline{I}_{KA1}j \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}},$$

$$\underline{E}_{\Sigma} = \underline{I}_{KA1}j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma}),$$

откуда ток прямой последовательности фазы А

$$\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma})}. \quad (3.24)$$

Напряжение прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$\underline{U}_{KA1}^{(1,1)} = \underline{U}_{K0} = -\underline{I}_{K0}jX_{0\Sigma} = -\left(-\underline{I}_{KA1} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)jX_{0\Sigma} = \underline{I}_{KA1}j \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}. \quad (3.25)$$

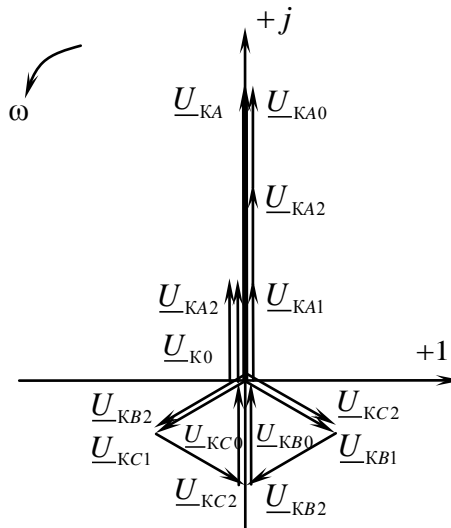


Рис. 3.41. Векторная диаграмма напряжений при двухфазном КЗ на землю

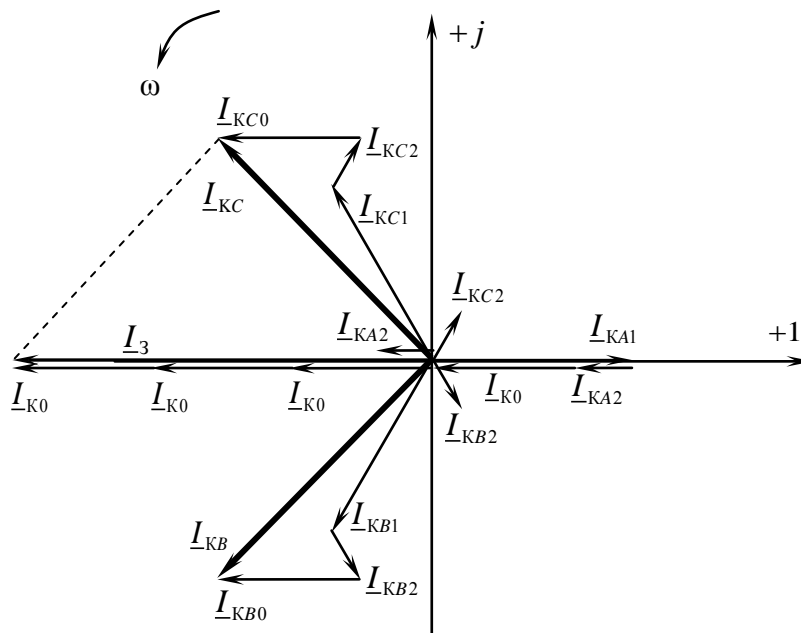


Рис. 3.42. Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ на землю

На основании соотношений (3.20) и (3.17a) построим векторные диаграммы напряжений (рис. 3.41) и токов (рис. 3.42) при двухфазном КЗ на землю.

Напряжение фазы *A* в аварийном узле

$$\underline{U}_{KA}^{(1,1)} = 3\underline{U}_{KA1}^{(1,1)}.$$

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{KB}^{(1,1)} &= a^2 \underline{I}_{KA1} + a \underline{I}_{KA2} + \underline{I}_{K0} = a^2 \underline{I}_{KA1} + a \left(-\underline{I}_{KA1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) - \underline{I}_{KA1} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \\
 &= \underline{I}_{KA1} \left(a^2 - a \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} - \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = \underline{I}_{KA1} \left(\frac{a^2 (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} - \frac{aX_{0\Sigma} + X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = \\
 &= \underline{I}_{KA1} \left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right), \\
 \underline{I}_{KC}^{(1,1)} &= \underline{I}_{KA1} \left(a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2 X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right).
 \end{aligned}$$

Ток в земле

$$\underline{I}_3 = 3\underline{I}_{K0}. \quad (3.26)$$

3.5.3. Двухфазное короткое замыкание

Принципиальная схема двухфазного КЗ (замыкание двух фаз *B* и *C* между собой) представлена на [рис. 3.43](#).

Уравнения граничных условий при двухфазном коротком замыкании следующие:

$$\underline{I}_{KA}^{(2)} = 0; \quad (3.27)$$

$$\underline{U}_{KB}^{(2)} - \underline{U}_{KC}^{(2)} = 0; \quad (3.28)$$

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = -\underline{I}_{KC}^{(2)}. \quad (3.29)$$

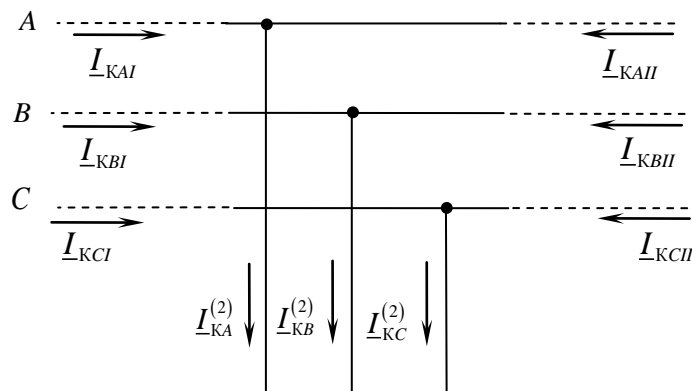


Рис. 3.43. Двухфазное короткое замыкание

Поскольку при этом повреждении система токов уравновешенная, т. е. $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$, то $\underline{I}_{K0} = 0$.

$$\underline{I}_{KA} = \underline{I}_{KA1} + \underline{I}_{KA2} = 0, \quad (3.27a)$$

$$\underline{I}_{KA} = -\underline{I}_{KA2}. \quad (3.30)$$

Выразив напряжения $\underline{U}_{KB}^{(2)}$ и $\underline{U}_{KC}^{(2)}$ через симметричные составляющие напряжения фазы A , с учетом (3.28) получим соотношение

$$\begin{aligned} \underline{U}_{KB} &= a^2 \underline{U}_{KA1} + a \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}, \\ \underline{U}_{KC} &= a \underline{U}_{KA1} + a^2 \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}, \\ a^2 \underline{U}_{KA1} + a \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0} &= a \underline{U}_{KA1} + a^2 \underline{U}_{KA2} + \underline{U}_{K0}, \\ a^2 \underline{U}_{KA1} - a \underline{U}_{KA1} &= a^2 \underline{U}_{KA2} - a \underline{U}_{KA2}, \\ \underline{U}_{KA1} (a^2 - a) &= \underline{U}_{KA2} (a^2 - a), \\ \underline{U}_{KA1} &= \underline{U}_{KA2}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Соотношение (3.31) позволяет приравнять правые части (3.11) и (3.12):

$$\underline{E}_\Sigma - \underline{I}_{KA1} jX_{1\Sigma} = -\underline{I}_{KA2} jX_{2\Sigma} = -\underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma},$$

$$\underline{E}_\Sigma = \underline{I}_{KA1} jX_{1\Sigma} + \underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma} = \underline{I}_{KA1} j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}).$$

Ток прямой последовательности при двухфазном коротком замыкании

$$\underline{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}. \quad (3.32)$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей фазы A в месте замыкания:

$$\underline{U}_{KA1}^{(2)} = \underline{U}_{KA2}^{(2)} = -\underline{I}_{KA2} jX_{2\Sigma} = \underline{I}_{KA1}^{(2)} jX_{2\Sigma}. \quad (3.33)$$

На основании соотношений (3.31) и (3.30) строим векторные диаграммы напряжений (рис. 3.44) и токов (рис. 3.45) в месте короткого замыкания.

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания:



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

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

Напряжение фазы A в аварийном узле $\underline{U}_{KA}^{(2)} = 2\underline{U}_{KA1}^{(2)}$.

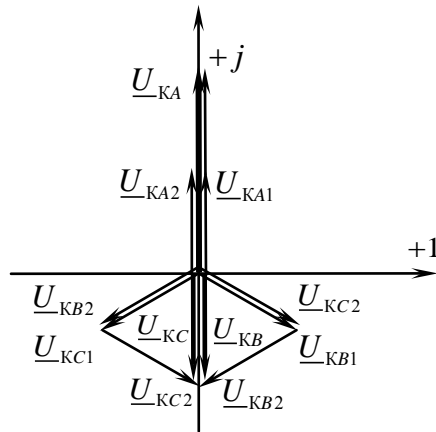


Рис. 3.44. Векторная диаграмма напряжений при двухфазном КЗ

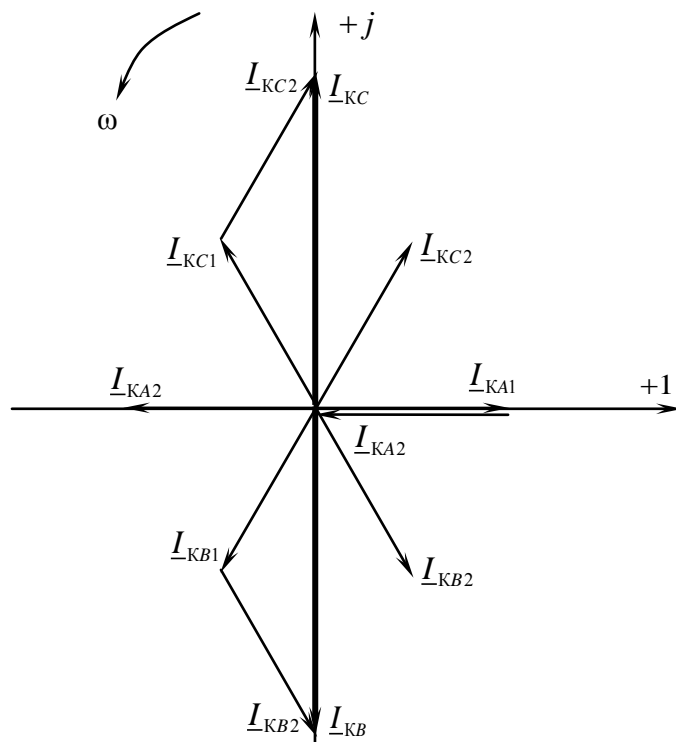


Рис. 3.45. Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ

3.5.4. Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии

Анализируя результаты рассмотрения несимметричных коротких замыканий, можно отметить, что токи обратной и нулевой последовательностей и напряжения всех последовательностей (табл. 3.3) при любом несимметричном КЗ пропорциональны току прямой последовательности в месте КЗ.

Таблица 3.3

Основные результаты оценки различных видов КЗ

Определяемая величина, ее обозначение	Симметричные составляющие токов и напряжений в месте несимметрии при коротких замыканиях		
	однофазном	двухфазном	двухфазном на землю
Ток прямой последовательности \underline{I}_{KA1}	$\frac{\underline{E}_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$	$\frac{\underline{E}_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$	$\frac{\underline{E}_\Sigma}{j\left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)}$
Ток обратной последовательности \underline{I}_{KA2}	\underline{I}_{KA1}	$-\underline{I}_{KA1}$	$-\underline{I}_{KA1} \frac{X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$
Ток нулевой последовательности \underline{I}_{K0}	\underline{I}_{KA1}	—	$-\underline{I}_{KA1} \frac{X_{2\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$
Напряжение прямой последовательности \underline{U}_{KA1}	$\underline{I}_{KA1} j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})$	$\underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma}$	$\underline{I}_{KA1} j \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$
Напряжение обратной последовательности \underline{U}_{KA2}	$-\underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma}$	\underline{U}_{KA1}	\underline{U}_{KA1}
Напряжение нулевой последовательности \underline{U}_{K0}	$-\underline{I}_{KA1} jX_{0\Sigma}$	—	\underline{U}_{KA1}

Следовательно, задача расчёта любого несимметричного короткого замыкания прежде всего состоит в нахождении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида КЗ.

Ток прямой последовательности особой фазы A при любом (n) виде несимметричного КЗ определяется по формуле

$$\underline{I}_{KA1}^{(n)} = \frac{\underline{E}_\Sigma}{j\left(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)}\right)}, \quad (3.34)$$

где $X_{\Delta}^{(n)}$ – дополнительная реактивность, величина которой для каждого вида КЗ определяется соответствующим выражением (табл. 3.4).

Модуль фазного аварийного тока в месте любого (n) несимметричного короткого замыкания определяется как

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{KA1}^{(n)}, \quad (3.35)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, определяемый по данным табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ при различных КЗ		
Вид замыкания	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное	0	1
Однофазное	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3
Двухфазное	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
Двухфазное на землю	$X_{2\Sigma} \parallel X_{0\Sigma}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

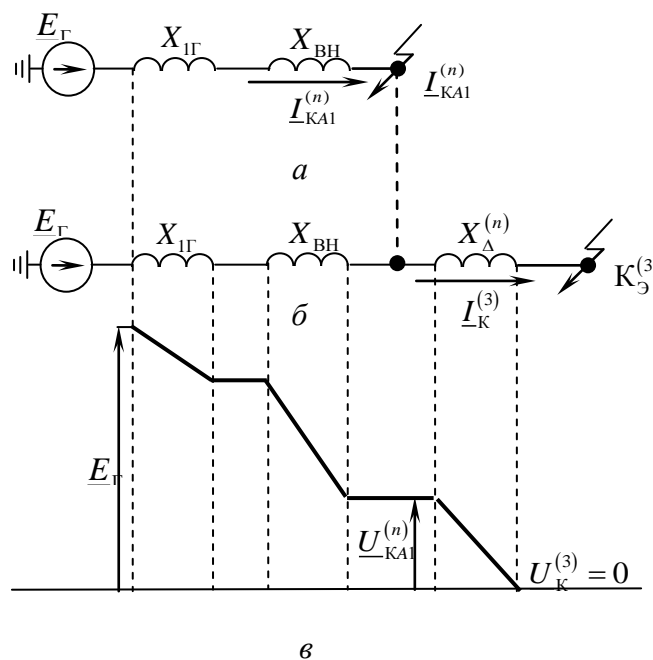


Рис. 3.45. Эпюра напряжения прямой последовательности (в) при несимметричном коротком замыкании (а) и эквивалентном трёхфазном КЗ (б)

Обобщённая запись выражения (3.34) позволила Н. Н. Щедрину сформулировать положение, называемое правилом эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания определяется как ток некоторого эквивалентного трех-

фазного КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $X_{\Delta}^{(n)}$, или (с учётом активных сопротивлений) $Z_{\Delta}^{(n)}$, величина которого определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательностей и видом КЗ, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги R_d . На [рис. 3.45](#) иллюстрирован смысл эквивалентного трёхфазного короткого замыкания $K_{\Sigma}^{(3)}$, при котором находятся аварийные ток по формуле (3.34) и напряжение по выражению прямой последовательности в месте заданного несимметричного КЗ:

$$\underline{U}_{KA1}^{(n)} = \underline{I}_{KA1}^{(n)} jX_{\Delta}^{(n)}. \quad (3.36)$$

Как видно из [рис. 3.45](#), при замене поперечной несимметрии моделью в виде эквивалентного трёхфазного КЗ напряжение $\underline{U}_{KA1}^{(n)}$ в месте несимметричного короткого замыкания сохраняется прежним; здесь $\underline{I}_{KA1}^{(n)} = \underline{I}_K^{(3)}$.

3.5.5. Комплексные схемы замещения

Установленные ранее соотношения между симметричными составляющими напряжения или тока особой фазы A в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида несимметричного КЗ соединить вместе схемы отдельных последовательностей, представленных результирующими сопротивлениями $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$, и образовать тем самым комплексную схему замещения для соответствующего вида КЗ ([рис. 3.46–3.48](#)).

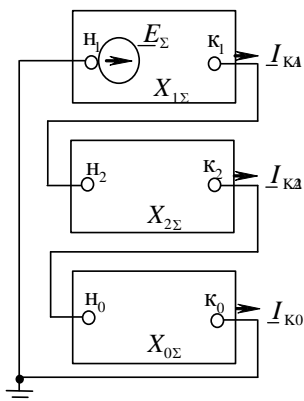


Рис. 3.46. Комплексная схема замещения при однофазном КЗ

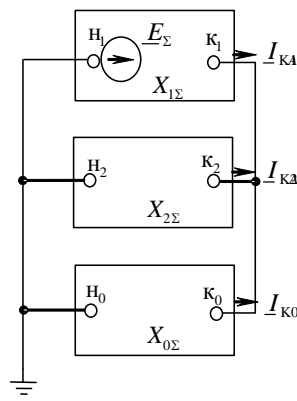


Рис. 3.47. Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ на землю

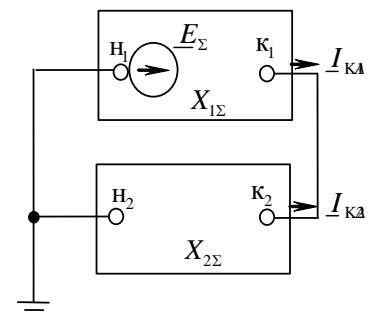


Рис. 3.48. Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ

В таких схемах соблюдаются не только соотношения между симметричными составляющими напряжения (между точками H_i и K_i , где $i = 1, 2, 0$), но также и соотношения между симметричными составляющими тока в месте короткого замыкания.

Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы A :

$$\underline{U}_{KA1}^{(1)} + \underline{U}_{KA2}^{(1)} + \underline{U}_{K0}^{(1)} = 0,$$

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)} = \underline{I}_{KA2}^{(1)} = \underline{I}_{KA1}^{(1)}.$$

Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы A

$$\underline{U}_{KA1}^{(1,1)} = \underline{U}_{KA2}^{(1,1)} = \underline{U}_{K0}^{(1,1)},$$

$$\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} + \underline{I}_{KA2}^{(1,1)} + \underline{I}_{K0}^{(1,1)} = 0.$$

Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы A :

$$\underline{U}_{KA1}^{(2)} = \underline{U}_{KA2}^{(2)},$$

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(2)}.$$

Комплексные схемы особенно удобны при использовании расчётных моделей и установок, поскольку в этом случае можно замерить приборами токи и напряжения отдельных последовательностей для любого участка и любой точки рассчитываемой системы.

3.5.6. Сравнение видов короткого замыкания

Правило эквивалентности прямой последовательности и установленные значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ (см. [табл. 3.4](#)) позволяют произвести сравнение различных видов КЗ (на примере индуктивной цепи короткого замыкания).

При разных видах КЗ существуют следующие неравенства:

$$X_{\Delta}^{(1)} > X_{\Delta}^{(2)} > X_{\Delta}^{(1,1)} > X_{\Delta}^{(3)} = 0, \quad (3.37)$$

соответственно

$$\underline{I}_{\text{КА1}}^{(1)} < \underline{I}_{\text{КА1}}^{(2)} < \underline{I}_{\text{КА1}}^{(1,1)} < \underline{I}_{\text{КА}}^{(3)}$$

и

$$\underline{U}_{\text{КА1}}^{(1)} > \underline{U}_{\text{КА1}}^{(2)} > \underline{U}_{\text{КА1}}^{(1,1)} > \underline{U}_{\text{КА}}^{(3)} = 0.$$

Далее выясним примерные пределы, в которых могут быть величины токов при несимметричных КЗ по сравнению с величинами токов трёхфазного короткого замыкания в той же точке схемы ЭЭС. Знание этих пределов представляет практический интерес, так как оно позволяет по известной для данной точки величине тока трёхфазного КЗ оценить в первом приближении возможные наибольшие и наименьшие значения тока при несимметричных коротких замыканиях. Подчеркнём, что устанавливаемые ниже предельные соотношения справедливы только для токов в месте короткого замыкания.

На основании (3.34) и (3.35) абсолютную величину отношения тока в месте любого (n) несимметричного металлического КЗ к току трёхфазного короткого замыкания при тех же условиях можно представить как

$$K_{(n-3)} = I_{\text{К}}^{(n)} / I_{\text{К}}^{(3)} = \frac{E_{\Sigma}^{(n)}}{E_{\Sigma}^{(3)}} \cdot \frac{m^{(n)}}{1 + X_{\Delta}^{(n)} / X_{1\Sigma}},$$

где у результирующей ЭДС поставлен верхний индекс, указывающий, какому виду КЗ отвечает её значение; для приближённой оценки пределов изменения $K_{(n-3)}$ пренебрегают различием величин $E_{\Sigma}^{(n)}$ и $E_{\Sigma}^{(3)}$.

В начальный момент короткого замыкания $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$, а при установившемся режиме КЗ вблизи генератора $X_{1\Sigma} \gg X_{2\Sigma}$. Следовательно, отношение $K_{(2-3)}$ находится примерно в пределах

$$\sqrt{3}/K \leq K_{(2-3)} \leq \sqrt{3}.$$

При достаточно большой удалённости короткого замыкания токи двух- и трёхфазного КЗ изменяются во времени мало, благодаря чему между ними в течение всего процесса короткого замыкания сохраняется приблизительно постоянное соотношение:

$$I_{\text{К}}^{(2)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{К}}^{(3)} = 0,87 \cdot I_{\text{К}}^{(3)}. \quad (3.38)$$

Выражение (3.38) выполняется только при замыканиях в радиальных (на ответвлении), но не в замкнутых сетях.

Поскольку реактивность $X_{0\Sigma}$ может измениться в очень широких пределах, то отношение $K_{(1-3)}$ находится в диапазоне

$$0 \leq K_{(1-3)} \leq 5.$$

При $X_{2\Sigma} \approx X_{1\Sigma}$ отношение $K_{(1-3)}$, находясь в пределах $0 \leq K_{(1-3)} \leq 5$, изменяется в функции $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}$, как показано на рис. 3.49.

Пределы отношения $K_{(1,1-3)}$ получаются те же, что и для $K_{(2-3)}$. Соответствующая кривая при $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$ представлена на рис. 3.49. Как видно, в диапазоне $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}$ от нуля до единицы токи несимметричных коротких замыканий превышают ток трёхфазного КЗ, а ток однофазного короткого замыкания в диапазоне (0,2–1,0) немного больше тока двухфазного КЗ на землю.

Для восстановления неравенства (3.37) на практике в сетях с эффективно-заземлёнными нейтральными частями нейтралей трансформаторов разземляют, что приводит к увеличению сопротивления $X_{0\Sigma}$ (уменьшается количество параллельных контуров для протекания токов нулевой последовательности).

Теперь рассмотрим характер распределения напряжений отдельных последовательностей (эпюры напряжений) фазы A при каждом несимметричном КЗ по мере удаления от места короткого замыкания (рис. 3.50–3.52); напряжения выражены в относительных единицах или приведены к одной ступени напряжения.

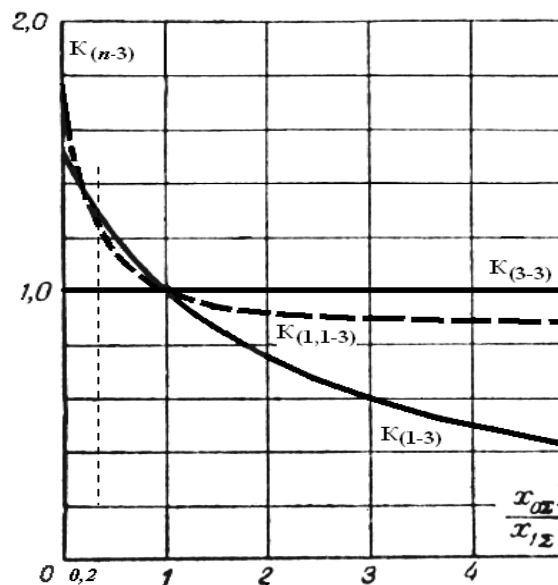


Рис. 3.49. Кривые изменения отношений $K_{(n-3)} = f(X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma})$

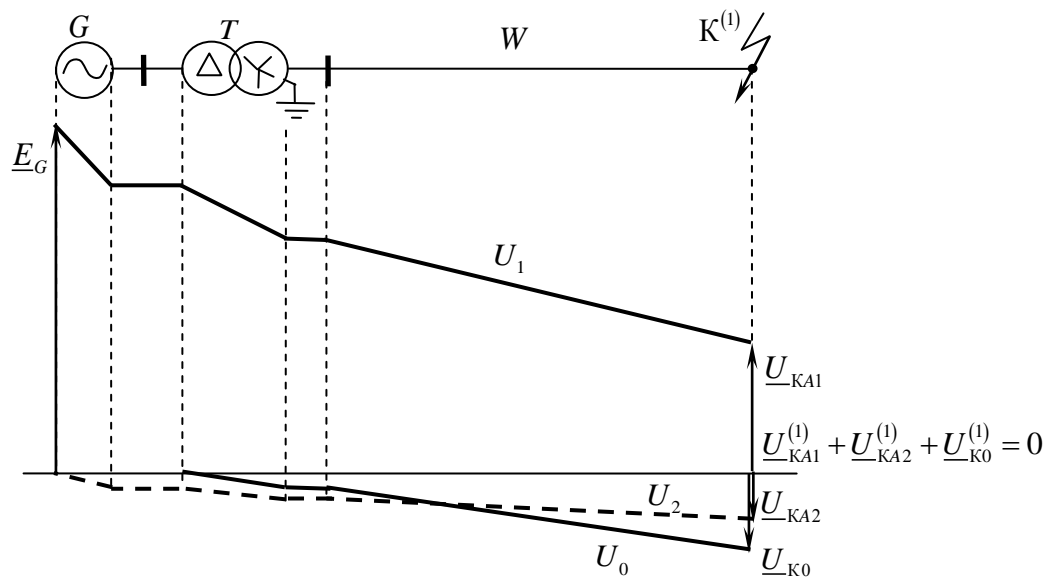


Рис. 3.50. Эпюра напряжений при однофазном КЗ

Характер эпюр напряжений отдельных последовательностей вдоль элементов рассматриваемой схемы для каждого несимметричного КЗ показывает, что по мере приближения к генератору G напряжение прямой последовательности возрастает, а напряжения обратной и нулевой последовательностей уменьшаются (по абсолютной величине); кроме того, графически иллюстрируется неравенство (3.37) по напряжению $\underline{U}_{KA1}^{(n)}$ на [рис. 3.50–3.52](#).

При указанном соединении обмоток трансформатора напряжение нулевой последовательности за трансформатором отсутствует. Как видно из соотношения между $\underline{U}_{KA2}^{(1)}$ и $\underline{U}_{K0}^{(1)}$ в месте однофазного короткого замыкания, в данном случае $X_{0\Sigma} > X_{2\Sigma}$.

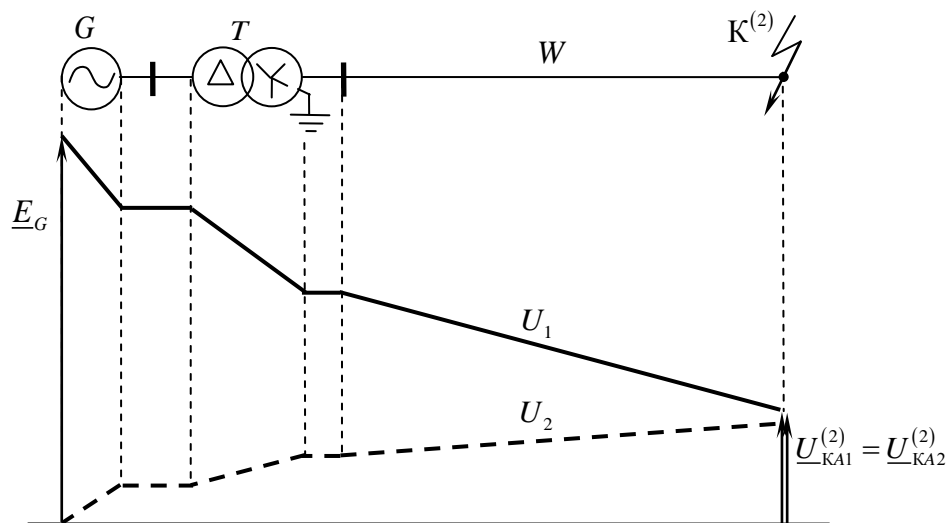


Рис. 3.51. Эпюра напряжений при двухфазном КЗ

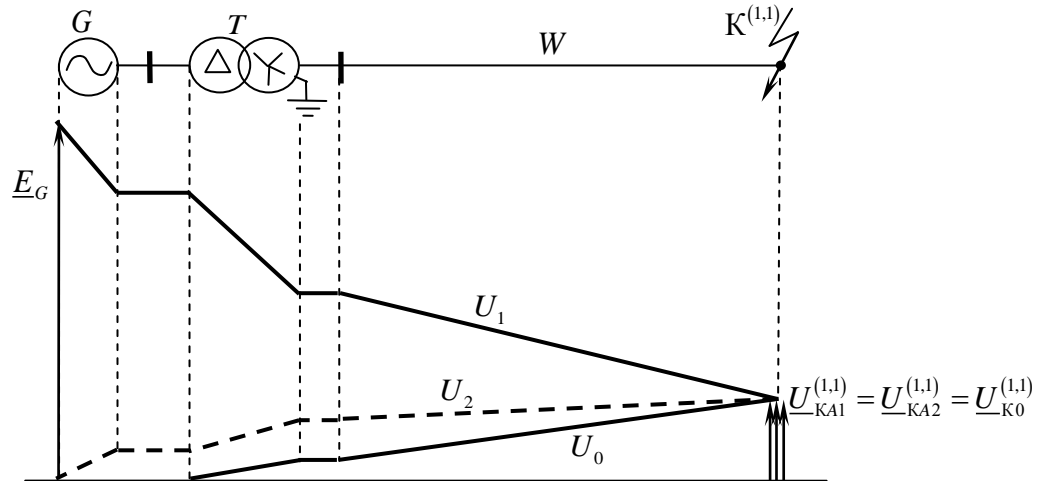


Рис. 3.52. Эпюра напряжений при двухфазном КЗ на землю

Наибольшее искажение векторной диаграммы напряжений всегда получается в месте короткого замыкания. Для точек, расположенных ближе к генератору, это искажение становится всё меньшим. Полностью симметричной сохраняется система векторов ЭДС.

3.6. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока несимметричного короткого замыкания

Для расчета любого несимметричного КЗ необходимо выполнение следующих этапов:

1) составление схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей;

2) определение результирующих сопротивлений и ЭДС прямой последовательности $X_{1\Sigma}$ и \underline{E}_Σ , сопротивлений обратной $X_{2\Sigma}$ и нулевой $X_{0\Sigma}$ последовательностей;

3) вычисление дополнительного сопротивления $X_\Delta^{(n)}$:

- при однофазном КЗ $X_\Delta^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$;
- при двухфазном КЗ на землю $X_\Delta^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$;

• при двухфазном КЗ $X_\Delta^{(2)} = X_{2\Sigma}$;

4) расчёт тока прямой последовательности:

- при однофазном КЗ $\underline{I}_{KA1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1)})}$;
- при двухфазном КЗ на землю $\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1,1)})}$;
- при двухфазном КЗ $\underline{I}_{KA2}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(2)})}$;

5) вычисление симметричных составляющих тока и напряжения в месте короткого замыкания:

- при однофазном КЗ

$$\underline{I}_{KA2}^{(1)} = \underline{I}_{K0}^{(1)} = \underline{I}_{KA1}^{(1)}, \underline{U}_{KA1}^{(1)} = \underline{I}_{KA1}^{(1)} jX_{\Delta}^{(1)}, \underline{U}_{KA2}^{(1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1)} jX_{2\Sigma}, \underline{U}_{K0}^{(1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1)} jX_{0\Sigma};$$

- при двухфазном КЗ на землю

$$\underline{I}_{KA2}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}, \underline{I}_{K0}^{(1,1)} = -\underline{I}_{KA1}^{(1,1)} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}},$$

$$\underline{U}_{KA1}^{(1,1)} = \underline{U}_{KA2}^{(1,1)} = \underline{U}_{K0}^{(1,1)} = \underline{I}_{KA1}^{(1,1)} jX_{\Delta}^{(1,1)};$$

- при двухфазном КЗ

$$\underline{I}_{KA2}^{(2)} = -\underline{I}_{KA1}^{(2)}, \underline{U}_{KA2}^{(2)} = \underline{U}_{KA1}^{(2)};$$

6) нахождение симметричных составляющих токов в заданных элементах (ветвях) n и напряжений в узлах m ЭЭС: \underline{I}_{nA1} , \underline{I}_{nA2} , \underline{I}_{n0} и \underline{U}_{mA1} , \underline{U}_{mA2} , \underline{U}_{m0} ;

7) определение (графически в виде векторной диаграммы или аналитически) фазных токов в ветвях n и напряжений в узлах m ЭЭС³:

$$\underline{I}_{nA} = \underline{I}_{nA1} + \underline{I}_{nA2} + \underline{I}_{n0}, \underline{I}_{nB} = a^2 \underline{I}_{nA1} + a \underline{I}_{nA2} + \underline{I}_{n0}, \underline{I}_{nC} = a \underline{I}_{nA1} + a^2 \underline{I}_{nA2} + \underline{I}_{n0},$$

$$\underline{U}_{mA} = \underline{U}_{mA1} + \underline{U}_{mA2} + \underline{U}_{m0}, \underline{U}_{mB} = a^2 \underline{U}_{mA1} + a \underline{U}_{mA2} + \underline{U}_{m0},$$

$$\underline{U}_{mC} = a \underline{U}_{mA1} + a^2 \underline{U}_{mA2} + \underline{U}_{m0}.$$

³ В случае нахождения фазных токов и напряжений на иной, чем место КЗ, ступени напряжения необходимо учитывать угловой сдвиг симметричных составляющих при переходе через трансформатор или автотрансформатор в соответствии с группой и схемой соединения фазных обмоток.

3.7. Однократная продольная несимметрия

Продольную несимметрию в какой-либо одной точке трехфазной системы в общем случае можно представить включением в рассечку каждой фазы неодинаковых сопротивлений, которые могут быть ещё связаны между собой взаимной индукцией.

Решение задачи в общем виде позволяет получить расчетные выражения для симметричных составляющих токов и напряжений, но такое решение связано со сложными выкладками. При этом конечный результат представляется громоздкими выражениями. Поэтому, как и при однократной поперечной несимметрии, значительно проще и нагляднее проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

Ниже рассматриваются два вида продольной несимметрии: разрыв одной фазы и разрыв двух фаз (в одном и том же месте).

Основные уравнения падений напряжений в схемах каждой последовательности, составленные для симметричной части системы, и при чисто индуктивной цепи можно представить в виде уравнений связи:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{E}_{L\Sigma} - \underline{I}_{LA1} jX_{L1\Sigma}, \quad (3.39)$$

$$\Delta \underline{U}_{LA2} = 0 - \underline{I}_{LA2} jX_{L2\Sigma}, \quad (3.40)$$

$$\Delta \underline{U}_{L0} = 0 - \underline{I}_{L0} jX_{L0\Sigma}, \quad (3.41)$$

где $\Delta \underline{U}_{LA1}$, $\Delta \underline{U}_{LA2}$, $\Delta \underline{U}_{L0}$ – симметричные составляющие падения напряжения фазы A на несимметричном участке системы;

$X_{L1\Sigma}$, $X_{L2\Sigma}$, $X_{L0\Sigma}$ – результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно места продольной несимметрии.

Дополнительная связь между симметричными составляющими токов и напряжений устанавливается из граничных условий рассматриваемой продольной несимметрии.

3.7.1. Разрыв одной фазы

Рассмотрим трехфазную принципиальную схему этого повреждения, причем фаза A считается особой (рис. 3.53).

Разрыв одной фазы характеризуется граничными условиями:

$$\underline{I}_{LA}^{(1)} = 0; \quad (3.42)$$

$$\Delta \underline{U}_{LB}^{(1)} = 0; \quad (3.43)$$

$$\Delta \underline{U}_{LC}^{(1)} = 0. \quad (3.44)$$

Разложение на симметричные составляющие условий (3.43) и (3.44), а также падения напряжения $\Delta \underline{U}_{LA}$ приводит к равенствам:

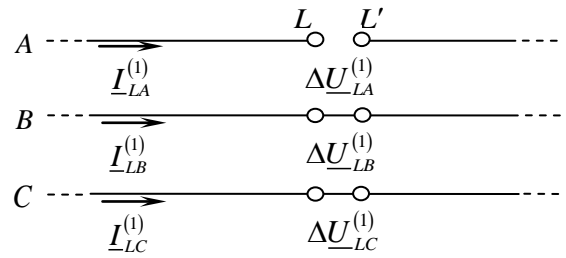


Рис. 3.53. Разрыв одной фазы

$$\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0} = \Delta \underline{U}_{LA}, \quad (3.45)$$

$$\Delta \underline{U}_{LB} = \Delta \underline{U}_{LB1} + \Delta \underline{U}_{LB2} + \Delta \underline{U}_{LB0} = a^2 \Delta \underline{U}_{LA1} + a \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0} = 0, \quad (3.43a)$$

$$\Delta \underline{U}_{LC} = \Delta \underline{U}_{LC1} + \Delta \underline{U}_{LC2} + \Delta \underline{U}_{L0} = a \Delta \underline{U}_{LA1} + a^2 \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0} = 0. \quad (3.44a)$$

Суммируя равенства (3.45), (3.43a) и (3.44a), получаем:

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

Выразив $\Delta \underline{U}_{L0}$ из (3.44a) и подставив в (3.43a), получим:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2}.$$

Проведя аналогичную операцию с $a \cdot \Delta \underline{U}_{LA1}$, получим:

$$\Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{L0}.$$

Таким образом, соотношение между симметричными составляющими падения напряжения фазы A на несимметричном участке системы имеет вид

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \Delta \underline{U}_{LA2} = \Delta \underline{U}_{L0} = \frac{1}{3} \Delta \underline{U}_{LA}. \quad (3.46)$$

Поскольку симметричные составляющие напряжений уравнений (3.40) и (3.41) равны, то получим:

$$-\underline{I}_{LA2} jX_{L2\Sigma} = -\underline{I}_{L0} jX_{L0\Sigma}. \quad (3.47)$$

Прибавив к обеим частям равенства (3.47) $\underline{I}_{LA2}jX_{L0\Sigma}$, после небольших преобразований получим связь между токами прямой и обратной последовательностей (3.48):

$$\underline{I}_{LA2}X_{L2\Sigma} + \underline{I}_{LA2}X_{L0\Sigma} = \underline{I}_{L0}X_{L0\Sigma} + \underline{I}_{LA2}X_{L0\Sigma};$$

из условия (3.42) получим:

$$\underline{I}_{LA1} = -(\underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{L0});$$

тогда

$$\underline{I}_{LA2}(X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}) = X_{L0\Sigma}(\underline{I}_{L0} + \underline{I}_{LA2}) = -\underline{I}_{LA1}X_{L0\Sigma},$$

откуда

$$\underline{I}_{LA2}^{(1)} = -\underline{I}_{LA1}^{(1)} \frac{X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}. \quad (3.48)$$

Аналогично после прибавления к обеим частям равенства (3.47) выражения $\underline{I}_{L0}jX_{L2\Sigma}$ и дальнейших преобразований имеем:

$$\underline{I}_{L0}^{(1)} = -\underline{I}_{LA1}^{(1)} \frac{X_{L2\Sigma}}{X_{L0\Sigma} + X_{L2\Sigma}}. \quad (3.49)$$

Воспользуемся равенством левых частей выражений (3.39) и (3.40):

$$\begin{aligned} \underline{E}_{L\Sigma} - \underline{I}_{LA1}jX_{L1\Sigma} &= -\underline{I}_{LA2}jX_{L2\Sigma} = \\ &= -\left(-\underline{I}_{LA1} \frac{X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}\right)jX_{L2\Sigma} = \underline{I}_{LA1}j \frac{X_{L2\Sigma}X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}, \end{aligned}$$

откуда получим ток прямой последовательности фазы A в месте разрыва:

$$\underline{I}_{LA1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{L\Sigma}}{j \left(X_{L1\Sigma} + \frac{X_{L2\Sigma}X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right)}.$$

Величины симметричных составляющих падения напряжения фазы A :

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{LA2}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{L0}^{(1)} &= -\underline{I}_{L0}jX_{L0\Sigma} = -\left(-\underline{I}_{LA1} \frac{X_{L2\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}\right)jX_{L0\Sigma} = \\ &= \underline{I}_{LA1}j \frac{X_{L2\Sigma}X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}. \end{aligned}$$

Для того чтобы оценить режим ЭЭС (рис. 3.54), необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. В соответствии с полученными решениями необходимо объединить эти три схемы, чтобы получить комплексную схему замещения (рис. 3.55).

Примеры определения результирующих сопротивлений обратной и нулевой последовательностей (см. рис. 3.55):

$$X_{L2\Sigma} = (X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_7) \parallel X_3 + X_4,$$

$$X_{L0\Sigma} = [(X_6 + X_7) \parallel X_8 + X_5 + X_9 + X_2] \parallel X_3 + X_4.$$

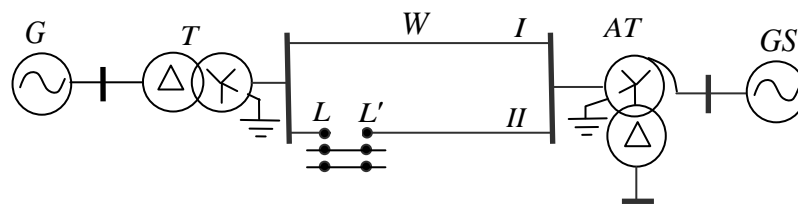


Рис. 3.54. Электрическая схема ЭЭС

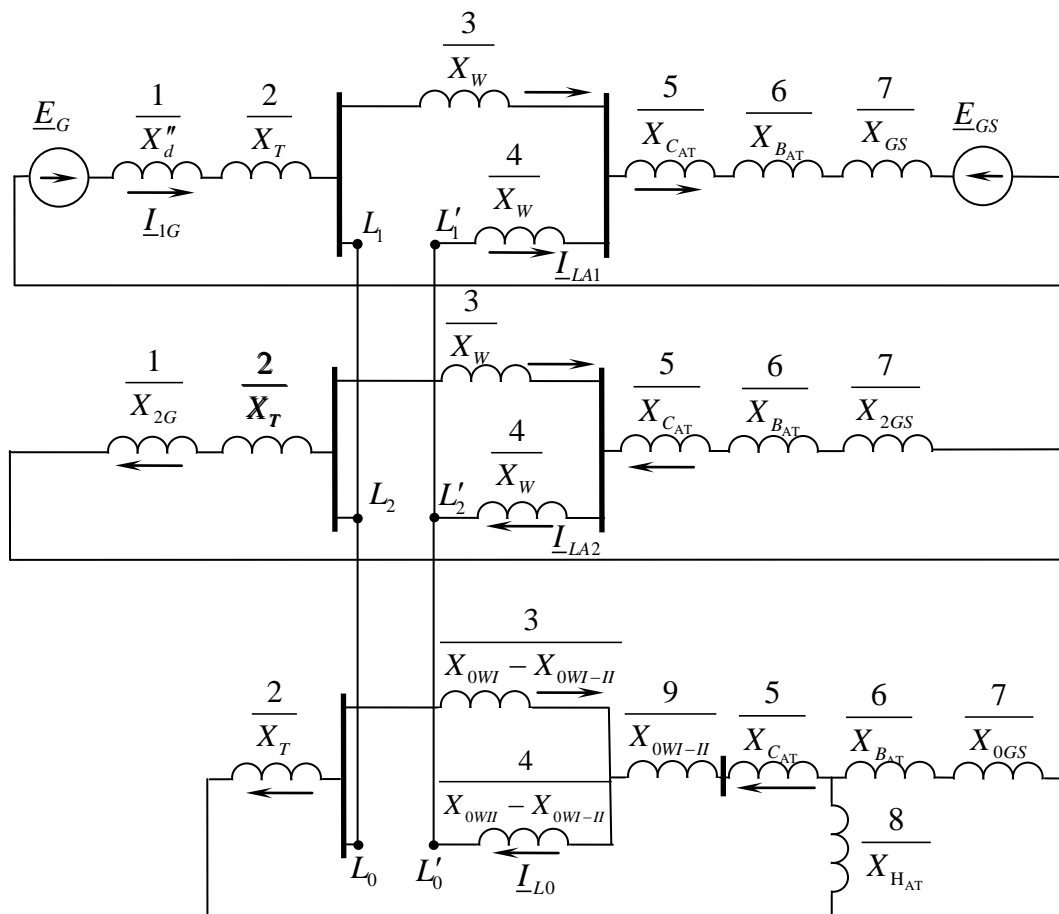


Рис. 3.55. Комплексная схема замещения ЭЭС при разрыве одной фазы

Построим векторные диаграммы токов и напряжений, выбрав предварительно масштабы $[\mu_I] = \text{кА/см}$ и $[\mu_U] = \text{кВ/см}$.

При построении векторной диаграммы фазных токов в месте несимметрии (рис. 3.56) используется соотношение между симметричными составляющими условия (3.42).

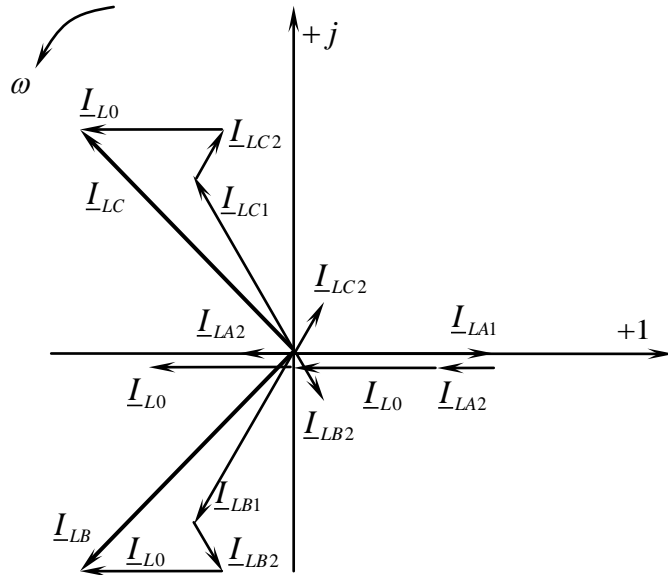


Рис. 3.56. Векторная диаграмма токов при разрыве одной фазы

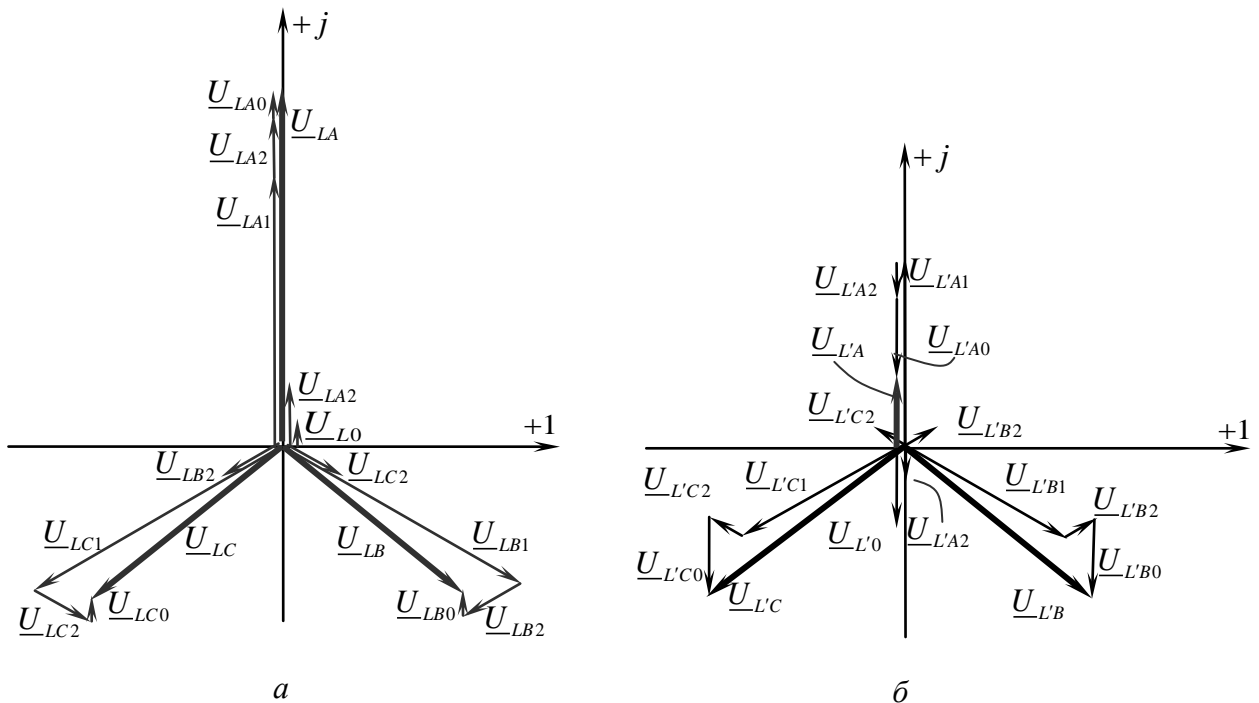


Рис. 3.57. Векторные диаграммы напряжений по концам разрыва одной фазы:
a – в узле *L*, *б* – в узле *L'*

Для определения напряжений с одной из сторон продольной несимметрии, например в точке L , следует предварительно найти по схемам отдельных последовательностей составляющие этих напряжений. Прибавив к последним симметричные составляющие ΔU_{LA1} , ΔU_{LA2} и ΔU_{L0} , найдем симметричные составляющие напряжений с другой стороны продольной несимметрии, т. е. в точке L' . Зная все симметричные составляющие напряжений, известным способом определяем фазные величины напряжений (рис. 3.57)⁴.

На рис. 3.58 представлены исходная схема системы и эпюры напряжений при разрыве одной фазы линии. Из данного рисунка следует некоторая особенность продольной несимметрии, заключающаяся в том, что если напряжения прямой последовательности по концам несимметричного участка отличаются только по величине, то напряжения обратной и нулевой последовательностей отличаются также и по знаку.

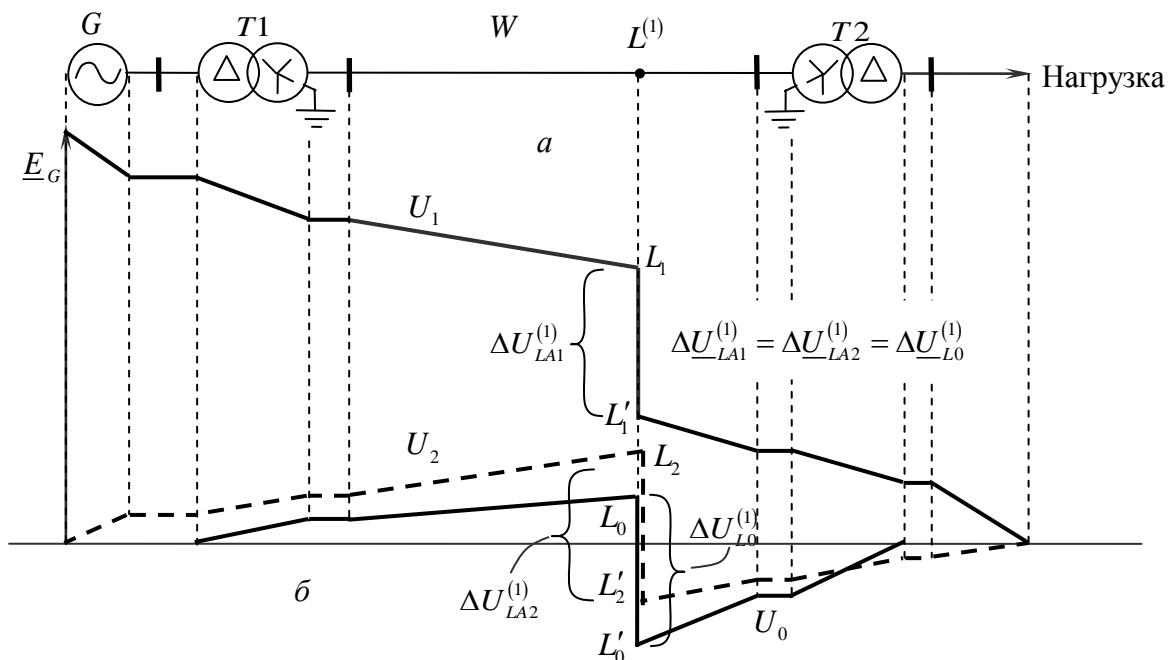


Рис. 3.58. Электрическая схема системы (а) и эпюры напряжений (б) при разрыве одной фазы

По мере удаления от места продольной несимметрии степень искажения векторной диаграммы напряжений снижается, так как возрастает относительное участие составляющей напряжения прямой последовательности, как это видно из эпюр.

⁴ В векторных диаграммах на рис. 3.57 следует обратить внимание на соблюдение равенств: $U_{LC} = U_{L'C}$, $U_{LB} = U_{L'B}$.

3.7.2. Разрыв двух фаз

При разрыве двух фаз граничные условия будут:

$$\Delta \underline{U}_{LA}^{(2)} = 0; \quad (3.50)$$

$$\underline{I}_{LB}^{(2)} = 0; \quad (3.51)$$

$$\underline{I}_{LC}^{(2)} = 0. \quad (3.52)$$

Принципиальная схема этого повреждения представлена на [рис. 3.59](#).

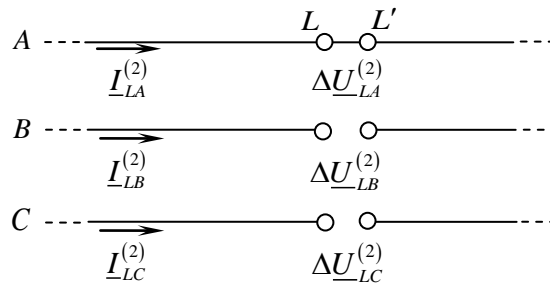


Рис. 3.59. Разрыв двух фаз

В соответствии с условиями (3.51), (3.52) и выражением $\underline{I}_{LA1} + \underline{I}_{LA2} + \underline{I}_{L0} = \underline{I}_{LA}$ по аналогии с алгоритмом при разрыве одной фазы следует, что симметричные составляющие тока фазы *A* в месте обрыва двух других фаз связаны соотношением

$$\underline{I}_{LA1}^{(2)} = \underline{I}_{LA2}^{(2)} = \underline{I}_{L0}^{(2)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{LA}^{(2)}. \quad (3.53)$$

Поскольку согласно условию (3.50)

$$\Delta \underline{U}_{LA1} + \Delta \underline{U}_{LA2} + \Delta \underline{U}_{L0} = 0, \quad (3.50a)$$

сложим правые части уравнений (3.39)–(3.41) и сумму приравняем нулю:

$$\underline{E}_{L\Sigma} - \underline{I}_{LA1} jX_{L1\Sigma} + \underline{I}_{LA2} jX_{L2\Sigma} + \underline{I}_{L0} jX_{L0\Sigma} = 0.$$

С учётом (3.53)

$$\underline{E}_{L\Sigma} = \underline{I}_{LA1} jX_{L1\Sigma} + \underline{I}_{LA1} jX_{L2\Sigma} + \underline{I}_{LA1} jX_{L0\Sigma} = \underline{I}_{LA1} j(X_{L1\Sigma} + X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}),$$

откуда получим ток прямой последовательности фазы A в месте разрыва

$$\underline{I}_{LA1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{L\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})}$$

Симметричные составляющие разности фазных напряжений в месте обрыва определяются для обратной и нулевой последовательностей соответственно по (3.40) и (3.41), а для прямой последовательности из (3.50a).

Для электроэнергетической системы, представленной на рис. 3.60, построим комплексную схему замещения, рис. 3.61.

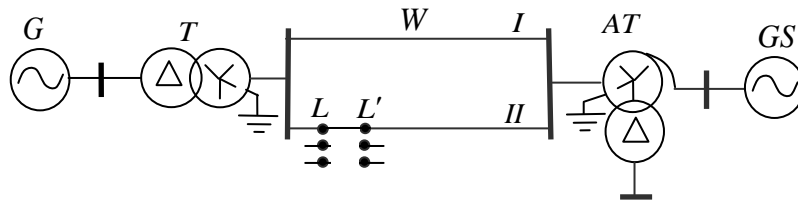


Рис. 3.60. Электрическая схема ЭЭС

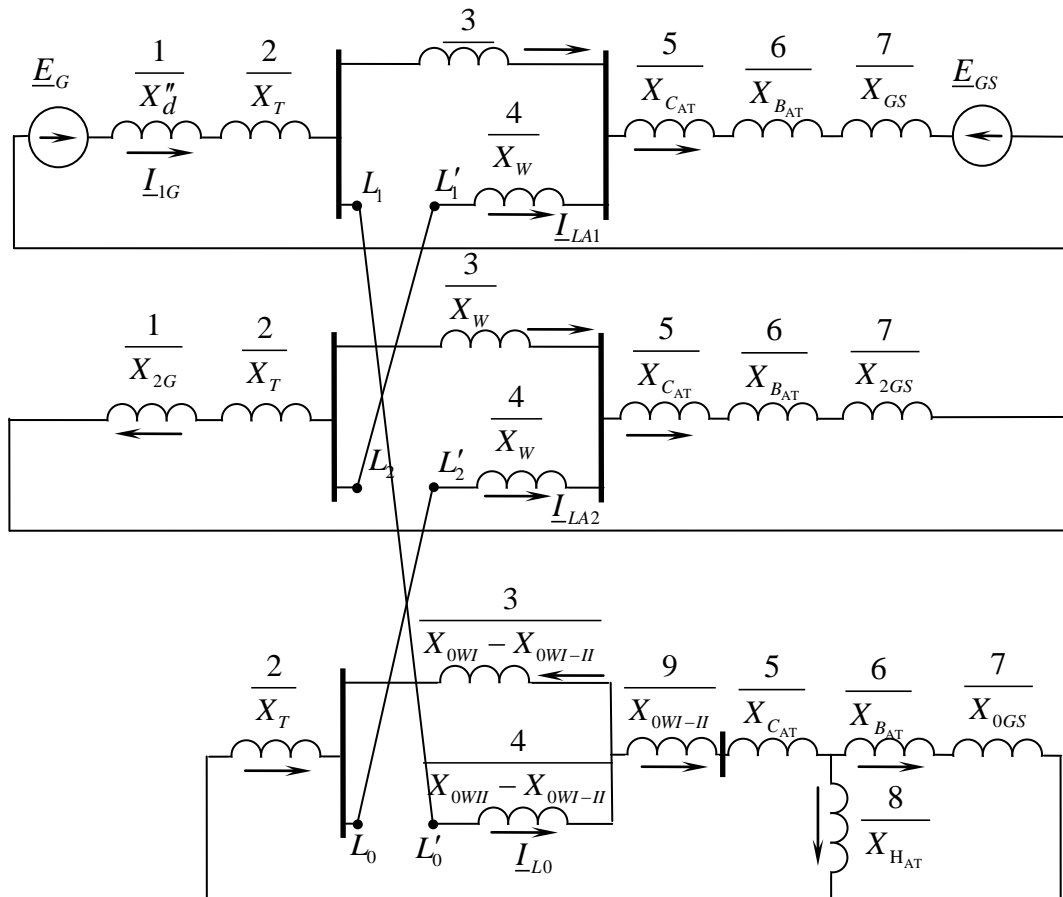


Рис. 3.61. Комплексная схема замещения ЭЭС при разрыве двух фаз

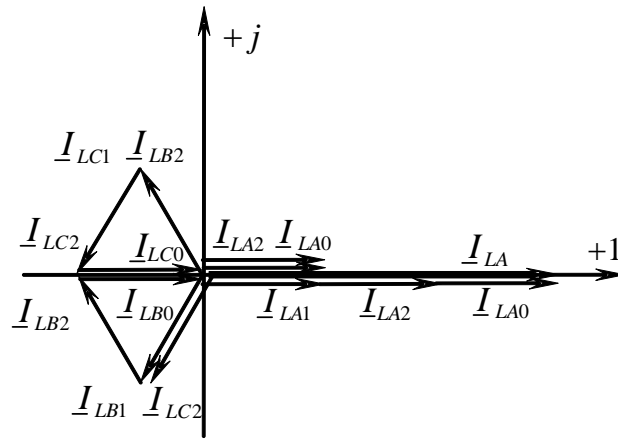


Рис. 3.62. Векторная диаграмма токов при разрыве двух фаз

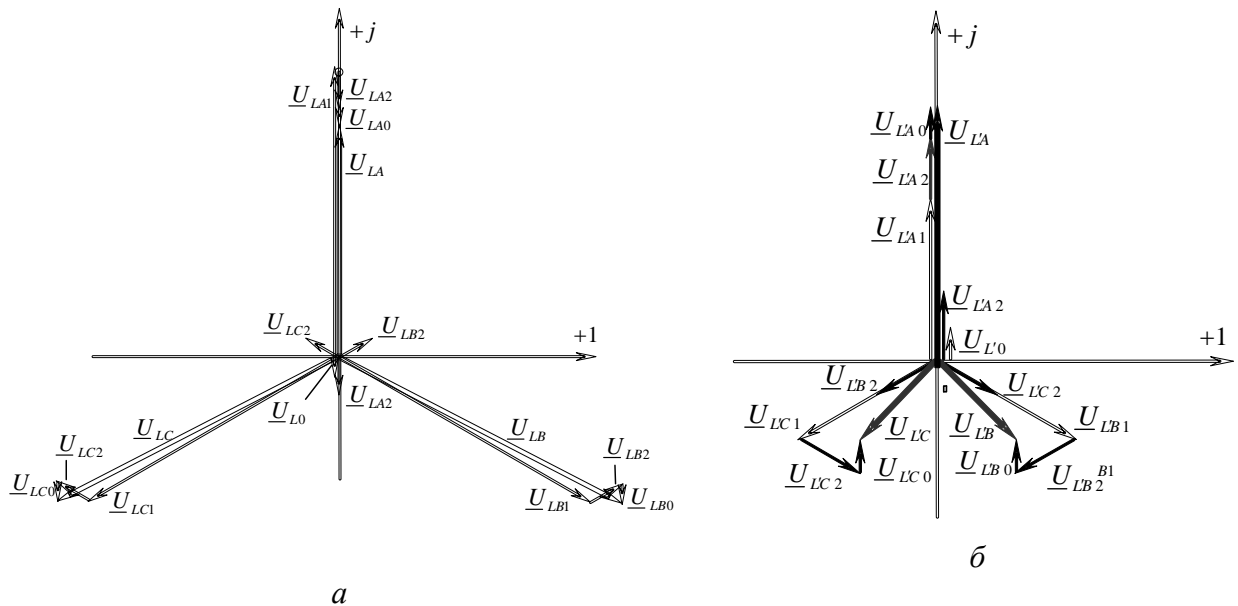


Рис. 3.63. Векторные диаграммы напряжений при разрыве двух фаз:

а – в узле L , *б* – в узле L'

Построим векторные диаграммы фазных токов ([рис. 3.62](#)) и напряжений ([рис. 3.63](#)) в месте несимметрии при разрыве фаз B и C .

На векторных диаграммах напряжений в месте разрыва фаз B и C ([рис. 3.63](#)) напряжение \underline{U}_{LA} в узлах L и L' имеет одну и ту же величину, так как фаза A не повреждена.

На [рис. 3.64](#) представлены исходная схема системы и эпюры напряжений при разрыве двух фаз линии.

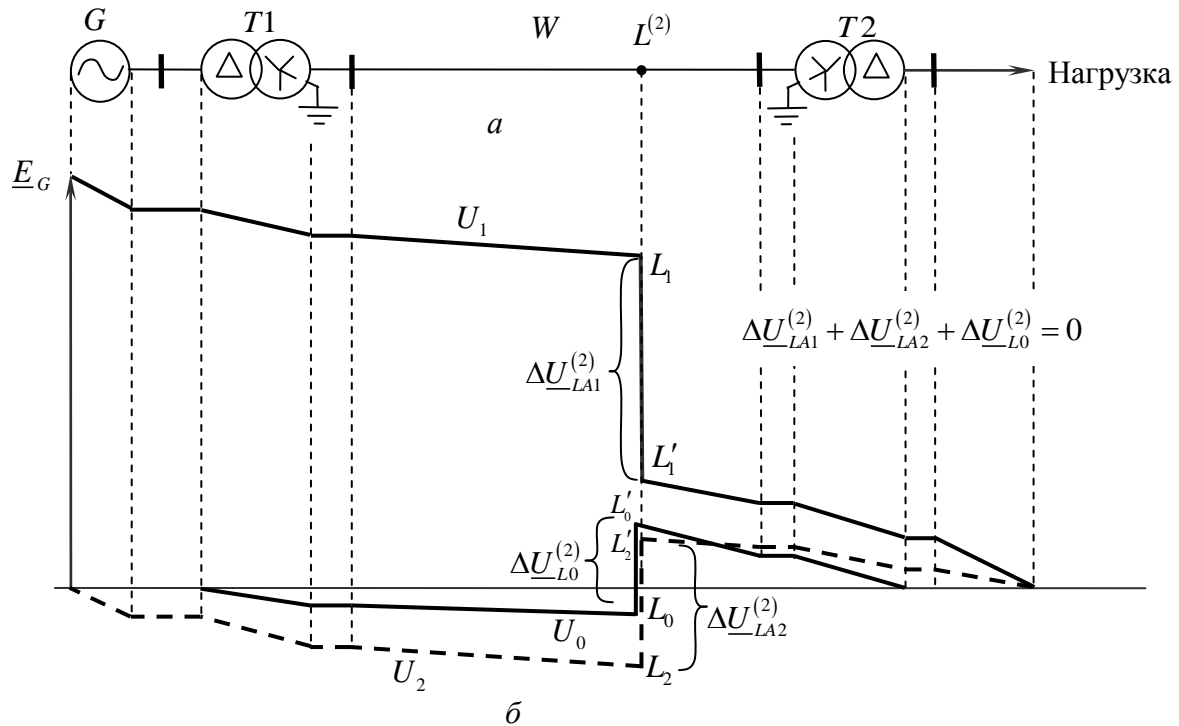


Рис. 3.64. Электрическая схема системы (а) и эпюры напряжений (б) при разрыве двух фаз

Анализ эпюр напряжений аналогичен анализу эпюр на [рис. 3.58](#).

3.7.3. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии

Из структуры выражений для тока прямой последовательности при рассмотренных видах однократной продольной несимметрии непосредственно следует, что ток прямой последовательности можно определить как ток симметричного трехфазного режима в схеме, где несимметричный участок заменен симметричной цепью. Величина сопротивления этой цепи для каждого вида повреждения определяется сопротивлениями как самого несимметричного участка, так и схем обратной и нулевой последовательностей относительно места несимметрии.

Изложенное положение представляет собой правило эквивалентности прямой последовательности применительно к условиям однократной продольной несимметрии.

В общем виде ток прямой последовательности в месте продольной несимметрии чисто индуктивной цепи определяется как

$$\underline{I}_{LA1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{L\Sigma}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{\Delta L}^{(n)})},$$

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке

$$\Delta \underline{U}_{LA1}^{(n)} = \underline{I}_{LA1}^{(n)} j X_{\Delta L}^{(n)},$$

где верхний индекс (n) показывает вид рассматриваемой продольной несимметрии [(1) – разрыв одной фазы, (2) – разрыв двух фаз]; $X_{\Delta L}^{(1)} = X_{L2\Sigma} \parallel X_{L0\Sigma}$, $X_{\Delta L}^{(2)} = X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}$ – дополнительные сопротивления в схеме прямой последовательности.

Вопросы для самопроверки

1. Какими могут быть соотношения между фазными величинами и симметричными составляющими?
2. В чём причины, определяющие различие сопротивлений элементов ЭЭС токам обратной и нулевой последовательности по сравнению с прямой последовательностью?
3. Как определяются параметры СМ для токов обратной последовательности?
4. Какими представляются схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов при различных группах соединения обмоток?
5. Какие Вы знаете схемы замещения нулевой последовательности для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов?
6. Как определяются параметры нулевой последовательности ЛЭП при различных вариантах их исполнения?
7. Какой порядок составления схем различных последовательностей?
8. Почему для расчёта тока прямой последовательности при любом несимметричном КЗ применимы все методы расчёта тока трёхфазного КЗ?
9. Какие соотношения между симметричными составляющими токов и напряжений для различных видов однократной поперечной несимметрии?
10. Во сколько раз ток повреждённой фазы при различных несимметричных КЗ больше тока прямой последовательности?
11. Какие Вы знаете комплексные схемы замещения для различных видов несимметрии?
12. В каких пределах может изменяться отношение тока двухфазного КЗ к току трёхфазного КЗ при КЗ в одной и той же точке?

13. Во сколько раз ток однофазного КЗ может быть больше тока трёхфазного КЗ при коротком замыкании в одной и той же точке?
14. Как представляются эпюры напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей для различных видов несимметричных КЗ, происходящих в простейшей электрической системе?
15. В чём состоит графическая интерпретация правила эквивалентности прямой последовательности для однократной поперечной несимметрии?
16. Как выглядят векторные диаграммы токов и напряжений для различных видов однократной продольной несимметрии?
17. В чём состоит принцип составления комплексных схем замещения для однократной поперечной несимметрии?
18. В чём заключается правило эквивалентности прямой последовательности для однократной продольной несимметрии?
19. В чём достоинства и недостатки метода симметричных составляющих при его применении к расчётам несимметричных режимов ЭЭС?
20. Что означает начало и конец схем замещения различных последовательностей?

4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

4.1. Однофазное замыкание на землю

Распределительные сети напряжением 6–35 кВ работают с изолированными или резонансно-заземленными нейтралью. Поэтому при замыкании на землю одной фазы ($Z^{(1)}$) такой сети не образуются обычные условия однофазного короткого замыкания ($K^{(1)}$) в сетях напряжением 110 кВ и выше с эффективно-заземленными нейтралью. Аварийный ток при этом обусловлен емкостной проводимостью сети и по величине меньше тока однофазного короткого замыкания ([табл. 4.1](#)). Поэтому сети напряжением 6–35 кВ принято называть сетями с малыми токами замыкания на землю, хотя при протяженных, особенно кабельной сети, если не приняты специальные меры компенсации, величины этих токов могут достигать опасных значений.

Таблица 4.1

Средние значения ёмкостного тока металлического замыкания одной фазы линии при частоте 50 Гц

Характеристика линии	Ёмкостной ток, А/км, при номинальном напряжении сети, кВ	
	6	10
Однокабельная линия с площадью сечения, мм ² :		
50	0,68	0,80
120	1,00	1,16
240	1,45	1,70
Одноцепная воздушная линия (ВЛ):		
без троса	0,013	0,0256
с тросом	–	0,0320
Двухцепная ВЛ без троса	0,017	0,0350

При замыкании на землю одной из фаз (в качестве расчетной принимают фазу A) в сети с изолированной нейтралью путь для тока, текущего в землю, проходит через емкостное сопротивление каждой фазы относительно земли ([рис. 4.1](#)). Распределенные вдоль сети (линий) емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными ёмкостями.

Так как ёмкостные сопротивления элементов электрической сети значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, последними можно пренебречь и, следовательно, считать величину тока замыкания на землю практически независимой от места замыкания в рассматриваемой

электрически связанной сети, а напряжение источника питания неизменным по величине.

Неизменность линейных напряжений, в частности, обуславливает практически постоянное значение тока в ёмкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при однофазном замыкании на землю, поэтому из-за малого влияния междуфазные ёмкости не учитывают.

На [рис. 4.1](#) стрелками показан путь циркуляции тока замыкания на землю. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их ёмкостные проводимости относительно земли. Ёмкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами двух других фаз на данном участке.

В основу расчета однофазного замыкания на землю положен метод симметричных составляющих.

В соответствии с вышеприведенными допущениями основные уравнения второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности в месте металлического замыкания на землю имеют вид

$$\begin{cases} \underline{U}_{A1\phi,ср} = \underline{U} \\ \underline{U}_{A2} = 0, \\ \underline{U}_0 = 0 - \underline{Z}_0 \underline{I}_0. \end{cases}$$

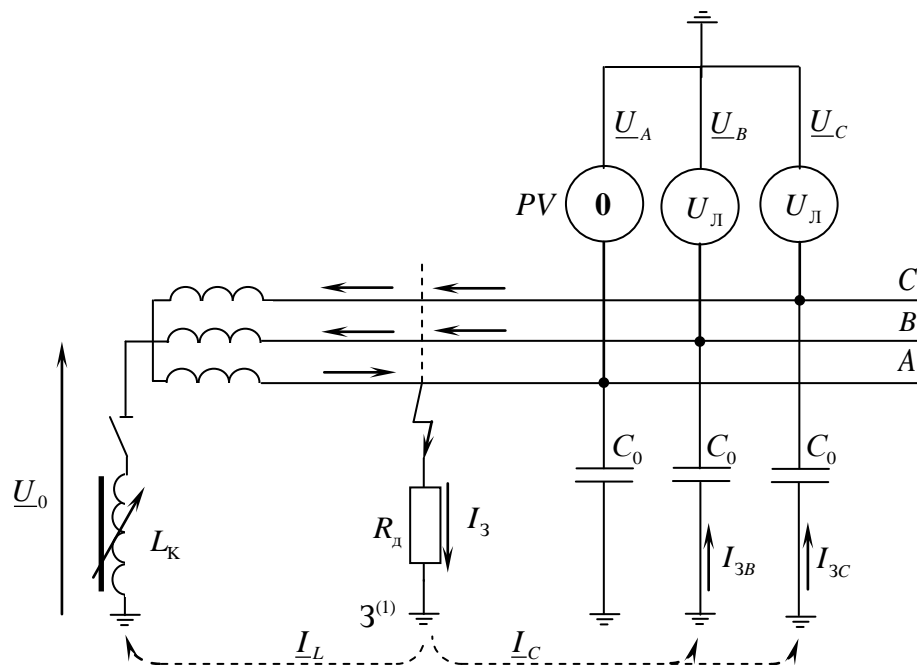


Рис. 4.1. Схема замещения сети, работающей с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов

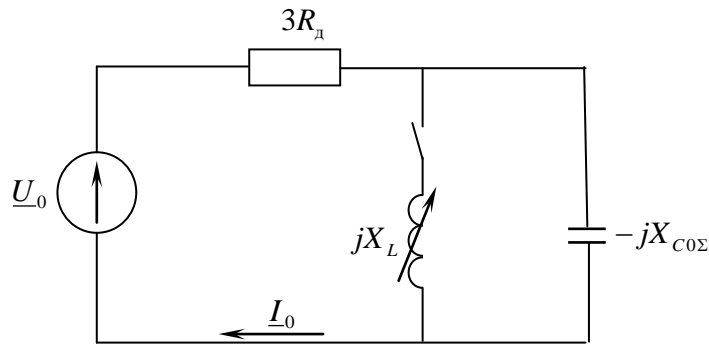


Рис. 4.2. Схема замещения нулевой последовательности

Схема замещения при однофазном замыкании на землю представлена на [рис. 4.2](#).

Из граничного условия $\underline{U}_{3A}^{(1)} = 0$ получим

$$\underline{U}_{A1} + \underline{U}_0 = 0$$

или

$$\underline{U}_0 \overline{\varphi}_{\text{ср}} \underline{U}_{A1} = -\underline{U} \quad .$$

Величина тока металлического замыкания на землю составит

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \underline{I}_0 = -3 \cdot \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} = 3 \cdot \frac{\underline{U}_{\text{ф,ср}}}{-jx_{C0\Sigma}} = \sqrt{3} \cdot j\omega C_{0\Sigma} \cdot \underline{U}_{\text{ср,ном}},$$

где $\underline{U}_{\text{ф,ср}}$ или $\underline{U}_{\text{ср,ном}}$ – среднее значение фазного или линейного напряжения ступени трансформации, на которой произошло замыкание на землю; $x_{C0\Sigma}$ – результирующее ёмкостное сопротивление нулевой последовательности элементов сети (практически только воздушных линий и кабелей), электрически связанных с местом замыкания.

Ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением R_d будет

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \frac{\underline{U}_{\text{ф,ср}}}{3R_d - jx_{C0\Sigma}}.$$

Ёмкостное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи без грозозащитных тросов на 1 км длины можно найти по выражению, Ом·км,

$$x_{C0} = 3,96 \cdot 10^5 \cdot \lg \frac{S_{\text{ср}}}{\sqrt[3]{r_{\text{п}} \cdot D_{\text{ср}}^2}}, \quad (4.1)$$

где $S_{\text{ср}} \approx 2(h_A + h_B + h_C)/3$ – среднее расстояние от проводов фаз A , B и C до их зеркальных отражений относительно поверхности земли (h_A , h_B , h_C – высоты подвеса проводов фаз с учетом провеса); r_n – радиус провода; $D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между проводами фаз A , B и C .

Ёмкостное сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей с круглыми жилами на 1 км длины можно найти по приближенной формуле, Ом·км,

$$x_{C0} = \frac{96,5}{1,85 + \frac{2r}{B+b}} \cdot 10^3,$$

где r – радиус жилы; B и b – толщина соответственно фазной и поясной изоляции (величины r , B , b должны быть в одних единицах измерения).

Для кабеля с секторными жилами, имеющими ту же поверхность проводника и ту же толщину изоляции, как у кабеля с круглыми жилами, ёмкостные сопротивления x_{C0} несколько меньше. Это снижение можно учесть коэффициентом n , величина которого при значениях $(B+b)/(2r)$ 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 соответственно составляет 0,70; 0,82; 0,87; 0,90; 0,94; 0,96.

Для грубой оценки порядка величины тока замыкания на землю при отсутствии данных о кабелях сети и конструкции воздушных линий, по известной суммарной длине электрически связанных с местом замыкания кабельных l_k , км, и воздушных l_B , км, линий можно воспользоваться выражением

$$I_3 = U_{\text{ср,ном}} \cdot \left(\frac{l_k}{10} + \frac{l_B}{350} \right).$$

На [рис. 4.3](#) представлены векторные диаграммы напряжений и токов в месте металлического однофазного замыкания на землю фазы A .

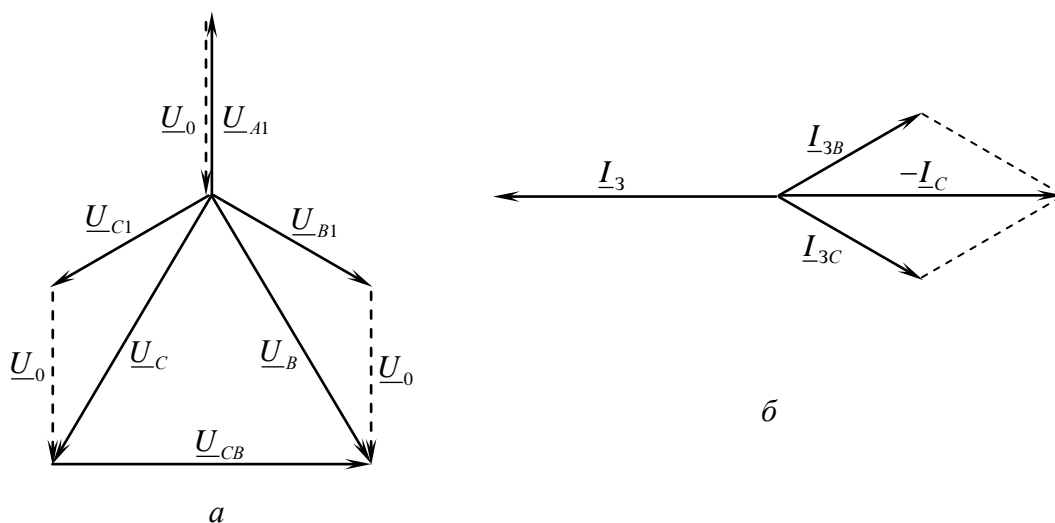


Рис. 4.3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте металлического однофазного замыкания на землю фазы A

Здесь напряжение поврежденной фазы относительно земли становится равным нулю, а значения напряжений неповрежденных фаз относительно земли увеличиваются до значений междуфазного напряжения, т. е. в $\sqrt{3}$ раз (см. [рис. 4.1](#)). Треугольник линейных напряжений остается без изменения и лишь перемещается параллельно самому себе в соответствии с перемещением его центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Ток замыкания на землю I_3 носит ёмкостный характер.

Опыт эксплуатации показывает, что при замыканиях на землю через дугу и малых значениях I_3 дуга гаснет практически без повторных зажиганий и сопровождающих их всплесков перенапряжений. С увеличением тока I_3 наблюдаются неоднократные повторные зажигания дуги и перенапряжения, что уменьшает вероятность погасания дуги и увеличивает вероятность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью при определенных значениях I_3 должна выполняться компенсация ёмкостных токов замыкания на землю. Значения ёмкостных токов в нормальных режимах сети, при которых необходимо производить компенсацию, составляют: в сетях напряжением 3–20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ – более 10 А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях: при напряжении 3–6 кВ – более 30 А; при напряжении 10 кВ – более 20 А; при напряжении 15–20 кВ – более 15 А; в схемах напряжением 6–20 кВ блоков генератор-трансформатор (на генераторном напряжении) – более 5 А.

Компенсацию осуществляют включением в нейтраль (трансформатора) трехфазной системы дугогасящей катушки (реактора – ДГР), которая выполняется с регулированием индуктивности для настройки при изменениях защищаемой сети ([рис. 4.1](#), [4.2](#)). Катушка настраивается близко к резонансу токов на суммарную ёмкость сети по отношению к земле, что приводит к случаю $x_{0\Sigma} = \infty$, т. е. к полной компенсации тока простого замыкания на землю, $I_L = -I_3$ или

$$\frac{U_{\phi, \text{cp}}}{j\omega L_k} = -3 \cdot U_{\phi, \text{cp}} \cdot j\omega C_{0\Sigma}.$$

Откуда индуктивность катушки

$$L_k = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 C_{0\Sigma}},$$

где $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ – угловая частота вращения.

Из-за наличия потерь активной мощности в реакторах расстройка от точной компенсации составляет порядка одного процента.

Свыше 80 % эксплуатируемых ДГР составляют реакторы типа ЗРОМ и РЗДСОМ, имеющих ступенчатое регулирование индуктивности с ПБВ.

Пример. Определить ток при однофазном металлическом замыкании на землю в сети напряжением 35 кВ, имеющей воздушные линии общей протяженностью 185 км.

Линия: марка провода АС 70/11 радиусом $r_n = 5,7 \cdot 10^{-3}$ м; расположение проводов по вершинам треугольника с расстояниями $d_{AB} = d_{BC} = 3,8$ м; $d_{AC} = 3,0$ м. Высоты подвеса проводов $h_A = h_C = 10,7$ м; $h_B = 14,1$ м.

При заданных параметрах линии определим:

среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A , B и C :

$$D_{cp} = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{AC} \cdot d_{BC}} = \sqrt[3]{3,8 \cdot 3,0 \cdot 3,8} = 3,51 \text{ м};$$

среднее расстояние от проводов фаз A , B и C до их зеркальных отражений относительно поверхности земли:

$$S_{cp} = 2 \cdot (10,7 + 14,1 + 10,7) / 3 = 23,7 \text{ м};$$

по формуле (4.1) емкостное сопротивление 1 км линии составит

$$x_{C0} = 3,96 \cdot 10^5 \cdot \lg \frac{23,7}{\sqrt[3]{5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,51^2}} = 6,95 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$$

и соответственно всей сети $x_{C0\Sigma} = x_{C0} / l = 6,97 \cdot 10^5 / 185 = 3765,8 \text{ Ом}$.

Искомый ток замыкания на землю определится величиной

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \frac{37000}{\sqrt{3} \cdot (-j3765,8)} = j17 \text{ А}.$$

Для полной компенсации тока замыкания на землю в данном случае необходимо нейтраль обмотки напряжением 37 кВ питающего трансформатора заземлить через катушку с индуктивным сопротивлением

$$x_L = x_{C0\Sigma} / 3 = 3765,8 / 3 = 1255 \text{ Ом}.$$

Выбираем заземляющий дугогасящий реактор типа РЗДСОМ-620/35У1 мощностью 620 кВ·А и предельными токами 12,5–25 А.

4.2. Расчёт токов коротких замыканий в установках напряжением ниже 1000 В

Электрические установки напряжением ниже 1000 В характеризуются большой электрической удаленностью от источников электроэнергии. Эти установки подключаются к распределительной сети ЭЭС через понижающие трансформаторы Т, [рис. 4.4](#).

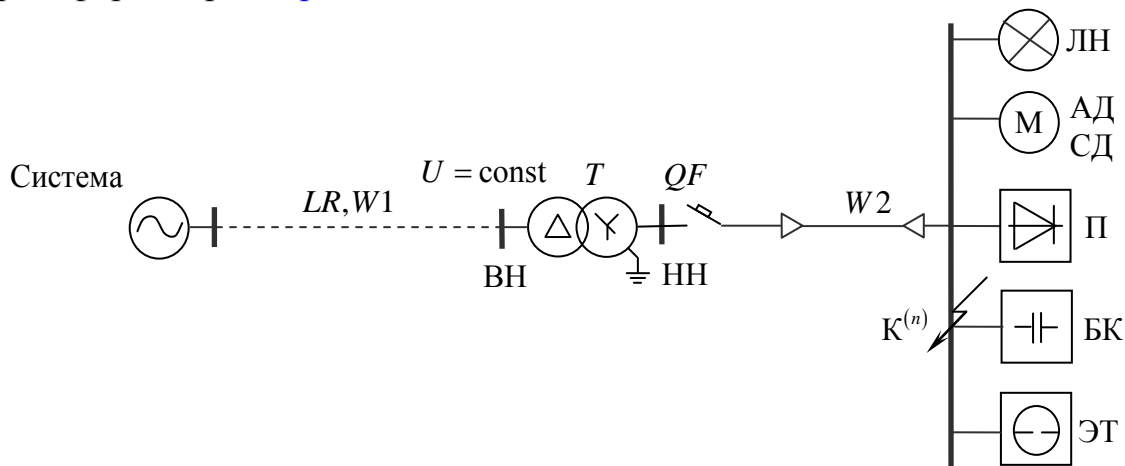


Рис. 4.4. Схема электроснабжения установок напряжением ниже 1000 В: АД, СД – асинхронные и синхронные электродвигатели; ЛН – освещение; П – преобразовательные установки; ЭТ – электротермические установки; БК – батареи конденсаторов; LR – токоограничивающий реактор; $W1$ – воздушная или кабельная линия; $W2$ – кабельная линия; ВН, НН – ступени высшего и низшего напряжения соответственно

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах; при этом используются средние номинальные напряжения (соответствующих номинальных напряжений: 660, 500, 380, 220, 127 В): 690, 525, 400, 230, 127 В. При составлении эквивалентных схем замещения параметры расчётной схемы следует приводить к ступени напряжения сети, на которой находится аварийный узел, активные и индуктивные сопротивления схемы замещения выразить в миллиомах.

При расчётах токов КЗ в электроустановках, питаемых непосредственно от сети ЭЭС, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление X_C . Значение этого сопротивления, мОм, приведённое к ступени напряжения аварийного узла $U_{\text{ср.НН}}$, В, следует рассчитывать по формуле

$$X_C = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{п0,В}} U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_K}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{ср.ВН}}$ – среднее номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора, В; $I_{\text{п0,В}}$ – действующее значение периодической составляющей тока при трёхфазном КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, кА; $S_{\text{к}}$ – мощность КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, кВ·А.

При отсутствии данных о токе $I_{\text{п0,В}}$ допускается в выражении (4.2) использовать номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора, $I_{\text{откл.ном}}$.

Достоверность расчёта токов КЗ в низковольтных установках зависит от того, насколько правильно оценены и учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

При электроснабжении электроустановки от ЭЭС через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ ($I_{\text{п0}}$), кА, без учёта подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}},$$

где R_{Σ} и X_{Σ} – суммарные активное и индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм.

Сопротивления R_{Σ} и X_{Σ} равны:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{T}} + R_{\text{ТА}} + R_{\text{QF}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}} + R_{\text{W2}} + R_{\text{д}} \quad (4.3)$$

и

$$X_{\Sigma} = X_{\text{С}} + X_{\text{T}} + X_{\text{ТА}} + X_{\text{QF}} + X_{\text{ш}} + X_{\text{W2}}, \quad (4.4)$$

где $X_{\text{С}}$ – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведённое к ступени напряжения аварийного узла; R_{T} и X_{T} – активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора, мОм, приведённые к ступени напряжения аварийного узла; $R_{\text{ТА}}$ и $X_{\text{ТА}}$ – активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформатора тока, мОм; R_{QF} и X_{QF} – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, мОм; $R_{\text{ш}}$ и $X_{\text{ш}}$ – активное и индуктивное сопротивления шинпроводов, мОм; $R_{\text{к}}$ – суммарное активное сопротивление контактных соединений; при приближённом учёте сопротивлений контактов следует принимать $R_{\text{к}} = 0,1 \text{ мОм}$ – для контактных соединений кабелей, $R_{\text{к}} = 0,01 \text{ мОм}$ – для шинпроводов; $R_{\text{к}} = 1,0 \text{ мОм}$ – для коммутационных аппаратов; R_{W2} и X_{W2} – активное и индуктивное сопротивления проводов

кабельной линии $W2$, мОм; R_d – активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, рассчитываемое в зависимости от условий КЗ (составляет 3–15 мОм).

Сопротивления понижающего трансформатора мощностью менее 1 МВ·А рассчитывают по формулам

$$R_T = \frac{p_k \cdot U_{\text{НН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2},$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2},$$

где сопротивление трансформатора

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{НН}}^2}{S_{\text{НОМ}}};$$

здесь $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; p_k – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт; $U_{\text{НН}}$ – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, В; u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

В случаях, когда понижающий трансформатор подключён к сети ЭЭС через реактор LR , воздушную или кабельную линию (длиной более 1 км) $W1$ (см. [рис. 4.4](#)), необходимо учитывать активные R_{LR} , R_{W1} и индуктивные X_{LR} , X_{W1} сопротивления этих элементов, приведенные к ступени напряжения аварийного узла, в выражениях (4.3) и (4.4).

Если в аварийном узле имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учётом подпитки от электродвигателей или комплексной нагрузки определяют как сумму токов от системы и электродвигателей или комплексной нагрузки.

Ударный ток трехфазного КЗ определяется по выражению

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} I_{\text{п0}},$$

где

$$K_y = 1 + e^{-\frac{t_y}{T_a}};$$

$$t_y = 0,01 \cdot \frac{\pi/2 + j_k}{\pi};$$

$$\varphi_k = \arctg X_{\Sigma}/R_{\Sigma};$$

здесь t_y – время от момента начала КЗ до появления ударного тока, с; остальные параметры известны.

В приближенных расчетах при определении i_y на шинах распределительных щитов можно принять $K_y = 1,35 - 1,5$ или $K_y = 1,1 - 1,3$ при питании от трансформаторов мощностью 400 – 1000 кВ·А или 40 – 250 кВ·А соответственно.

Расчет токов несимметричных КЗ выполняют, используя метод симметричных составляющих. Для получения результирующих сопротивлений составляют схемы замещения прямой и нулевой последовательностей.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока $I_{п0}^{(1)}$, кА, поврежденной фазы при однофазном КЗ от системы

$$I_{п0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

где $R_{1\Sigma} = R_{\Sigma}$ и $X_{1\Sigma} = X_{\Sigma}$ – суммарные активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности относительно аварийного узла (практически $R_{2\Sigma} = R_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$), мОм; $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – то же нулевой последовательности относительно аварийного узла, мОм.

Сопротивления $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ соответственно равны:

$$R_{0\Sigma} = R_{0T} + R_{TA} + R_{QF} + R_k + R_{0ш} + R_{0W2} + 3R_d,$$

$$X_{0\Sigma} = X_{0T} + X_{TA} + X_{QF} + X_k + X_{0ш} + X_{0W2},$$

где R_{0T} и X_{0T} – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора, приведенные к ступени напряжения аварийного узла (для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Δ/Y_0 при расчете КЗ в сети низшего напряжения эти сопротивления следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности, при других схемах соединения обмоток трансформаторов сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей); $R_{0\phi}$ и $X_{0\phi}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпровода (ориентировочно эти сопротивления находятся в пределах $R_{0\phi} = (5 - 14,7)R_{\phi}$, $X_{0ш} = (7,5 - 9,4)X_{ш}$); R_{0W2} и X_{0W2} – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабельной линии; R_d – активное сопротивление дуги в аварийном узле, рассчитываемое с учетом условий однофазного КЗ.

Если в низковольтной сети имеются воздушные линии, то их сопротивления нулевой последовательности равны:

$$R_{0W} = R_W l + 3R_3 l = R_W l + 0,15l,$$

$$X_{0W} \approx 3X_W,$$

где l – длина линии, м; R_3 – активное сопротивление, мОм/м, определяющее потери активной мощности в земле на 1 м трассы линии.

При расчёте минимального значения тока КЗ для произвольного момента времени необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников вследствие нагрева током КЗ (эффект теплового спада тока короткого замыкания). Данное увеличение учитывают с помощью коэффициента K_θ , зависящего от материала и температуры проводника:

$$R_\theta = R_H \cdot K_\theta,$$

где R_H – активное сопротивление проводника при начальной температуре, мОм; K_θ – коэффициент увеличения активного сопротивления проводника.

Активное сопротивление проводника при его начальной температуре θ_H

$$R_H = R_{\text{пог}} l \cdot \frac{\theta_{\text{усл}} + \theta_H}{\theta_{\text{усл}} + \theta_{\text{норм}}},$$

где $R_{\text{пог}}$ – погонное (удельное) активное сопротивление проводника, мОм/м, при нормированной температуре $\theta_{\text{норм}}$; l – длина проводника до аварийного узла, м; $\theta_{\text{усл}}$ – условная температура (для меди $\theta_{\text{усл}} = 234^\circ\text{C}$, для алюминия $\theta_{\text{усл}} = 236^\circ\text{C}$).

Температуру проводника до возникновения КЗ можно определить по формуле

$$\theta_H = \left(\frac{I_{\text{норм.расч}}}{I_{\text{доп.прод}}} \right)^2 (\theta_{\text{доп.прод}} - \theta_{\text{окр.ном}}) + \theta_{\text{окр}},$$

где $I_{\text{норм.расч}}$ – расчетный ток нормального режима, А; $I_{\text{доп.прод}}$ – допустимый ток продолжительного режима для проводника данного сечения, А; $\theta_{\text{доп.прод}}$ и $\theta_{\text{окр.ном}}$ – соответственно допустимая температура нагрева проводника

в продолжительном режиме и нормированная температура окружающей среды, °С; $\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Значение K_{θ} определяется по формуле

$$K_{\theta} = \frac{\theta_{\text{усл}} + \theta_{\text{кн}}}{\theta_{\text{усл}} + \theta_{\text{н}}},$$

где $\theta_{\text{кн}}$ – конечная температура проводника, °С.

Существуют способы учёта теплового спада тока короткого замыкания, где иначе определяется сопротивление R_{θ} . Например, значение сопротивления проводника, изменившегося вследствие нагрева током КЗ, можно найти по выражению

$$R_{\theta} = R_{\text{н}} \left[1 + \frac{k \cdot t}{1 + 0,004 \cdot \theta_{\text{н}}} \cdot \left(\frac{I_{\text{п0}}}{s} \right)^2 \right],$$

где $I_{\text{п0}}$ – ток КЗ предварительного расчёта без учёта нагрева проводников, кА; s – площадь поперечного сечения проводника, мм²; $\theta_{\text{н}}$ – температура проводника перед началом КЗ (можно принимать равной 50°С); t – время действия тока КЗ; k – коэффициент, равный для меди 22, для алюминия 5.

Расчёт нагрева изолированных проводников при продолжительных КЗ рекомендуется выполнять с учётом теплоотдачи в изоляцию. Необходимость учёта теплоотдачи определяется из сопоставления расчётного времени нагрева ($t_{\text{откл}}$) с так называемой критической продолжительностью КЗ ($t_{\text{откл.кр}}$), при которой пренебрежение теплоотдачей в изоляцию приводит к погрешности в расчётах превышения температуры проводника над начальной, равной 5 %. Теплоотдачу следует учитывать, если $t_{\text{откл}} \geq t_{\text{откл.кр}}$. Критическая продолжительность КЗ зависит от площади поперечного сечения проводника s и определяется по формулам:

для кабелей с алюминиевыми жилами

$$t_{\text{откл.кр}} = 0,65 \cdot 10^{-2} \cdot s;$$

для кабелей с медными жилами

$$t_{\text{откл.кр}} = 1,22 \cdot 10^{-2} \cdot s.$$

Вопросы для самопроверки

1. Какой вид замыкания называется простым замыканием на землю?
2. В чём состоят особенности переходных процессов сетей с изолированной нейтралью?
3. Для чего нужна компенсация тока простого замыкания на землю и как она осуществляется?
4. Каковы особенности расчёта токов КЗ в сетях до 1000 В?
5. Что такое тепловой спад тока?
6. Как определяются минимальный и максимальный токи КЗ в сетях до 1000 В?
7. Как учитывается изменение активного сопротивления проводников при КЗ?
8. Какие допущения принимаются при расчётах токов КЗ в электроустановках напряжением до 1000 В?
9. В чём заключаются особенности выбора расчётных условий в установках до 1000 В?
10. Как рассчитывается ударный ток КЗ в сетях и установках до 1000 В?
11. Какие факторы снижают достоверность расчёта коротких замыканий в электроустановках до 1000 В?
12. Каким образом можно повысить точность расчёта коротких замыканий в сетях с изолированной нейтралью и установках до 1000 В?

5. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВНЕЗАПНОГО НАРУШЕНИЯ РЕЖИМА

5.1. Баланс магнитных потоков

Чтобы яснее представить физический процесс в момент возникновения КЗ, обратимся к некоторым положениям из курса физики и электрических машин.

По закону электромагнитной индукции Фарадея изменение магнитного потока через площадь, ограниченную проводником, приводит к возникновению в этом проводнике электродвижущей силы индукции, значение которой зависит от скорости изменения магнитного потока.

В замкнутых контурах под действием наведенной ЭДС возникают индукционные токи. Ток, проходящий по проводнику, в свою очередь создает собственный магнитный поток, поэтому всякое изменение тока вызывает изменение потока и наведение в проводнике ЭДС и индуцированного ею тока. Наведение в проводнике ЭДС за счет изменения проходящего в нем тока носит название самоиндукции. Значение ЭДС самоиндукции пропорционально скорости изменения тока и коэффициенту самоиндукции.

Направление индукционного тока устанавливается законом Ленца. По этому закону возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.

Применительно к переходным процессам в электрических машинах закон Ленца называют законом постоянства потокосцеплений. Потокосцеплением или магнитным сцеплением Ψ называется произведение магнитного потока Φ на число витков обмотки w , которую пронизывает этот поток:
$$\Psi = w\Phi.$$

Магнитная связь между обмотками статора и ротора синхронных машин (СМ) приводит к тому, что всякое изменение тока в одной обмотке вызывает индуцированный ток в другой обмотке, который стремится поддерживать потокосцепление данной обмотки постоянным. Рассмотрим составляющие потоков ([рис. 5.1](#)).

1. Основной или полезный поток машины Φ_d , направленный по продольной оси полюсов, создается током обмотки возбуждения. При холостом ходе машины потоком Φ_d создается ЭДС холостого хода обмотки статора E_q . Магнитная цепь, по которой замыкается основной поток, проходит по стали ротора, воздушному зазору машины и ярму статора.

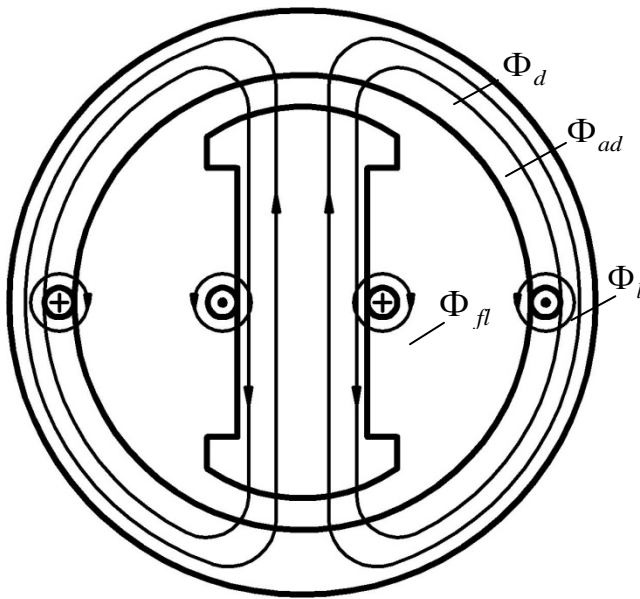


Рис. 5.1. К определению магнитных потоков синхронной машины

В зависимости от угла сдвига между ЭДС и током статора действие реакции статора на поле машины будет различным. При угле сдвига $\varphi \approx 90^\circ$ ток статора создает продольный магнитный поток реакции статора Φ_{ad} , направленный встречно основному потоку Φ_d .

5. Помимо потока реакции статора обмоткой статора создается поток рассеяния Φ_l , не попадающий в полюсы (ротора) и сцепленный только с обмоткой статора.

6. Основной магнитный поток Φ_d , поток рассеяния ротора Φ_{fl} и поток реакции статора Φ_{ad} в сумме составляют результирующий магнитный поток Φ_f , сцепленный с обмоткой возбуждения. Очевидно, что

$$\Phi_f = \Phi_d + \Phi_{fl} - \Phi_{ad}.$$

7. Магнитный поток, сцепленный с обмоткой статора $\Phi_d - \Phi_{ad}$, равный потоку в воздушном зазоре машины $\Phi_{\delta(id)}$, создает в обмотке статора ЭДС E_δ (иначе E_{id}). При пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора ЭДС E_δ больше напряжения на зажимах генератора на значение падения напряжения от тока статора в индуктивном сопротивлении рассеяния статорной обмотки x_l . Падение напряжения в обмотке статора пропорционально потоку рассеяния статора Φ_l .

При КЗ в цепи статора генератора все эти магнитные потоки претерпевают изменение. Изменение магнитных потоков в первый момент КЗ следует определенной закономерности, вытекающей из принципа постоянства потокоцеплений: результирующий магнитный поток, пронизывающий любую замкнутую обмотку, не может измениться скачкообразно, так как в против-

2. Некоторая часть потока полюсов (ротора) не проникает в статор, а замыкается в воздушном пространстве и стали полюсов. Эта часть потока возбуждения именуется потоком рассеяния ротора – Φ_{fl} .

3. Полезный поток возбуждения Φ_{f0} равен сумме потоков Φ_d и Φ_{fl} .

4. В режиме нагрузки по обмотке статора проходит ток, вызывающий образование магнитного поля статора. Воздействие поля статора на основное поле обмотки возбуждения называют реакцией статора (якоря).

ном случае в обмотке наводилась бы бесконечно большая ЭДС. Поэтому пронизывающий обмотку магнитный поток при каком-либо внезапном нарушении режима работы цепи сначала остается неизменным и лишь в дальнейшем начинает плавно изменяться, стремясь к новому установившемуся значению.

Если обмотку пронизывает несколько магнитных потоков, то принцип постоянства потокосцепления следует относить ко всей совокупности потоков.

В продольной оси машины имеются две-три замкнутые обмотки: обмотки возбуждения и статора, демпферная обмотка (при наличии).

Применение принципа постоянства потокосцеплений в равной мере к обмотке возбуждения и обмотке статора позволяет получить полную картину изменения тока возбуждения и тока статора в момент КЗ.

В цепи статора при этом, как известно, возникают две составляющие тока КЗ: быстро затухающая (апериодическая) составляющая и весьма медленно затухающая симметричная (периодическая) составляющая. Апериодическая составляющая тока КЗ может быть отброшена в силу того обстоятельства, что магнитный поток реакции статора, обусловленный апериодической составляющей тока КЗ, неподвижен относительно статора и, взаимодействуя с током обмотки возбуждения, вращающейся вместе с ротором, создает момент пульсирующего характера со средним значением, близким к нулю.

Отбрасывая апериодическую составляющую тока КЗ, мы тем самым допускаем возможность скачкообразного изменения суммарного магнитного потока, сцепленного с обмоткой статора. Однако принцип постоянства потокосцепления однозначно должен быть применен к обмотке возбуждения.

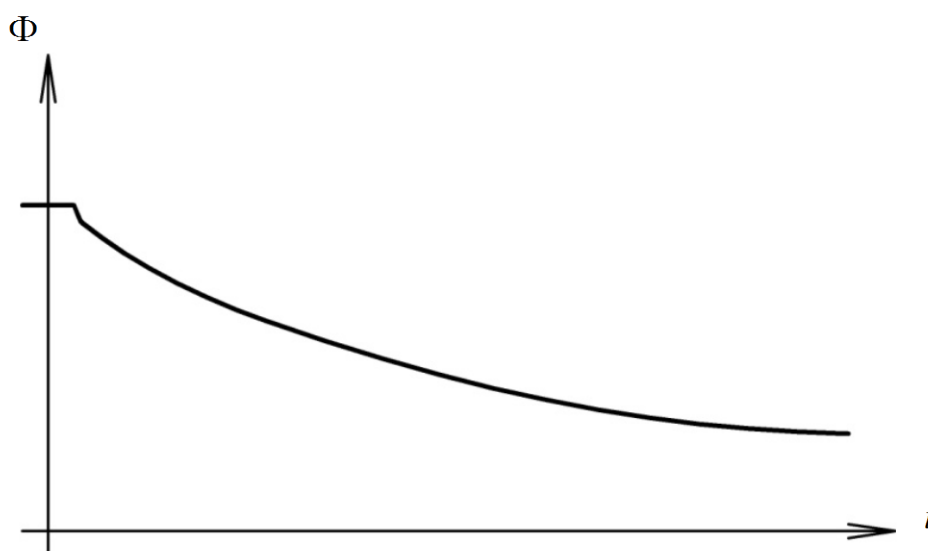


Рис. 5.2. Изменение магнитного потока в течение переходного процесса

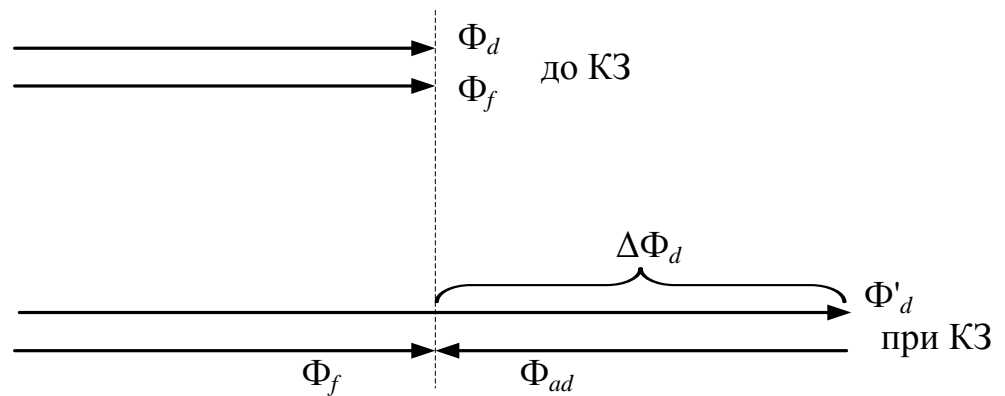


Рис. 5.3. Баланс магнитных потоков СМ в режиме холостого хода без учета рассеяния обмотки возбуждения

Рассмотрим приложение этого принципа в простейшем случае трехфазного КЗ в цепи машины, работающей в режиме холостого хода (х. х.). Предполагая вначале, что поток рассеяния ротора отсутствует, можно допустить, что в режиме х. х. существует только один полезный поток Φ_d и, следовательно, суммарный магнитный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения Φ_f , равен Φ_d . Поток Φ_d пронизывает воздушный зазор и сцепляется с обмоткой статора.

При возникновении в обмотке статора тока КЗ появляется поток реакции якоря Φ_{ad} . Поскольку в силу принципа постоянства потокосцеплений суммарный поток обмотки возбуждения Φ_f в первый момент КЗ должен остаться неизменным, при появлении потока реакции статора Φ_{ad} одновременно возрастает поток Φ_d на величину $\Delta\Phi_d = \Phi_{ad}$, целиком компенсирующую реакцию статора. Увеличение потока в обмотке возбуждения, наводимого в момент КЗ, равно $\Delta\Phi_d$.

Таким образом, реакция статора в первый момент КЗ совершенно не проявляется и магнитный поток в воздушном зазоре Φ_δ машины остается неизменным; следовательно, индуктивное сопротивление машины в этом случае сводится лишь к индуктивному сопротивлению рассеяния статора:

$$x'_d = x_l. \tag{5.1}$$

Это так называемое переходное индуктивное сопротивление, равное, при отсутствии рассеяния ротора, индуктивному сопротивлению рассеяния статора. Влияние рассеяния ротора и вносит коррективы в полученные результаты.

$$\Phi_{id}$$

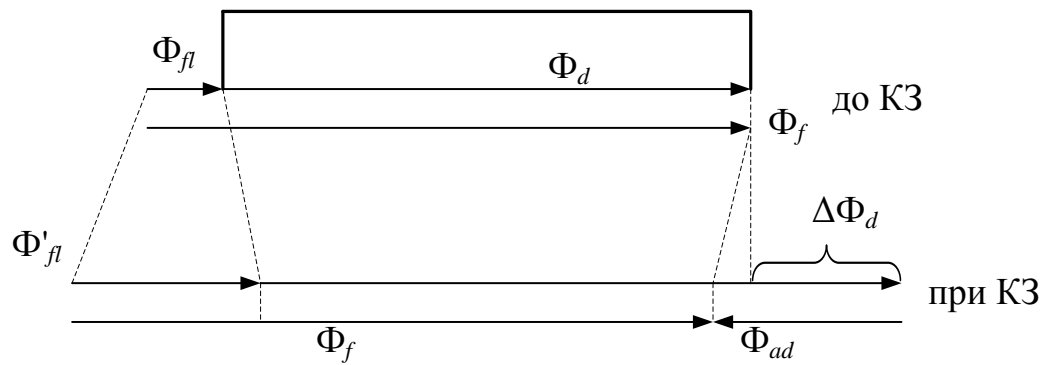


Рис. 5.4. Баланс магнитных потоков СМ в режиме холостого хода с учетом рассеяния обмотки возбуждения

При наличии потока рассеяния ротора Φ_{fl} магнитный поток в воздушном зазоре машины, который мы обозначим через Φ_{id} , при холостом ходе машины по-прежнему равен полезному потоку Φ_d , создаваемому обмоткой возбуждения. Однако суммарный поток обмотки возбуждения Φ_f уже не равен Φ_d , а представляет собой сумму полезного потока Φ_d и потока рассеяния ротора Φ_{fl} : $\Phi_f = \Phi_d + \Phi_{fl}$.

При КЗ появится поток реакции статора Φ_{ad} , однако постоянство суммарного потока обмотки возбуждения Φ_f обеспечивается увеличением потоков Φ_d и Φ'_{fl} , компенсирующих поток реакции статора Φ_{ad} :

$$\Phi_f = \Phi'_d + \Phi'_{fl} - \Phi_{ad} = \Phi_d + \Phi_{fl} = \text{const}. \quad (5.2)$$

Как полезный поток Φ_d , так и поток рассеяния ротора Φ_{fl} создаются одним и тем же током, протекающим в обмотке возбуждения, и их увеличение при КЗ связывается с появлением свободного тока в этой обмотке. Как вытекает из соотношения (5.2), приращение этих потоков $\Delta\Phi_d = \Phi'_d - \Phi_d$ и $\Delta\Phi_{fl} = \Phi'_{fl} - \Phi_{fl}$ полностью уравнивает поток реакции статора внутри обмотки возбуждения: $\Delta\Phi_d + \Delta\Phi_{fl} = \Phi_{ad}$. Очевидно, только одна из этих составляющих, а именно $\Delta\Phi_d$, пронизывает воздушный зазор машины. Вторая же составляющая компенсирующего $\Delta\Phi_{fl}$ в воздушный зазор не попадает, поскольку поток рассеяния ротора изменяется только с обмоткой возбуждения.

Мы рассмотрели баланс магнитных потоков в случае, когда генератор работал на холостом ходу и потом произошло КЗ. Рассмотрим, как будет выглядеть этот баланс потоков в случае, когда генератор работал в нормальном режиме, а потом произошло внезапное нарушение режима.

В этом случае баланс магнитных потоков будет иметь вид [рис. 5.5](#).

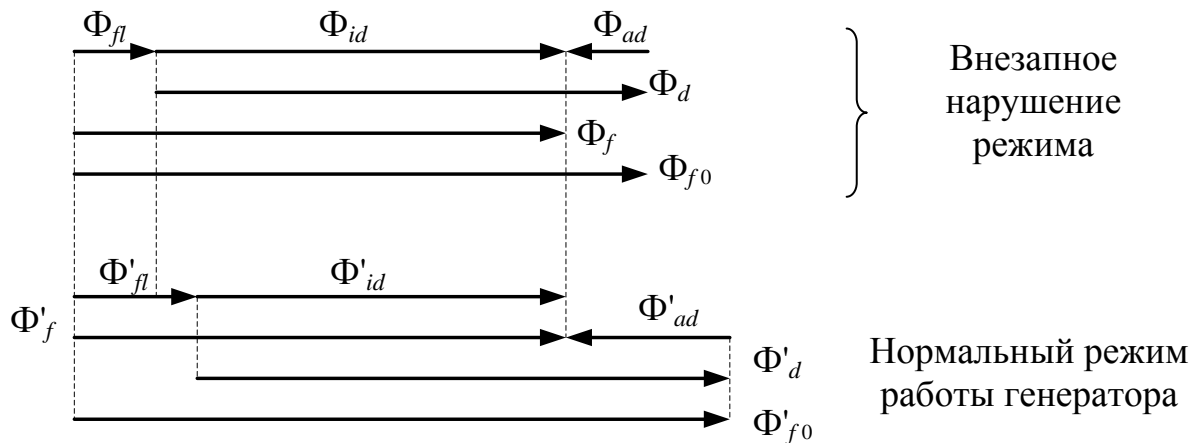


Рис. 5.5. Баланс магнитных потоков нагруженной СМ

Таким образом, компенсация продольной реакции статора в первый момент нарушения режима работы генератора получается неполной.

При наличии рассеяния обмотки возбуждения будем иметь следующие магнитные потоки в продольной оси:

- 1) полный магнитный поток возбуждения Φ_{f0} , вызываемый током возбуждения i_f ;
- 2) полезный магнитный поток возбуждения Φ_d ;
- 3) магнитный поток рассеяния ротора, пропорциональный полезному магнитному потоку возбуждения $\Phi_{fl} = \sigma_f \Phi_{f0}$ (σ_f – коэффициент рассеяния);
- 4) магнитный поток продольной реакции статора Φ_{ad} , вызываемый продольной составляющей тока статора I_d ;
- 5) продольная составляющая магнитного потока в воздушном зазоре $\Phi_{id} = \Phi_d - \Phi_{ad}$;
- 6) суммарный магнитный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения, $\Phi_f = \Phi_{id} + \Phi_{fl} = \Phi_{f0} - \Phi_{ad}$.

При внезапном изменении продольной составляющей тока статора мгновенно изменится и вызываемый ею магнитный поток продольной реакции статора Φ'_{ad} . Магнитный поток продольной реакции якоря сцеплен с обмоткой возбуждения, и всякое изменение его наведет в обмотке ротора ЭДС, которая вызовет ток, стремящийся компенсировать изменения вызвавшего его потока. Благодаря этому наведенному свободному току изменится поток рассеяния ротора Φ'_{fl} .

В первый момент переходного процесса (в первый момент изменения тока статора) магнитный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения, $\Phi'_f = \Phi_f = \Phi'_{f0} - \Phi'_{ad}$ не может внезапно измениться. Из диаграммы магнитных потоков в первоначальный момент нарушения режима видно, что изменение магнитного потока Φ'_{f0} в этот момент равно изменению магнитного

потока продольной реакции якоря Φ'_{ad} . Магнитный поток в воздушном зазоре Φ'_{id} несколько уменьшится на величину изменения магнитного потока рассеяния ротора. Следовательно, внезапно изменится и продольная составляющая внутренней ЭДС E_{iq} .

5.2. Переходные ЭДС и реактивности СМ

Можно найти некоторое индуктивное сопротивление, определяющее ЭДС, которая не изменяется в первый момент времени нарушения режима синхронной машины. Для определения этого сопротивления, которое называется переходным индуктивным сопротивлением x'_d машины, обратимся к рассмотрению потокосцеплений, вызванных магнитными потоками в продольной оси. Потокосцепление обмотки возбуждения нагруженной СМ, соответствующее магнитному потоку Φ_f , может быть определено как

$$\Psi_f = i_f x_f - I_d x_{ad}, \quad (5.3)$$

где i_f – ток обмотки возбуждения;

x_f – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения;

I_d – продольная составляющая тока статора;

x_{ad} – взаимное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения и обмотки статора в продольной оси.

Формула (5.3) отражает то обстоятельство, что потокосцепление обмотки возбуждения нагруженной синхронной машины складывается из двух составляющих: первая из них ($i_f \cdot x_f$) соответствует потокосцеплению от полного магнитного потока возбуждения, а вторая $I_d \cdot x_{ad}$ – потокосцеплению от магнитного потока продольной реакции статора Φ_{ad} .

Результирующее потокосцепление статорной обмотки в продольной оси может быть представлено как

$$\Psi_d = i_f x_{ad} - I_d x_d, \quad (5.4)$$

где x_d – индуктивное сопротивление статорной обмотки в продольной оси (продольное синхронное индуктивное сопротивление).

Первая составляющая в (5.4) определяет потокосцепление статора от полезного магнитного потока возбуждения Φ_d , а вторая – соответствует потокосцеплению от магнитного потока продольной реакции статора и продольной составляющей магнитного потока рассеяния статора.

Напряжение на выводах генератора равно результирующему потокосцеплению статорной обмотки. Поэтому для продольной оси справедливо выражение

$$U_q = \Psi_d = i_f x_{ad} - I_d x_d. \quad (5.5)$$

В первый момент нарушения режима с изменением тока I_d меняется также и ток возбуждения i_f , неизменным остается потокосцепление обмотки возбуждения Ψ_f . Это обстоятельство позволяет для первого момента исключить i_f из (5.5).

Определим i_f из (5.3):

$$i_f = (\Psi_f + I_d x_{ad}) / x_f. \quad (5.6)$$

Подставим полученное выражение (5.6) в (5.5):

$$U_q = \Psi_f x_{ad} / x_f - I_d (x_d x_f - x_{ad}^2) / x_f. \quad (5.7)$$

Последнее уравнение можно представить в виде

$$U_q = E'_q - I_d x'_d, \quad (5.8)$$

где

$$E'_q = \Psi_f x_{ad} / x_f \quad (5.9)$$

и

$$x'_d = (x_d x_f - x_{ad}^2) / x_f. \quad (5.10)$$

Так как в первый момент времени нарушения режима работы синхронного генератора потокосцепление Ψ_f остается неизменным, то неизменной будет и ЭДС E'_q . Сопротивление x'_d называется переходным индуктивным сопротивлением (с учетом рассеяния ротора).

Для определения переходного сопротивления x'_d удобнее другая формула, следующая из (5.10):

$$x'_d = x_d - x_{ad}^2 / x_f. \quad (5.11)$$

Величины x_d и x_f представляют собой суммы взаимных сопротивлений и индуктивных сопротивлений рассеяния соответствующих обмоток:

$$x_d = x_{ad} + x_l;$$

$$x_f = x_{ad} + x_{fl},$$

где x_l – сопротивление рассеяния статора;

x_{fl} – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения.

Подставив эти выражения в (5.11), получим

$$x'_d = x_l + \frac{x_{ad} \cdot x_{fl}}{x_{ad} + x_{fl}}. \quad (5.12)$$

Таким образом, сопротивление x'_d представляет собой результирующую индуктивность статорной обмотки при закороченной обмотке возбуждения. Величина x'_d указывается в паспортных данных машины. Переходное сопротивление x'_d можно также выразить через коэффициент рассеяния обмотки возбуждения σ_f :

$$x'_d = x_l + x_{ad} \left[\sigma_f / (1 + \sigma_f) \right], \quad (5.13)$$

где

$$\sigma_f = \frac{x_{fl}}{x_{ad}} = \frac{\Phi_{fl}}{\Phi_d}.$$

Выражение (5.13) показывает, что в момент возмущения режима не весь продольный поток компенсируется током, наведенным в обмотке возбуждения. Часть этого потока остается нескомпенсированным из-за рассеяния обмотки возбуждения (эта часть составляет $\sigma_f / (1 + \sigma_f)$ от полного потока продольной реакции якоря).

В поперечной оси машины при отсутствии демпферных обмоток и эквивалентных ей цепей (массивные части ротора) магнитные потоки могут изменяться беспрепятственно, в поперечной оси машина будет характеризоваться синхронным поперечным индуктивным сопротивлением как в установившемся режиме, так и в момент его нарушения.

Принципиальная схема машины с магнитной связью между статором и обмоткой возбуждения (в цепь последней введена ЭДС E_q , отвечающая результирующему потокоцеплению Ψ_f) имеет вид [рис. 5.6](#).

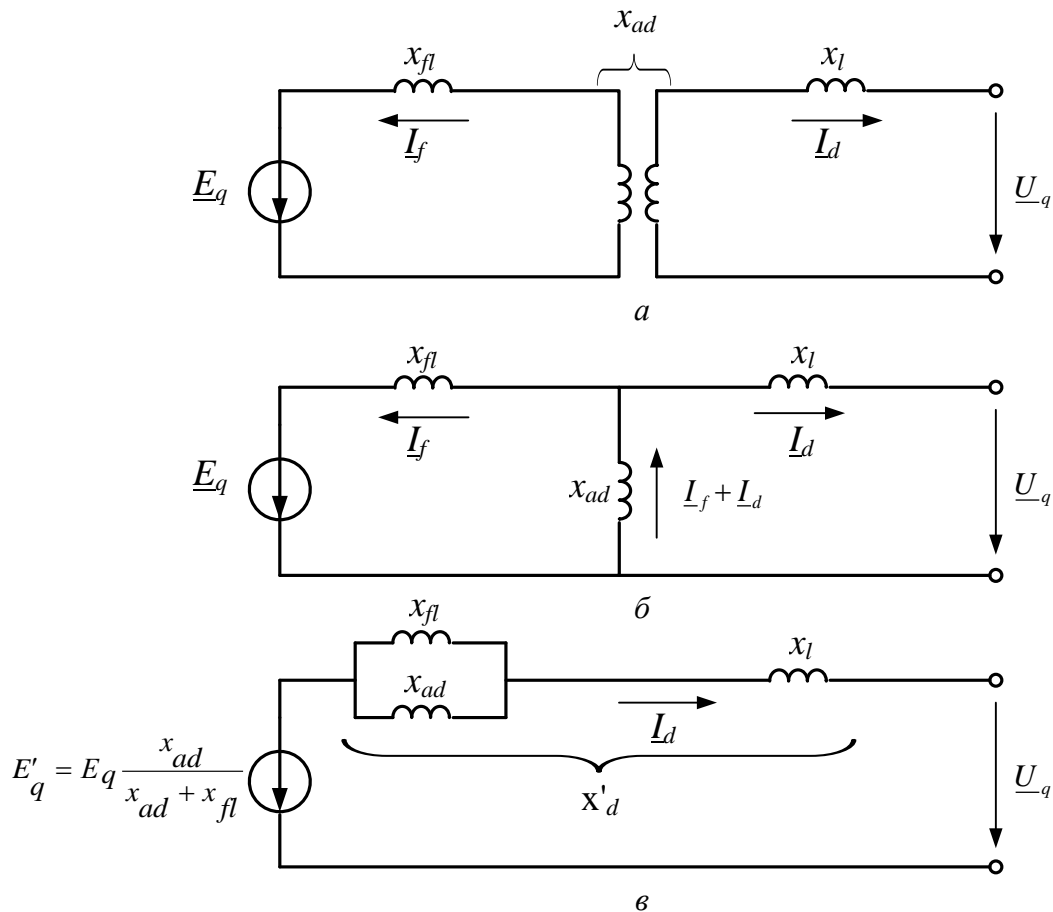


Рис. 5.6. К определению переходной реактивности машины в продольной оси:
 а – исходная принципиальная схема; б и в – схемы замещения

После замены ветвей с x_{fl} и x_{ad} одной эквивалентной, получим схему, где, как и следовало ожидать, машина представлена значениями E'_q и x'_d (рис. 5.6, в).

5.3. Сверхпереходные ЭДС и индуктивные сопротивления СМ

При наличии демпферных обмоток или эквивалентных им цепей компенсация реакции статора в продольной оси обуславливается не только токами в обмотке возбуждения, но также и токами в демпферных обмотках. Благодаря этому компенсация происходит полнее, нежели при отсутствии демпферных обмоток.

Компенсация потока реакции статора происходит от совместного действия токов в обмотке возбуждения и в демпферных обмотках.

Токи в демпферной обмотке обычно затухают значительно быстрее, чем токи в обмотке возбуждения. По мере их затухания ток в обмотке возбу-

ждения увеличивается на соответствующее значение. Происходит как бы переход тока из демпферной обмотки в обмотку возбуждения.

Это можно проиллюстрировать графиком на [рис. 5.7](#).

Отличным от машины без демпферных обмоток получается переходный процесс в поперечной оси машины. В машинах с демпферной обмоткой магнитный поток поперечной реакции суммируется с демпферной обмоткой, поэтому при внезапном изменении тока статора I_q в демпферной обмотке будут наводиться токи, создающие магнитный поток в поперечной оси машины. Этот магнитный поток будет компенсировать изменение поперечной реакции статора, однако из-за рассеяния демпферной обмотки компенсация будет неполная. При полном затухании токов в демпферной обмотке поперечная реакция статора проявится полностью.

Для продольной оси машины с демпферными обмотками, подобно тому как это было сделано для машин без демпферных обмоток, можно найти некоторое индуктивное сопротивление x_d'' и определяемую им ЭДС E_q'' , которая не изменится в первый момент нарушения режима.

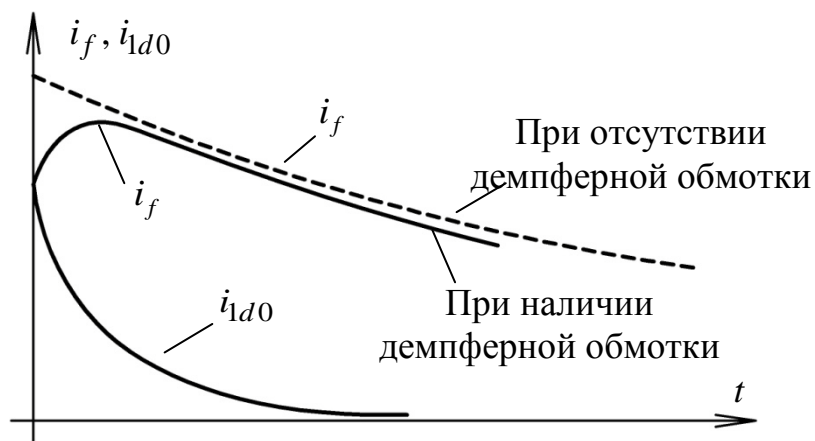


Рис. 5.7. Изменение токов в течение переходного процесса

Аналогично для поперечной оси можно найти индуктивное сопротивление x_q'' и ЭДС E_d'' , обладающих также свойством неизменности в момент изменения режима. Индуктивные сопротивления x_d'' и x_q'' называются сверхпереходными соответственно в продольной и поперечных осях. Для их определения обратимся к рассмотрению потокосцеплений отдельных обмоток.

Потокосцепление обмотки статора определяется магнитными потоками, вызванными токами в трех обмотках. Ток обмотки возбуждения и обусловленный им магнитный поток дают потокосцепление в продольной оси d . Ток в демпферной обмотке, протекающий лишь во время переходного процесса, определяет потокосцепление Ψ_1 , последнее может быть разложено на продольную и поперечную составляющие Ψ_{1d} и Ψ_{1q} , которые обуславливаются соответственно продольной и поперечной составляющими тока демпферной обмотки I_{1d} и I_{1q} . При протекании тока I по обмотке статора возни-

кают магнитные потоки реакции и рассеяния статора. Эти магнитные потоки, разложенные на продольную и поперечную составляющие, дают Ψ_{ad} и Ψ_{aq} . В результате совместного действия токов всех обмоток имеем результирующее потокосцепление статорной обмотки, которое равно геометрической сумме отдельных потокосцеплений. Это потокосцепление Ψ определяет напряжение на выводах машины U , которое отстает от Ψ на 90° .

При переходном процессе составляющие результирующего потокосцепления статора будут определяться выражениями

$$\begin{cases} \Psi_d = i_f \cdot x_{ad} + i_{1d} \cdot x_{a1d} - I_d x_d, \\ \Psi_q = i_{1q} \cdot x_{a1q} - I_q x_q, \end{cases} \quad (5.14)$$

где $i_f \cdot x_{ad}$ – потокосцепление статора от тока i_f в обмотке возбуждения;

$i_{1d} \cdot x_{a1d}$ – потокосцепление статора от тока i_{1d} в продольной демпферной обмотке (здесь x_{a1d} – индуктивное сопротивление взаимной индукции между демпферной обмоткой и обмоткой статора в продольной оси);

$I_d x_d$ – потокосцепление статора от продольного тока статора;

$i_{1q} \cdot x_{a1q}$ – потокосцепление статора от тока в поперечной демпферной обмотке (x_{a1q} – то же сопротивление, что и x_{a1d} , но в поперечной оси);

$I_q x_q$ – потокосцепление статора от поперечной составляющей тока статора.

Соответственно выражению (5.14) продольная и поперечная составляющие напряжения на выводах машины равны:

$$\begin{cases} U_q = i_f \cdot x_{ad} + i_{1d} \cdot x_{a1d} - I_d x_d, \\ U_d = -i_{1q} \cdot x_{a1q} + I_q x_q, \end{cases} \quad (5.15)$$

$$U_d = -\Psi_q; U_q = \Psi_d.$$

Для того чтобы определить напряжение в момент нарушения установившегося режима, необходимо рассчитать результирующие потокосцепления обмотки возбуждения и демпферной обмотки.

Потокосцепление обмотки возбуждения определяется следующей суммой:

$$\Psi_f = i_f \cdot x_f + i_{1d} \cdot x_{f1d} - I_d \cdot x_{afd}, \quad (5.16)$$

где $i_f \cdot x_f$ – потокосцепление обмотки возбуждения от тока в обмотке возбуждения;

$i_{1d} \cdot x_{f1d}$ – то же от тока демпферной обмотки (здесь x_{f1d} – сопротивление взаимной индукции между обмоткой возбуждения и демпферной обмоткой);

$I_d \cdot x_{afd}$ – потокосцепление обмотки возбуждения от продольной составляющей тока статора.

Для демпферной обмотки в продольной и поперечной осях справедливы выражения

$$\begin{cases} \Psi_{1d} = i_{1d} \cdot x_{1d} + i_f \cdot x_{f1d} - I_d x_{a1d}, \\ \Psi_{1q} = i_{1q} \cdot x_{1q} - I_q x_{a1q}, \end{cases} \quad (5.17)$$

где $i_{1d} \cdot x_{1d}$ и $i_{1q} \cdot x_{1q}$ – потокосцепления демпферных обмоток в продольной и поперечной осях от токов в демпферных обмотках (здесь x_{1d} и x_{1q} – сопротивления демпферных обмоток от токов в этих обмотках, x_{f1d} – сопротивление взаимной индукции между демпферной и обмоткой возбуждения);

$I_d x_{a1d}$ и $I_q x_{a1q}$ – потокосцепление демпферных обмоток в продольной и поперечной осях от тока статора (здесь x_{a1d} и x_{a1q} – сопротивления взаимной индукции между обмоткой статора и демпферными обмотками в продольной и поперечной осях).

В дальнейших выкладках примем допущение, что взаимные сопротивления между тремя обмотками равны, т. е.

$$x_{afd} = x_{f1d} = x_{a1d} = x_{ad}.$$

При заданном изменении тока статора токи в обмотках ротора могут быть получены через потокосцепления и (5.16), и (5.17) для продольной и поперечной осей:

$$\begin{cases} i_f = \frac{\Psi_f \cdot x_{1d} - \Psi_{1d} \cdot x_{ad} + I_d (x_{ad} \cdot x_{1d} - x_{ad}^2)}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}, \\ i_{1d} = \frac{\Psi_{1d} \cdot x_f - \Psi_f \cdot x_{ad} + I_d (x_{ad} \cdot x_f - x_{ad}^2)}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}, \\ i_{1q} = \frac{\Psi_{1q} + I_q x_{aq}}{x_{1q}}. \end{cases} \quad (5.18)$$

Подставляя эти выражения в уравнение (5.15) для напряжения на выводах машины, после преобразования будем иметь:

$$U_q = \frac{\Psi_f \cdot (x_{1d} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2) + \Psi_d \cdot (x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2)}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2} -$$

$$-I_d \cdot \frac{x_d \cdot x_f \cdot x_{1d} - 2x_{ad}^3 - x_d \cdot x_{ad}^2 - x_f \cdot x_{ad}^2 - x_{1d} \cdot x_{ad}^2}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}, \quad (5.19)$$

$$U_d = -\Psi_{1q} \frac{x_{ad}}{x_{1q}} + I_q \frac{x_q x_{1q} - x_{ad}^2}{x_{1q}}. \quad (5.20)$$

Эти уравнения можно представить в следующем виде:

$$U_q = E_q'' - I_d x_d'', \quad (5.21)$$

$$U_d = E_d'' - I_q x_q'', \quad (5.22)$$

$$\begin{cases} E_q'' = \frac{\Psi_f \cdot (x_{1d} \cdot x_{ad} - x_{ad}^2) + \Psi_{1q} \cdot (x_f \cdot x_{ad} - x_{ad}^2)}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}; \\ E_d'' = -\Psi_{1q} \frac{x_{aq}}{x_{1q}}. \end{cases} \quad (5.23)$$

Эти ЭДС отличаются свойством оставаться неизменными в момент нарушения режима работы машины, поскольку они определяются потокосцеплениями Ψ_f , Ψ_{1d} и Ψ_{1q} , которые не могут мгновенно измениться.

Величины x_d'' и x_q'' представляют собой сверхпереходные индуктивные сопротивления машины:

$$\begin{cases} x_d'' = \frac{x_d \cdot x_f \cdot x_{1d} - 2x_{ad}^2 - x_d \cdot x_{ad}^2 - x_f \cdot x_{ad}^2 - x_{1d} \cdot x_{ad}^2}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}, \\ x_q'' = \frac{x_q \cdot x_{1q} - x_{aq}^2}{x_{1q}}. \end{cases} \quad (5.24)$$

Эти сопротивления определяют ток статора в момент нарушения режима работы.

Выражение для поперечного сверхпереходного индуктивного сопротивления по структуре ничем не отличается от выражения для продольного

переходного индуктивного сопротивления, поэтому для него можно написать следующие выражения:

$$x_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{lq}}, \quad (5.25)$$

$$x_q'' = x_l + \frac{x_{l1q} \cdot x_{aq}}{x_{aq} + x_{l1q}} = x_l + \frac{x_{lq} \cdot x_{lq}'}{x_{alq} + x_{lq}}, \quad (5.26)$$

где x_{l1q} – индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки в поперечной оси.

Формула для определения продольного сверхпереходного сопротивления может быть представлена в виде

$$x_d'' = x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_{1d} + x_f - 2x_{ad})}{x_f \cdot x_{1d} - x_{ad}^2}. \quad (5.27)$$

Вводя индуктивные сопротивления рассеяния трех обмоток

$$x_l = x_d - x_{ad}, \quad x_{fl} = x_f - x_{l1d}, \quad x_{l1d} = x_{1d} - x_{ad},$$

из (5.27) получаем

$$x_d'' = x_l + \frac{x_{ad} \cdot x_{fl} \cdot x_{l1d}}{x_{ad} \cdot x_{fl} + x_{ad} \cdot x_{l1d} + x_{fl} \cdot x_{l1d}} = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fl}} + \frac{1}{x_{l1d}}}. \quad (5.28)$$

Выражения (5.26) и (5.28) позволяют составить упрощенные эквивалентные схемы замещения (рис. 5.8):

$$\underline{E}''_{q|0} = \underline{E}''_{q0} = \underline{U}_{q0} + \underline{I}_{d0} j x_d'', \quad (5.29)$$

$$\underline{E}''_{d|0} = \underline{E}''_{d0} = \underline{U}_{d0} + \underline{I}_{q0} j x_q'', \quad (5.30)$$

где \underline{U}_{d0} , \underline{U}_{q0} , \underline{I}_{d0} , \underline{I}_{q0} – составляющие напряжения и тока предшествующего режима.

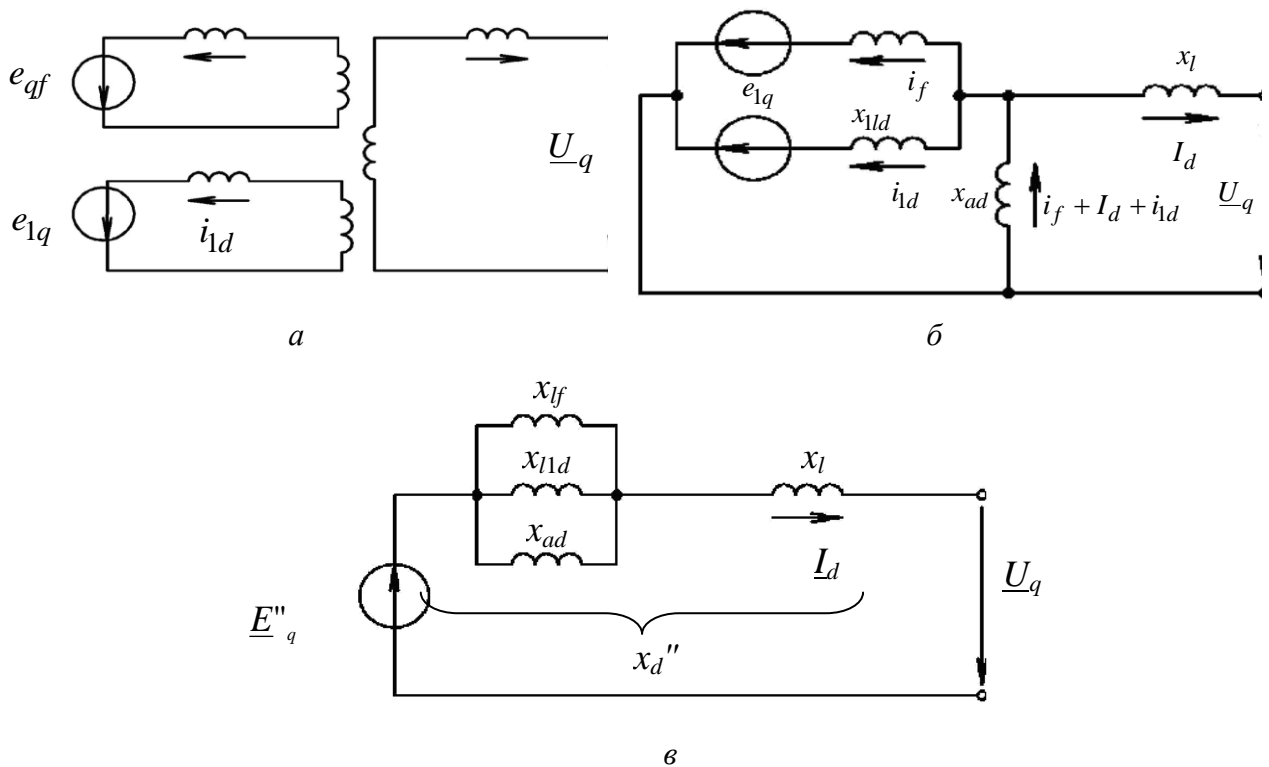


Рис. 5.8. К определению сверхпереходной реактивности в продольной оси:
 а – исходная схема; б – схема замещения; в – эквивалентная схема замещения

Таким образом, в начальный момент внезапного нарушения режима машину с демпферными обмотками полностью характеризуют реактивности x_d'' и x_q'' и ЭДС E_{q0}'' и E_{d0}'' .

Приставка «сверх» подчеркивает, что данные параметры и величины учитывают влияние демпферных обмоток (или эквивалентных им контуров).

Сопротивления x_d'' и x_q'' приводятся в паспортных данных машины.

В продольной оси ротора имеем три магнитосвязанные обмотки (см. [рис. 5.8, а](#)). Эти обмотки могут быть представлены эквивалентной схемой замещения, как для трехобмоточного трансформатора ([рис. 5.8, б](#)).

Здесь $\overset{\circ}{E}_{qf}$ и $\overset{\circ}{E}_{q1d}$ – приведенные к статорным цепям ЭДС, которые отвечают результирующим потокоцеплениям соответственно обмотки возбуждения и продольной демпферной обмотки. Упрощение этой схемы приводит к E_q'' и x_d'' ([рис. 5.8, в](#)).

В поперечной оси ротора схема замещения машины имеет тот же вид, что и для двухобмоточного трансформатора [рис. 5.9](#).

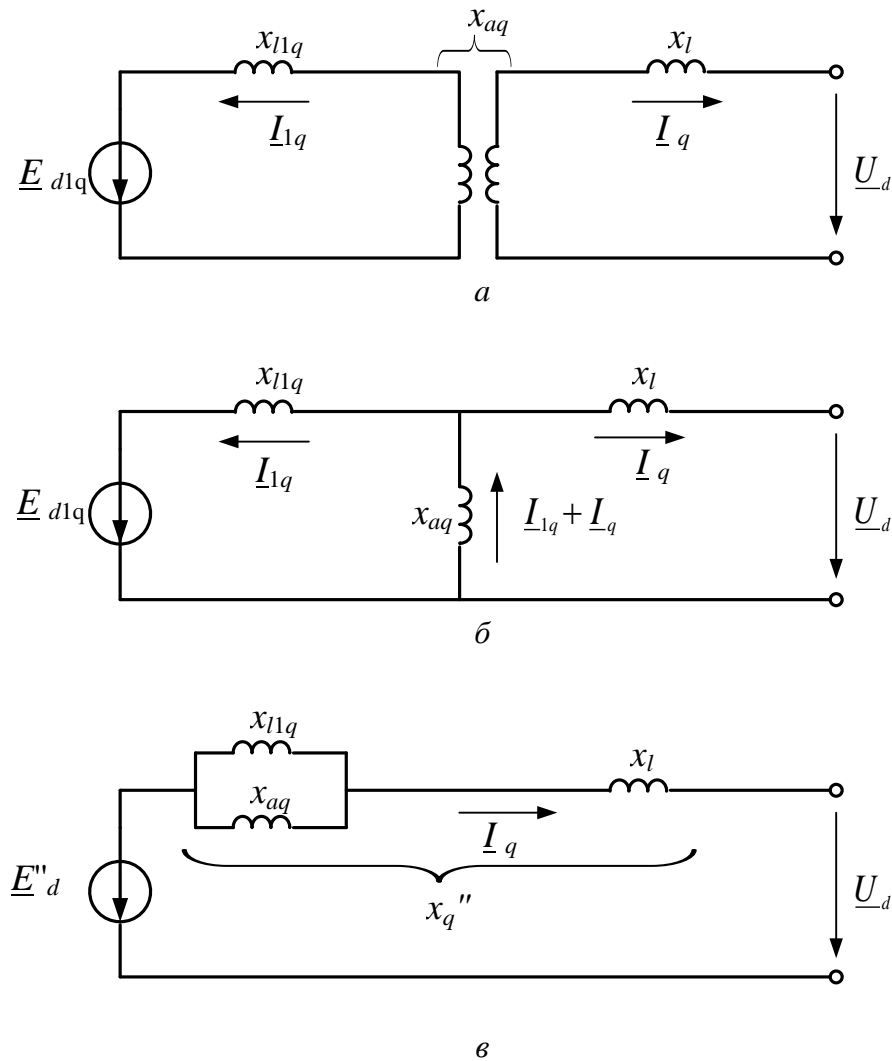


Рис. 5.9. К определению сверхпереходной реактивности в поперечной оси:
 а – исходная схема; б и в – схемы замещения

После упрощения она дает E''_d и x''_q (рис. 5.9, в).

При отсутствии демпферных контуров, т. е. при $x_{l1d} = x_{l1q} = \infty$, полученные выражения для x''_d и x''_q и схемы замещения переходят в соответствующие для x'_d схемы.

При чисто индуктивной цепи статора продольная и поперечная составляющие значения периодической слагающей тока возникшего переходного процесса или так называемого начального сверхпереходного тока будут:

$$I''_{d|0} = \frac{E''_{q0}}{x''_d + x_{\text{ВН}}}, \quad (5.31)$$

$$I''_{q|0} = \frac{E''_{d0}}{x''_q + x_{\text{ВН}}} \quad (5.32)$$

и его полная величина

$$I''_{|0|} = \sqrt{I''_{d|0|}{}^2 + I''_{q|0|}{}^2}. \quad (5.33)$$

Даже в чисто индуктивной цепи благодаря $x''_q \neq x''_d$ угол между полным током $I''_{|0|}$ и полной ЭДС E''_0 в общем случае не равен 90° .

5.4. Сравнение реактивностей синхронной машины

Из полученных выражений и схем замещения для синхронной машины видно, что сверхпереходная реактивность всегда меньше переходной, а последняя меньше синхронной реактивности. Поясним это чисто физическими соображениями (рис. 5.10).

В стационарном режиме создаваемый ток статора магнитный поток частично замыкается по путям рассеяния статорной обмотки, а основная его часть, пройдя воздушный зазор, свободно замыкается через полюсы и массив ротора (рис. 5.10, а). Поскольку сопротивление для магнитного потока в данных условиях относительно мало, то индуктивность, представляющая в сущности величину магнитного потока на единицу намагничивающей силы, получается большой. В продольной оси ротора она определяет синхронную реактивность x_d .

При внезапном изменении магнитного потока статора в обмотке возбуждения наводится ток, который создает магнитный поток, направленный навстречу потоку статора, т. е. последний встречает большее сопротивление и известная его часть вытесняется на пути рассеяния обмотки возбуждения. Та же намагничивающая сила статора в этих условиях создает меньший магнитный поток, что и обуславливает меньшую величину переходной реактивности x'_d по сравнению с реактивностью x_d (рис. 5.10, б).

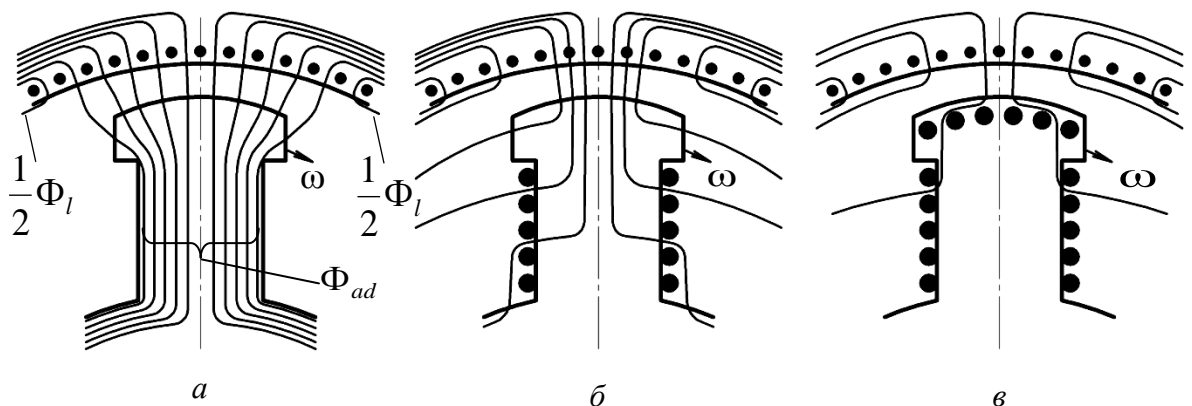


Рис. 5.10. Магнитные потоки в продольной оси ротора, определяющие синхронную реактивность (а), переходную реактивность (б) и сверхпереходную реактивность (в)

При наличии демпферной обмотки в продольной оси ротора вытеснение внезапно изменившегося магнитного потока статора получается более

интенсивным, поскольку в этом участвуют совместно обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка. Сопротивление потоку статора в этом случае еще больше возрастает и величина этого потока при той же намагничивающей силе становится меньше, чем и объясняется меньшее значение сверхпереходной реактивности x_d'' по сравнению с x_d' (рис. 5.10, в).

Чем больше замкнутых контуров на роторе, тем меньшая часть магнитного потока статора в переходном процессе может проникнуть в ротор. Очевидно, в пределе, когда магнитный поток статора совсем не проникает в ротор, реактивность статора определяется только его потоком рассеяния и величина этой реактивности x_l является наименьшей возможной.

Аналогично можно объяснить различие в реактивностях машины по поперечной оси ротора.

Следует отметить, что в машинах без специальных демпферных контуров все же проявляется естественное демпфирование роторов (массив полюсов, клинья пазов и т. п.). Последнее приближенно учитывается снижением реактивности x_d'' , для таких машин принимают $x_d'' = (0,75 - 0,9)x_d'$.

5.5. Допущения, принимаемые при выводе уравнений электромагнитного переходного процесса

При выводе уравнений и исследованиях будем принимать следующие допущения:

1. Магнитная система машины не насыщена, в силу чего индуктивности не зависят от намагничивающих сил (н. с.) или токов. Величины самих индуктивностей при этом определяются для некоторого значения магнитной проницаемости стали магнитопровода.
2. Рассматривать будем только основные, первые гармонические кривые распределения н. с. и индукции в воздушном зазоре по расточке статора. Вследствие чего наведенные в статоре ЭДС выражаются синусоидами основной частоты.
3. Принимаем, что в магнитной системе отсутствуют какие-либо потери.
4. Фазные обмотки статора полностью симметричны. Ротор же симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.
5. Как в продольной, так и в поперечной осях демпферные контуры заменены одной эквивалентной демпферной обмоткой. Иногда для турбогенератора требуется для более точного анализа учет нескольких демпферных контуров в каждой оси ротора.
6. Скорость вращения ротора машины в течение рассматриваемого переходного процесса постоянна и равна синхронной.

Анализ переходного процесса даже такой идеализированной машины сопряжен со значительными трудностями. Чтобы преодолеть их в дальнейшем, будем прибегать к некоторым упрощениям.

5.6. Исходные уравнения

Принципиальная схема явнополюсной синхронной машины имеет вид [рис. 5.11](#).

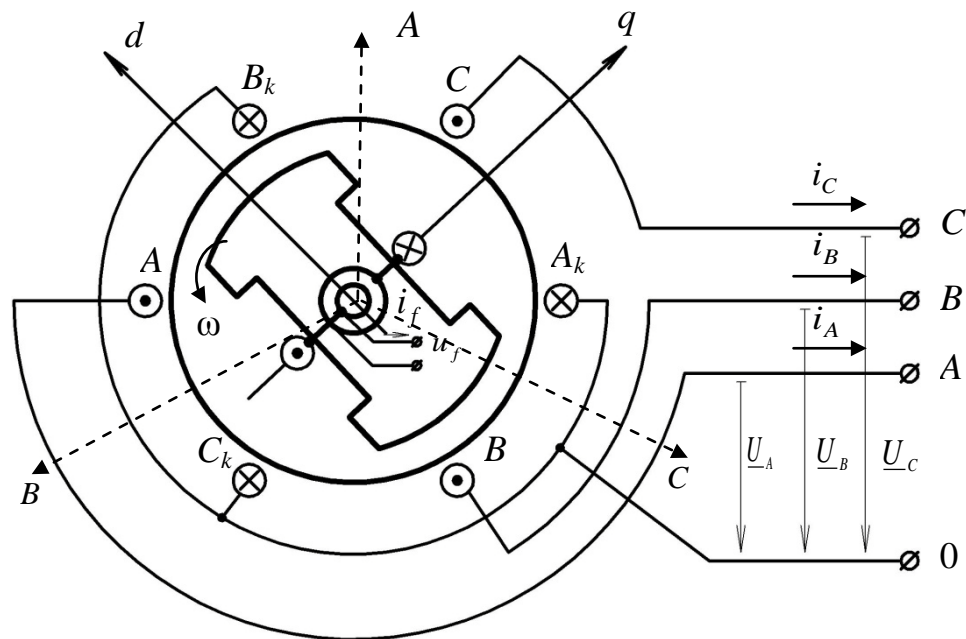


Рис. 5.11. Принципиальная схема явнополюсной синхронной машины

Положительные направления токов и напряжений в обмотках статора и ротора показаны на [рис. 5.11](#) стрелками. Когда ток в обмотке статора или ротора положителен, создаваемый им магнитный поток также считается положительным.

Электродвижущая сила, наводимая в обмотках каждой фазы статора генератора, определяется скоростью изменения потокосцепления этой обмотки во времени, т. е.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Считая, что обмотка имеет активное сопротивление r , можно записать следующее уравнение:

$$e = U + ir,$$

где U – напряжение на выводах генератора,
или

$$U = -\frac{d\Psi}{dt} - ir.$$

Это уравнение справедливо для всех трех фаз генератора:

$$U_k = -\frac{d\psi_k}{dt} - i_k r \quad (k = A, B, C).$$

Дифференциальное уравнение ЭДС и падений напряжения в обмотке ротора

$$U_f = \frac{d\psi_f}{dt} + i_f r_f,$$

где r и r_f – активные сопротивления каждой фазы и цепи возбуждения;

ψ_k и ψ_f – результирующие потокоцепления каждой фазы статора и обмотки возбуждения.

Потокоцепления, при принятых допущениях, представляют собой линейные зависимости от тока данного контура и токов магнитосвязанных с ним других контуров. Коэффициентами пропорциональности при этом будут индуктивность L рассматриваемого контура и его взаимоиндуктивность M с другими контурами.

Потокоцепления тогда примут вид:

$$\begin{cases} \psi_A = L_A \cdot i_A + M_{AB} \cdot i_B + M_{AC} \cdot i_C + M_{Af} \cdot i_f, \\ \psi_B = M_{BA} \cdot i_A + L_B \cdot i_B + M_{BC} \cdot i_C + M_{Bf} \cdot i_f, \\ \psi_C = M_{CA} \cdot i_A + M_{CB} \cdot i_B + L_C \cdot i_C + M_{Cf} \cdot i_f, \\ \psi_f = M_{fA} \cdot i_A + M_{fB} \cdot i_B + M_{fC} \cdot i_C + L_f \cdot i_f. \end{cases} \quad (5.34)$$

Число различных значений M в действительности в два раза меньше, так как по принципу взаимности

$$M_{AB} = M_{BA}, \quad M_{Bf} = M_{fB} \quad \text{и т. д.}$$

Если бы все L и M оставались неизменными, то система (5.34) состояла бы из линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и решение ее не представляло бы принципиальных трудностей. Однако

во вращающейся машине это не имеет места. Только индуктивность L_f можно считать неизменной. Все же остальные L и M зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени.

Таким образом, коэффициенты уравнений системы (5.34) являются переменными, что резко усложняет решение этой системы.

Выясним, как изменяются индуктивности обмоток синхронной машины.

5.7. Индуктивности обмоток синхронной машины

Фиксировать положение ротора будем углом $\gamma = f(t)$ между магнитной осью фазы A и продольной осью ротора d (рис. 5.12).

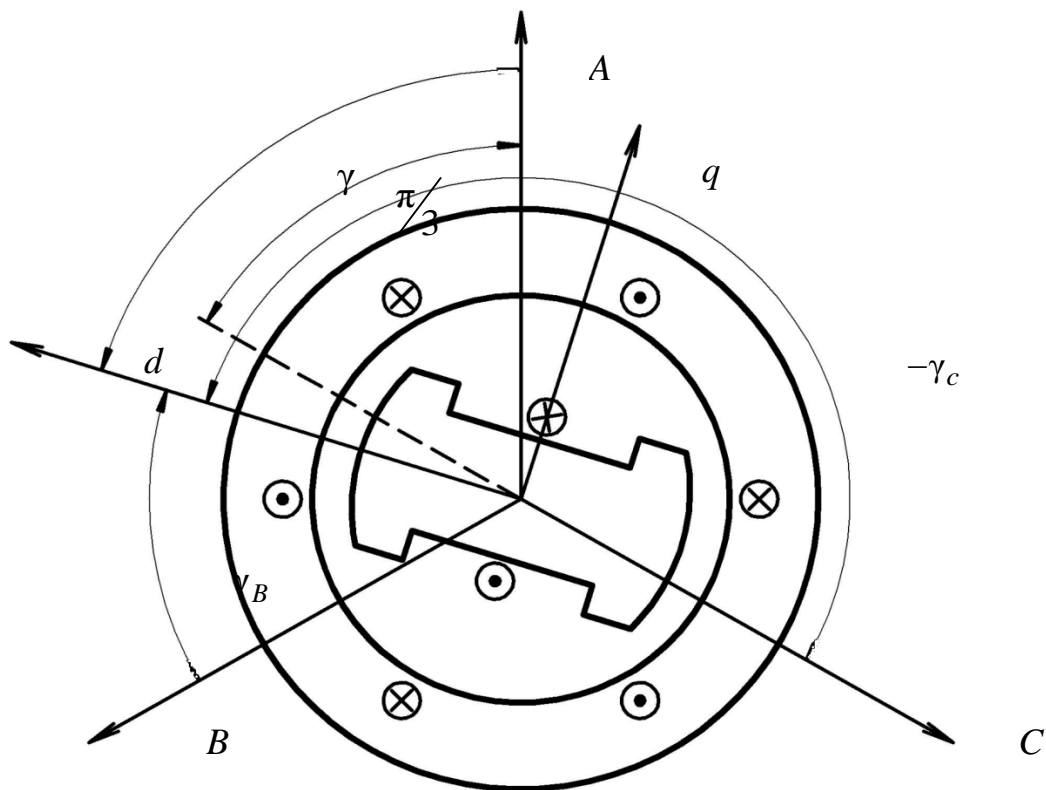


Рис. 5.12. К определению пространственного положения ротора

Синусоидальность наводимых в статоре ЭДС холостого хода указывает на закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой фазной обмоткой статора. Очевидно, он выражается синусоидальной функцией с периодом 2π (для двухполюсной машины это соответствует одному обороту ротора). Максимум синусоидальной функции M_d наступает при совпадении магнитных осей этих обмоток. Так, для фазы A имеем:

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cdot \cos \gamma.$$

Изменения индуктивностей фазных обмоток статора и взаимных индуктивностей между этими обмотками обусловлены вращением ротора, поскольку при этом непрерывно меняется сопротивление магнитным потокам, которые определяют данные индуктивности. Изменение магнитных потоков происходит гармонически с периодом π , т. е. в два раза меньшим, чем период изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и фазной обмоткой, потому что через каждые π цикл повторяется. Кроме того, рассматриваемые индуктивности будут четной функцией γ , т. е. будут одинаковы как для положительного, так и для отрицательного углов.

В большинстве практических расчетов ограничиваются приближенными выражениями для этих индуктивностей (пренебрегают всеми четными высшими гармониками). Тогда индуктивность обмотки фазы A определяется как

$$L_A = l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma \quad (5.35)$$

и взаимная индуктивность между обмотками фаз A и B

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cdot \cos 2\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right), \quad (5.36)$$

где l_0 и m_0 – постоянные составляющие соответствующих индуктивностей; l_2 и m_2 – амплитуды вторых гармоник тех же индуктивностей.

Выражения (5.35) и (5.36) легко распространить на другие фазы, для чего в качестве аргумента в них нужно ввести соответствующие значения угла.

Коэффициенты в (5.35) и (5.36) можно выразить через индуктивности, которыми характеризуется синхронная машина:

$$l_0 = \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0);$$

$$l_2 = m_2 = \frac{1}{3}(L_d - L_q);$$

$$m_0 = \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right),$$

где L_d – индуктивность СМ по продольной оси;

L_q – индуктивность СМ по поперечной оси;

L_0 – индуктивность СМ нулевой последовательности.

В системе относительных единиц индуктивности и индуктивные сопротивления численно одинаковы, т. е. $L_* = x_*$.

Выражения индуктивностей фазных обмоток статора имеют вид:

$$L_A = l_0 + l_2 \cdot \cos 2\gamma_{jA},$$

$$L_B = l_0 + l_2 \cdot \cos(2\gamma - 120^\circ)_{jB},$$

$$L_C = l_0 + l_2 \cdot \cos(2\gamma + 120^\circ)_{jC}.$$

Отметим, что по физической сущности $L_A = 0$, $L_B > 0$ и $L_C > 0$ и индуктивности максимальны при

$$\gamma_A = \gamma_B = \gamma_C = 0,$$

а минимальны при

$$\gamma_A = \gamma_B = \gamma_C = \frac{\pi}{2}.$$

Поэтому $l > 0$, $l_2 > 0$.

Итак, индуктивности, определяющие потокосцепление обмоток, есть периодическая функция угла γ . При вращении ротора за время dt угол γ изменяется на $d\gamma = \omega dt$, где ω – мгновенная частота вращения ротора, измеряемая в электрических радианах в секунду.

К произвольному моменту времени t угол

$$\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0,$$

где γ_0 – значение угла γ при $t = 0$.

Если частота вращения ротора постоянна, то

$$\gamma = \omega t + \gamma_0.$$

Таким образом, даже при постоянной скорости вращения ротора индуктивности, зависящие от угла γ , будут являться гармоническими функциями времени.

Дифференциальные уравнения напряжений обмоток машины содержат ЭДС, определяемые скоростью изменения потокосцеплений не только вследствие изменения токов обмоток, но и за счет индуктивностей, являющихся функциями времени; дифференциальные уравнения напряжений становятся уравнениями с переменными коэффициентами. Решение таких уравнений весьма затруднено, соответственно усложняется и анализ переходных процессов. Поэтому возникает задача такого преобразования дифференциальных

уравнений напряжений, которое позволило бы существенно упростить их, и, в частности, получить уравнения с постоянными коэффициентами.

Эта задача решается с помощью так называемых линейных преобразований.

5.8. Линейные преобразования

Линейные преобразования уравнений состоят в том, что исходные переменные в уравнениях заменяются новыми переменными, линейно связанными с исходными; при этом число вводимых в рассмотрение новых переменных равно числу заменяемых переменных.

Так, вместо трех переменных – фазных токов статора i_A, i_B, i_C – можно оперировать новыми токами i_x, i_y, i_z , связанными с исходными токами линейными зависимостями:

$$\begin{cases} i_x = \varphi_{XA} \cdot i_A + \varphi_{XB} \cdot i_B + \varphi_{XC} \cdot i_C, \\ i_y = \varphi_{YA} \cdot i_A + \varphi_{YB} \cdot i_B + \varphi_{YC} \cdot i_C, \\ i_z = \varphi_{ZA} \cdot i_A + \varphi_{ZB} \cdot i_B + \varphi_{ZC} \cdot i_C. \end{cases} \quad (5.37)$$

Коэффициенты φ называются коэффициентами линейного преобразования.

Для того чтобы между исходными и новыми переменными (в нашем случае токами i_A, i_B, i_C – с одной стороны и токами i_x, i_y, i_z – с другой) было однозначное соответствие, определитель, состоящий из коэффициентов линейного преобразования, не должен быть равным нулю. Последнее требование выражаем соотношением для определителя системы (5.37):

$$\begin{vmatrix} \varphi_{XA} & \varphi_{XB} & \varphi_{XC} \\ \varphi_{YA} & \varphi_{YB} & \varphi_{YC} \\ \varphi_{ZA} & \varphi_{ZB} & \varphi_{ZC} \end{vmatrix} \neq 0.$$

Следует подчеркнуть, что коэффициенты линейного преобразования могут являться функциями времени, лишь бы определитель системы (5.37) в любой момент времени не равнялся нулю.

Продолжив рассмотрение примера линейного преобразования трехфазных токов машины i_A, i_B, i_C , заменим их новыми токами i_x, i_y, i_z . Отметим, что один из новых токов, например i_z , удобно выбрать в виде $1/3(i_A + i_B + i_C)$, т. е. положить в (5.37) $\varphi_{ZA} = \varphi_{ZB} = \varphi_{ZC} = 1/3$.

Дадим этому току обозначение i_0 :

$$\frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C) = i_0,$$

и назовем нулевой составляющей тока.

Удобство такого выбора заключается в том, что часто $i_0 = 0$ (для трехфазных обмоток, соединенных в звезду с изолированной нейтралью). Но даже если $i_0 \neq 0$, то этот ток не оказывает никакого влияния на движение ротора машины в переходном процессе. Поэтому в задачах, связанных с исследованием устойчивости работы машины, с определением электромагнитного момента машины можно не рассматривать нулевую составляющую тока. Вместе с тем его необходимо учитывать при определении фазных токов машины.

Дадим линейному преобразованию геометрическую интерпретацию. Если фазные токи являются синусоидальными функциями времени, то на диаграмме они могут быть представлены тремя векторами, вращающимися вокруг некоторой точки (полюса) с частотой вращения, равной угловой частоте тока. Проекции векторов на линию времени дают значение мгновенных токов ([рис. 5.13](#)).

Можно на диаграмме оставить векторы неподвижными, а вращать линию времени, и результат, очевидно, будет тем же.

Диаграмму можно представить и иначе.

Рассмотрим частный случай, когда токи по фазам симметричны. Возьмем вместо трех симметричных векторов три фазные оси времени (A , B , C), расположенные симметрично, из центра проведем вектор \bar{I} , который будет вращаться с такой же частотой вращения, с какой вращалась линия времени. Если величина вектора \bar{I} равна амплитуде фазных токов, то его проекции на три оси также дадут значение мгновенных токов.

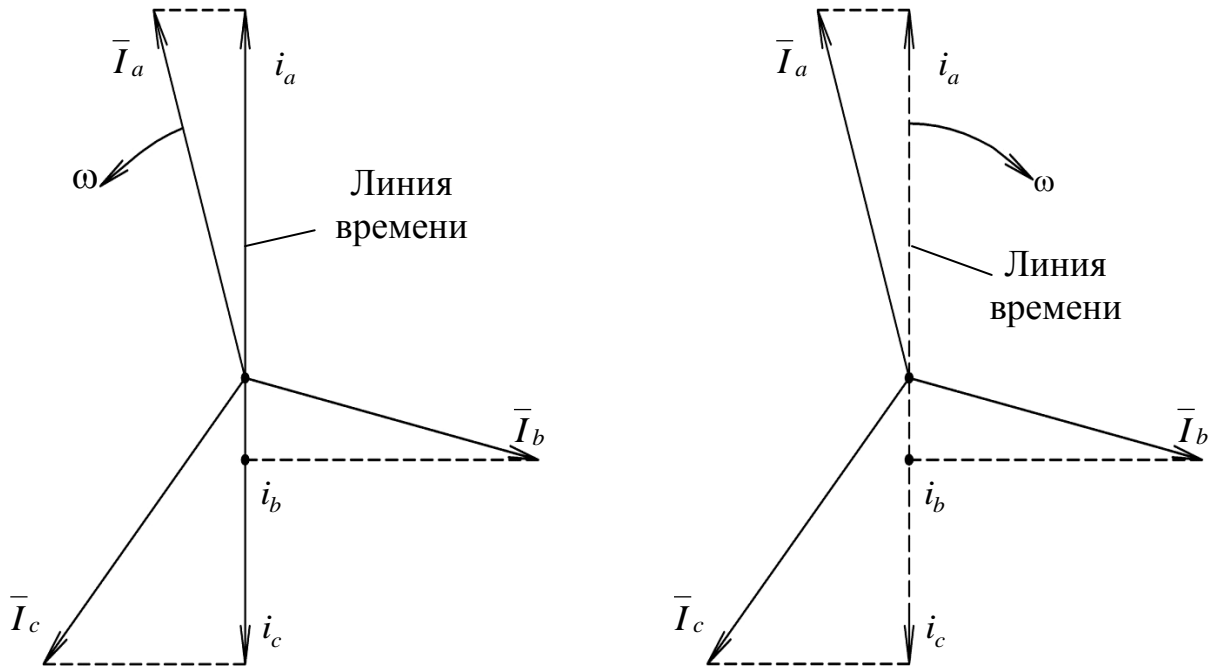


Рис. 5.13. Определение мгновенных значений фазных токов

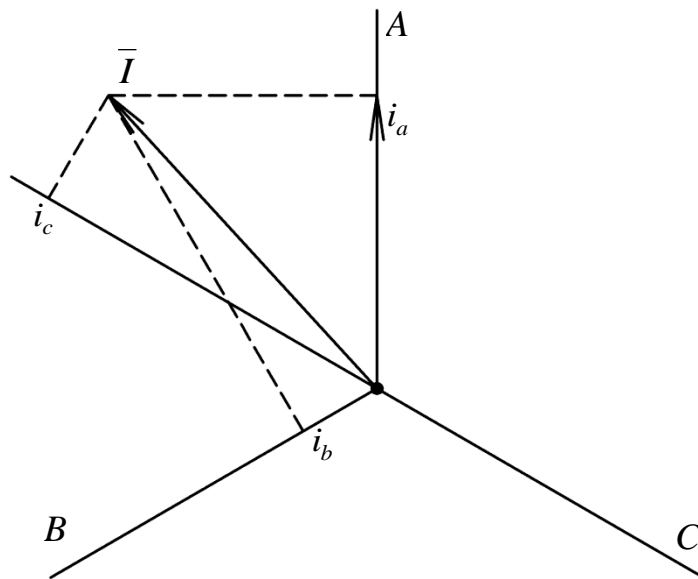


Рис. 5.14. Определение мгновенных значений фазных токов с помощью изображающего вектора

Таким образом, если вектор \bar{I} имеет неизменную величину и вращается с постоянной частотой, то с его помощью изображаются симметричные синусоидальные токи. Конец вектора \bar{I} описывает при этом окружность.

Однако с помощью вектора \bar{I} можно изобразить любые три тока i_A, i_B, i_C , как угодно изменяющиеся во времени, при одном условии, что

$$i_A + i_B + i_C = 0. \tag{5.38}$$

Это условие, накладываемое на токи, вытекает из принятого способа изображения токов как проекций некоторого вектора на три оси, сдвинутых на 120° , т. е. сумма проекций как угодно изменяющегося вектора на такие оси всегда равна нулю:

$$I \cos \alpha + I \cos(\alpha - 120^\circ) + I \cos(\alpha + 120^\circ) = 0.$$

Следовательно, каким бы образом ни изменялись токи во времени i_A, i_B, i_C , удовлетворяющие условию (5.38), для каждого момента времени проекции вектора на осях известны и поэтому вектор однозначно определен по величине и положению относительно осей. Однако конец вектора в этом случае будет описывать сложную кривую (например, эллипс).

Этот вектор называется изображающим вектором.

С помощью проекций вектора на оси можно представить значение не только мгновенных токов, но и мгновенных потокосцеплений и напряжений.

Отметим, если в частном случае изображающий вектор имеет постоянный модуль, то амплитуда переменных, которые он определяет, равна модулю этого вектора. Это значение переменная приобретает в тот момент, когда изображающий вектор совпадает с осью, на которой откладывается рассматриваемая величина.

5.9. Замена переменных (преобразование трехфазной машины в двухфазную)

В предыдущем параграфе были выбраны токи i_x, i_y, i_0 в качестве новых переменных вместо действительных фазных токов.

Условимся эти новые токи представлять на диаграмме с помощью изображающего вектора \bar{I} . Поскольку этот способ справедлив при условии $i_A + i_B + i_C = 3i_0 = 0$, то из трех новых токов i_x, i_y, i_0 только два i_x, i_y могут графически изображаться на диаграмме, а ток i_0 изображен быть не может. Но если нужно изобразить только два тока, то для этого требуется две оси x, y . Естественно выбрать их нормальными друг другу. В общем случае эти оси на диаграмме вращаются. Пусть углы, составляемые изображающим вектором тока \bar{I} и вращающейся осью x с неподвижной осью A , равны соответственно δ и δ_k . Можно убедиться, что проекции изображающего вектора на оси x, y оказываются линейно связанными с проекциями того же вектора на оси A, B, C .

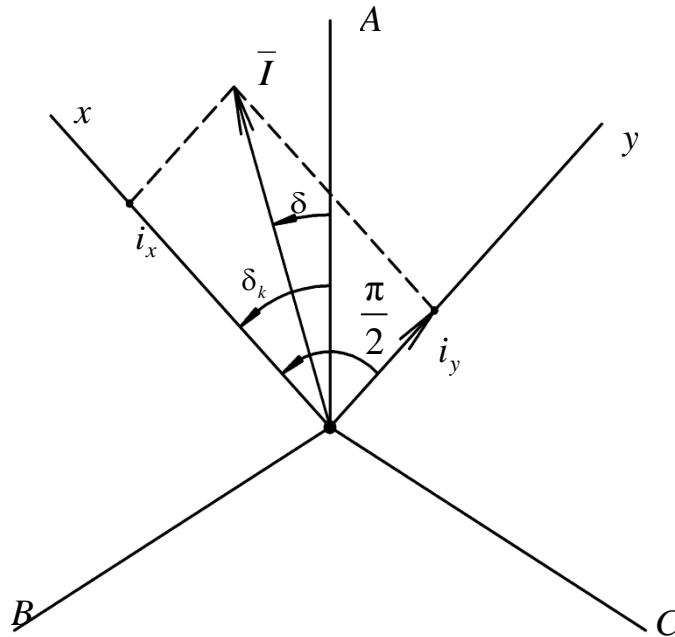


Рис. 5.15. Определение мгновенных токов в осях x и y

Предполагая сначала, что $i_A + i_B + i_C = 0$, получаем исходные токи как проекции \bar{I} на оси A, B, C в виде [рис. 5.15](#).

$$\begin{cases} i_A = I \cos \delta, \\ i_B = I \cos(\delta - 120^\circ), \\ i_C = I \cos(\delta + 120^\circ). \end{cases} \quad (5.39)$$

Аналогично ток i_x, i_y :

$$\begin{cases} i_x = I \cos(\delta_k - \delta), \\ i_y = I \sin(\delta - \delta_k), \end{cases} \quad (5.40)$$

где δ_k – координатный угол.

Выразим теперь в [\(5.40\)](#) токи i_x, i_y через токи i_A, i_B, i_C . При этом нужно исключить δ , так как частота вращения вектора \bar{I} неизвестна до решения уравнений машины. Используем тригонометрические соотношения:

$$\begin{aligned} \cos(\delta_k - \delta) = \frac{2}{3} & \left[\cos \delta_k \cos \delta + \cos(\delta_k - 120^\circ) \cos(\delta - 120^\circ) + \right. \\ & \left. + \cos(\delta_k + 120^\circ) \cos(\delta + 120^\circ) \right]; \end{aligned}$$

$$\sin(\delta_k - \delta) = \frac{2}{3} \left[\sin \delta_k \cos \delta + \sin(\delta_k - 120^\circ) \cos(\delta - 120^\circ) + \sin(\delta_k + 120^\circ) \cos(\delta + 120^\circ) \right].$$

Перепишем выражения (5.40) с помощью (5.39) в виде

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{2}{3} \left[i_A \cos \delta_k + i_B \cos(\delta_k - 120^\circ) + i_C \cos(\delta_k + 120^\circ) \right], \\ i_y &= \frac{2}{3} \left[i_A \sin \delta_k + i_B \sin(\delta_k - 120^\circ) + i_C \sin(\delta_k + 120^\circ) \right]. \end{aligned} \quad (5.41)$$

Выражения (5.41) получены в предположении, что $i_0 = 0$. Однако не трудно убедиться, что они остаются в силе, когда $i_0 \neq 0$. В этом случае можно рассмотреть вместо токов i_A, i_B, i_C токи

$$i'_A = i_A - i_0; \quad i'_B = i_B - i_0; \quad i'_C = i_C - i_0. \quad (5.42)$$

Поскольку $i'_A + i'_B + i'_C = 0$, то (5.41) справедливо для этих токов:

$$\begin{cases} i_x = \frac{2}{3} \left[i'_A \cos \delta_k + i'_B \cos(\delta_k - 120^\circ) + i'_C \cos(\delta_k + 120^\circ) \right]; \\ i_y = \frac{2}{3} \left[i'_A \sin \delta_k + i'_B \sin(\delta_k - 120^\circ) + i'_C \sin(\delta_k + 120^\circ) \right]. \end{cases} \quad (5.43)$$

Подставив в (5.43) токи из (5.42), можно видеть, что для токов i_x, i_y получаются выражения вида (5.41), т. е. они справедливы и при $i_0 \neq 0$.

Итак, исходные токи $i_A = i'_A + i_0; i_B = i'_B + i_0; i_C = i'_C + i_0$ могут рассматриваться как совокупность тока i_0 и токов i'_A, i'_B, i'_C , являющихся проекциями изображающего вектора \bar{I} на оси A, B, C . Новая система токов есть совокупность токов i_0 и токов i_x, i_y , являющихся проекциями того же изображающего вектора тока на новые оси x, y , вращающихся в общем случае с частотой ω_k . Поэтому линейное преобразование – это по существу изменение системы координат, в которых производился отсчет величин.

Тогда переход от трех исходных осей (A, B, C) к двум (X, Y) означает замену трехфазной машины двухфазной, в которой магнитные оси функций обмоток сдвинуты на 90° .

Формулы линейного преобразования Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C и напряжений U_A, U_B, U_C будут точно такими же, как и для i_A, i_B, i_C .

В современной теории электрических машин используется ряд координатных осей, выбор которых позволяет упростить уравнения, а в частных случаях исключить в них периодические коэффициенты.

С этой целью оси координат рекомендуется располагать неподвижно относительно того элемента машины (статора или ротора), где имеется магнитная или электрическая симметрия. Наибольшее распространение получили следующие системы осей x, y – [рис. 5.16](#).

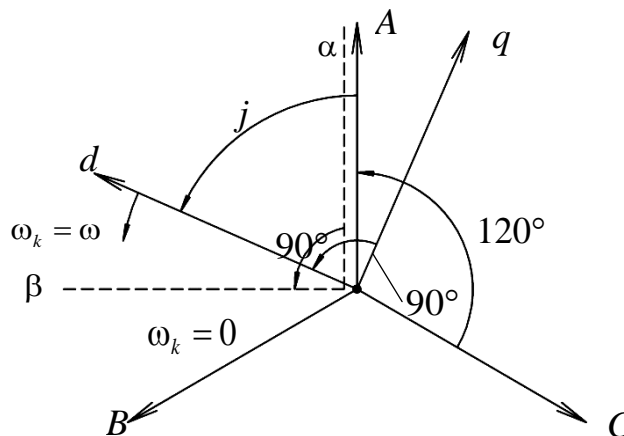


Рис. 5.16. Преобразование координат d, q и α и β

При анализе несимметричных режимов синхронных машин удобно использовать неподвижные в пространстве ($\omega_k = 0$) оси x, y . Такие оси называются осями α, β . Ось α совмещена с осью A исходной системы координат A, B, C . Соотношения между исходными и новыми переменными могут быть получены из выражений (5.41), в которых нужно полагать $\delta_k = 0^\circ$. Они имеют вид

$$\begin{cases} i_\sigma = \frac{2}{3} [i_A - 0,5(i_B + i_C)] = i_A - i_0, \\ i_\alpha = \frac{(i_B - i_C)}{\sqrt{3}}, \\ i_0 = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C). \end{cases} \quad (5.44)$$

Токи α и β составляют токи статора.

Обратные соотношения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} i_A = i_0 + i_\alpha, \\ i_B = i_0 - 0,5(i_\alpha - \sqrt{3}i_\beta) = i_0 + i_\alpha \cos 120^\circ + i_\beta \sin 120^\circ, \\ i_C = i_0 - 0,5(i_\alpha + \sqrt{3}i_\beta) = i_0 + i_\alpha \cos 120^\circ + i_\beta \sin 120^\circ. \end{cases} \quad (5.45)$$

Если $i_0 = 0$, то $i_\alpha = i_A$.

Симметричные переходные процессы в синхронной машине целесообразно исследовать в системе координат, вращающейся вместе с ротором (ось x совмещают с осью полюса). Это так называемая система осей d, q . Удобство системы координат, жестко связанной с ротором, для явнополюсной машины заключается в том, что для наблюдателя, вращающегося вместе с этими осями, машина оказывается симметричной в магнитном отношении независимо от положения ротора. Поэтому в системе координат d, q выражения для токов не содержат переменных индуктивностей, а дифференциальные уравнения напряжений при переменной частоте вращения машины имеют постоянные коэффициенты, что существенно облегчает исследования.

Преобразование к осям d, q является практически единственным, приводящим дифференциальные уравнения СМ к периодическим уравнениям с постоянными коэффициентами.

Для определения соотношений переменных в осях A, B, C и d, q в (5.41) нужно положить $\delta_k = \gamma$, где γ – угол между осью полюса d и осью A .

Тогда

$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3} [i'_a \cos \delta_k + i'_b \cos(\delta_k - 120^\circ) + i'_c \cos(\delta_k + 120^\circ)], \\ i_q = \frac{2}{3} [i'_a \sin \delta_k + i'_b \sin(\delta_k - 120^\circ) + i'_c \sin(\delta_k + 120^\circ)], \\ i_0 = \frac{1}{3} [i_a + i_b + i_c], \end{cases}$$

где i_d и i_q – продольный и поперечный токи статора.

Обратные соотношения имеют вид:

$$\begin{cases} i_a = i_0 + i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma, \\ i_b = i_0 + i_d \cos(\gamma - 120^\circ) + i_q \sin(\gamma - 120^\circ), \\ i_c = i_0 + i_d \cos(\gamma + 120^\circ) + i_q \sin(\gamma + 120^\circ). \end{cases}$$

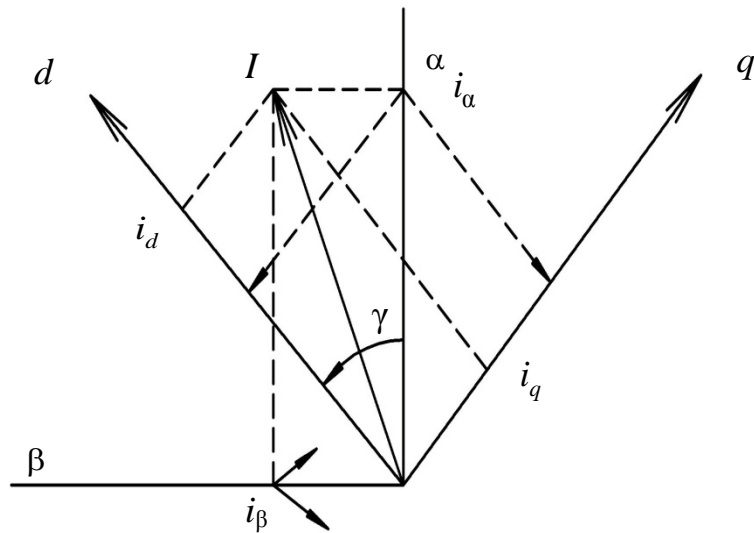


Рис. 5.17. Связь переменных в осях d, q и α, β

Рассмотрим связь переменных в осях α, β и d, q .

Выразим i_d и i_q через i_α, i_β .

Из [рис. 5.17](#) следует, что

$$i_d = i_\alpha \cos \gamma + i_\beta \sin \gamma ,$$

$$i_q = i_\alpha \sin \gamma - i_\beta \cos \gamma .$$

Обратные соотношения имеют вид:

$$i_\alpha = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma ,$$

$$i_\beta = i_d \sin \gamma - i_q \cos \gamma .$$

5.10. Уравнения Горева – Парка

Произведем преобразования дифференциальных уравнений, определяющих режим статора,

$$U_k = -\frac{d\Psi_k}{dt} - r i_k \quad (k = A, B, C) \quad (5.46)$$

путем замены разных переменных их составляющих в координатах $d, q, 0$.

Ток, напряжение и потокосцепление для фазы A через новые переменные будут иметь вид:

$$\begin{aligned} i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0; \\ U_A &= U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma + U_0; \\ \Psi_A &= \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0. \end{aligned} \quad (5.47)$$

Подставляем выражения (5.47) в уравнения (5.46) и, имея в виду при дифференцировании, что Ψ_d , Ψ_q и γ являются функциями времени t , получаем:

$$\begin{aligned} U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma + U_0 + ri_0 + ri_d \cos \gamma + ri_q \sin \gamma + \\ + \frac{d}{dt} (\Psi_0 + \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma) = 0. \end{aligned}$$

Откуда следует при записи в операторной форме:

$$\begin{aligned} U_0 + U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma + ri_0 + ri_d \cos \gamma + ri_q \sin \gamma + \\ + p\Psi_0 + p\Psi_d \cos \gamma - p\gamma\Psi_d \sin \gamma + p\Psi_q \sin \gamma + p\gamma\Psi_q \cos \gamma = 0, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} U_0 + p\Psi_0 + ri_0 + (U_d + p\Psi_d + p\gamma\Psi_q + ri_d) \cos \gamma + \\ + (U_q + p\Psi_q - p\gamma\Psi_d + ri_q) \sin \gamma = 0. \end{aligned} \quad (5.48)$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение следующего типа:

$$A + B \cos \gamma + C \sin \gamma = 0,$$

которое в общем случае может удовлетвориться только при условии

$$A = B = C = 0.$$

В этом случае из (5.48) следует, что

$$U_0 = -p\Psi_0 - ri_0, \quad (5.49)$$

$$U_d = -p\Psi_d - \Psi_q p\gamma - ri_d, \quad (5.50)$$

$$U_q = -p\Psi_q + \Psi_d p\gamma - ri_q. \quad (5.51)$$

Уравнения (5.49)–(5.51) называют уравнениями Горева – Парка. Результат преобразований не изменится, если вместо фазы A взять иную фазу.

В уравнениях (5.49)–(5.51) при выражении величин в относительных единицах потокосцепления равны:

$$\Psi_d = M_d i_f + L_d i_d = x_{ad} i_f + x_d i_d,$$

$$\Psi_q = L_q i_q = x_q i_q,$$

$$\Psi_0 = L_0 i_0 = x_0 i_0,$$

где L_0 и x_0 – индуктивность и индуктивное сопротивление нулевой последовательности.

В уравнениях (5.50) и (5.51) первые слагаемые представляют ЭДС трансформации, поскольку они вызываются изменением величин соответствующих потокосцеплений, а вторые слагаемые – ЭДС вращения. В стационарном режиме трансформаторные ЭДС отсутствуют.

При вращении ротора угол γ непрерывно изменяется:

$$\gamma = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega) dt + \gamma_0,$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость;

$\Delta\omega$ – угловая скорость ротора относительно синхронно вращающейся оси.

В установившемся режиме $\Delta\omega = 0$ и, следовательно, $p\gamma = \omega_0$ или в относительных единицах $p\gamma = 1$. В этом режиме также $\Psi_d = \text{const}$, $\Psi_q = \text{const}$, $\Psi_0 = \text{const}$, поэтому $p\Psi_0 = p\Psi_d = p\Psi_q = 0$, и уравнение Горева – Парка принимает вид

$$U_0 = -ri_0,$$

$$U_d = -\Psi_q - ri_d, \quad (5.52)$$

$$U_q = \Psi_d - ri_q,$$

или при пренебрежении малым по величине активным сопротивлением статора

$$U_d = -\Psi_q, \quad (5.53)$$

$$U_q = \Psi_d.$$

В переходном режиме, сопровождающемся отклонениями частоты вращения ротора от синхронной, в относительных единицах $p\gamma = 1 + p\delta$, поэтому уравнения (5.50) и (5.51) могут быть переписаны:

$$\begin{aligned} U_d &= -p\Psi_d - (1 + p\delta)\Psi_q - ri_d; \\ U_q &= -p\Psi_q + (1 + p\delta)\Psi_d - ri_q. \end{aligned} \quad (5.54)$$

Эти уравнения показывают, что в переходном процессе в обмотке статора наводятся две дополнительные ЭДС. Одна из них связана с угловой скоростью машины и не зависит от изменения во времени. Другая, напротив, определяется изменением магнитного потока во времени и не зависит от частоты вращения ротора.

Принято говорить, что расчеты, основанные на таком подходе, выполнимы по полным уравнениям Горева – Парка.

При неучете токов, т. е. $p\Psi_d = p\Psi_q = 0$, получим одну из упрощенных форм уравнений Горева – Парка для анализа переходных процессов:

$$\begin{aligned} U_d &= -(1 + p\delta)\Psi_q - ri_d; \\ U_q &= (1 + p\delta)\Psi_d - ri_q \end{aligned} \quad (5.55)$$

или при пренебрежении активным сопротивлением обмотки статора:

$$\begin{aligned} U_d &= -(1 + p\delta)\Psi_q; \\ U_q &= (1 + p\delta)\Psi_d, \end{aligned} \quad (5.56)$$

Ряд расчетов устойчивости выполняется без строгого учета демпферных моментов, которые определяются системой токов в обмотках генератора, являющихся следствием возникновения скольжения ротора относительно вращающегося поля реакции статора, равного $s = -p\delta$.

В синхронных машинах, для которых $s = 0$, моменты отсутствуют. Переходные электромеханические процессы характеризуются качаниями ротора, при которых $s \neq 0$. Однако принимается в ряде случаев допущение $s = 0$. В этом случае следует ещё одна форма упрощенных уравнений Горева – Парка:

$$\begin{aligned} U_d &= -\Psi_q; \\ U_q &= \Psi_d, \end{aligned}$$

но здесь $\Psi_d \neq \text{const}$ и $\Psi_q = \text{var}$.

А уравнение обмотки возбуждения записывается в своей обычной форме.

5.11. Уравнение обмотки возбуждения

При нарушении режима ток возбуждения i_f претерпевает внезапное изменение и его значение не соответствует уже напряжению возбудителя u_{if} , приложенному к обмотке возбуждения генератора. В дальнейшем ток начинает затухать, стремясь к первоначальному своему значению, пропорциональному напряжению возбудителя:

$$i_{fl} = \frac{u_f}{r_f}, \quad (5.57)$$

где r_f – сопротивление обмотки возбуждения генератора.

В связи с затуханием тока возбуждения начинает изменяться и потокосцепление обмотки возбуждения, а следовательно, и ЭДС E_q , ему пропорциональная. Изменение тока i_f во времени происходит по известному закону изменения тока в цепи, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений (уравнение равновесия для обмотки возбуждения):

$$u_f = i_f r_f + \frac{d\Psi_f}{dt}. \quad (5.58)$$

Разделив это уравнение (5.58) на r_f , получим:

$$i_{fl} = i_f + \frac{1}{r_f} \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (5.59)$$

где $i_{fl} = \frac{u_f}{r_f}$ – значение вынужденного тока возбуждения, соответствующего приложенному напряжению возбудителя.

Умножая далее обе части на x_{ad} , имеем:

$$i_{fl} \cdot x_{ad} = i_f \cdot x_{ad} + \frac{x_{ad}}{r_f} \frac{d\Psi_f}{dt}. \quad (5.60)$$

Произведение $i_f \cdot x_{ad}$ представляет собой потокосцепление обмотки статора, создаваемое полным током возбуждения i_f . Электродвижущая сила, наводимая потоком, определяющим это потокосцепление, является не чем иным, как синхронной ЭДС E_q , которую обозначим через E_{ql} .

При неизменном напряжении возбудителя эта ЭДС равна её значению в установившемся режиме, предшествовавшем возмущению, т. е. в этом случае $E_{ql} = E_{q0}$.

Полагая относительные значения ЭДС численно равными потокоцеплениям ($E = \omega \Psi$, а в относительных единицах $\omega = 1$), получаем:

$$\underline{E}_{ql} = \underline{E}_q + \frac{x_{ad}}{r_f} \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (5.61)$$

или

$$\underline{E}_{ql} = \underline{E}_q + \frac{x_{ad}}{r_f} \frac{x_f}{x_f} \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (5.62)$$

но мы знаем, что

$$\dot{A}'_q = \frac{x_{ad}}{x_f} \cdot \Psi_f.$$

Отношение $\frac{x_f}{r_f} = \frac{L_f}{r_f} = T_{d0}$ называют постоянной времени обмотки воз-

буждения при разомкнутой обмотке статора (т. е. при отсутствии магнитного потока реакции статора). Поэтому окончательно можем записать дифференциальное уравнение, характеризующее режим работы обмотки возбуждения в любой момент времени, в виде

$$\underline{E}_{ql} = \underline{E}_q + T_{d0} \frac{d\underline{E}_q}{dt}. \quad (5.63)$$

Это уравнение определяет протекание электромагнитных процессов в синхронной машине без демпферной обмотки в пределах сделанных допущений.

5.12. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины

Полученное выше дифференциальное уравнение (5.63) содержит, по крайней мере, две переменные величины: переходную ЭДС E'_q и синхронную E_q , и для его решения необходимо установить дополнительную связь между этими переменными. Из векторной диаграммы для неявнополюсной

синхронной машины, работающей на шины неизменного напряжения, имеем соотношения:

$$E_q = E'_q + I_d(x_d - x'_d), \quad (5.64)$$

$$E_q = U \cos \delta + I_d x_d = U_q + I_d x_d. \quad (5.65)$$

Из уравнений (5.64) и (5.65) находим ЭДС E'_q :

$$E'_q = \frac{x'_d}{x_d} E_q + \frac{x_d - x'_d}{x_d} U \cos \delta, \quad (5.66)$$

откуда

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{x'_d}{x_d} \frac{dE_q}{dt} - \frac{x_d - x'_d}{x_d} U \sin \delta \frac{d\delta}{dt}. \quad (5.67)$$

Подставляя полученное выражение в (5.63), получаем

$$E_{ql} = E_q + T_{d0} \frac{x'_d}{x_d} \frac{dE_q}{dt} - \frac{x_d - x'_d}{x_d} T_{d0} U \sin \delta \frac{d\delta}{dt}. \quad (5.68)$$

Два последних члена в полученном уравнении характеризуют ЭДС, наводимые в обмотке возбуждения вследствие изменения магнитного потока, сцепленного с этой обмоткой. Выражение (5.68) показывает, что эти ЭДС зависят как от скорости изменения во времени тока в обмотке возбуждения ($dE_q/dt \equiv di_f/dt$), так и от угла δ между векторами ЭДС \underline{E}_q и вектором \underline{U} на шинах неизменного напряжения, а также от скорости изменения этого угла. Это объясняется тем, что результирующее потокосцепление обмотки возбуждения ψ'_f , которому пропорциональна ЭДС \underline{E}'_q , зависит не только от тока возбуждения, но также и от угла сдвига между \underline{E}_q и \underline{U} . С возрастанием угла δ значение ЭДС \underline{E}'_q , а следовательно, и потокосцепление ψ'_f будет уменьшаться. Изменение потокосцепления приводит к появлению в обмотке возбуждения ЭДС и токов, стремящихся воспрепятствовать изменению потокосцепления ψ'_f и ЭДС \underline{E}'_q .

Одним из случаев внезапного нарушения режима работы машин является КЗ. Рассмотрим переходный процесс в цепях СМ при трехфазном КЗ на её выводах. При трехфазном КЗ напряжение \underline{U} внезапно изменяется до нуля. В поперечной оси машины при этом переходные процессы протекают мгновенно. В продольной же оси, где расположена обмотка возбуждения, наво-

дятся токи, которые в момент возникновения КЗ поддерживают неизменной ЭДС E'_q .

При КЗ на выводах генератора напряжение U_q становится равным нулю и, следовательно,

$$E'_q = \frac{x'_d}{x_d} E_q. \quad (5.69)$$

Подстановка этого соотношения в уравнение (5.63) (уравнение ОВ) позволяет исключить одну из переменных и приводит уравнение к виду

$$E_{ql} = E_q + T'_d \frac{dE_q}{dt}, \quad (5.70)$$

где $T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0}$ – постоянная обмотки возбуждения при короткозамкнутой обмотке статора.

Это уравнение легко интегрируется:

$$\underline{E}_q = \underline{E}_{q0} + \left(\underline{E}_{q(0)} - \underline{E}_{q0} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}, \quad (5.71)$$

где $\underline{E}_{q0} = \underline{E}_{ql}$ – значение ЭДС E_q в режиме, предшествующем КЗ;

$\underline{E}_{q(0)}$ – значение \underline{E}_q в начальный момент КЗ.

Электродвижущая сила $\underline{E}_{q(0)}$ определяется согласно (5.69) соотношением

$$\underline{E}_{q(0)} = \frac{x_d}{x'_d} \underline{E}'_{q0},$$

где \underline{E}'_{q0} – неизменное в момент КЗ значение продольной составляющей ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением.

Таким образом, значение ЭДС \underline{E}_q (или ток возбуждения i_f) после внезапного изменения в момент КЗ далее затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени T'_d , стремясь к своему первоначальному значению.

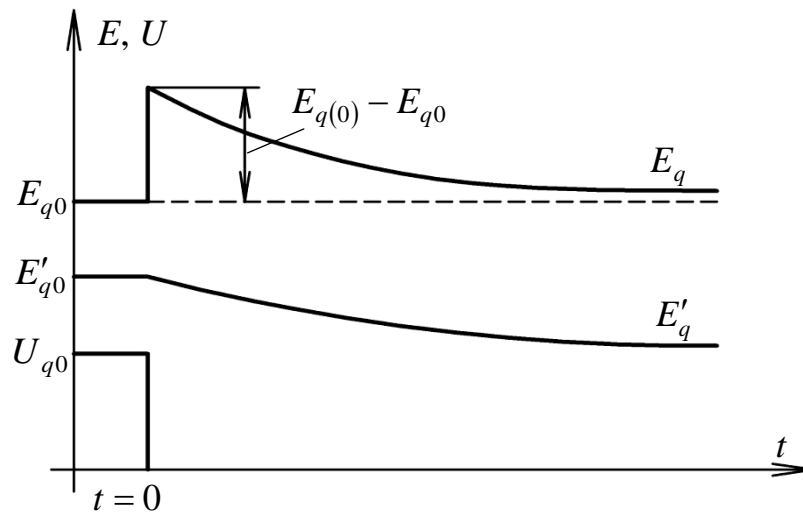


Рис. 5.18. Кривые изменения ЭДС и напряжения в течение переходного процесса

Посмотрим теперь, как изменяется во времени продольная слагающая ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением. Значение этой ЭДС \dot{A}'_q получим после подстановки (5.71) в (5.69):

$$\dot{A}'_q = \dot{A}'_{q0} \frac{x'_d}{x_d} + \left(\dot{A}'_{q(0)} \frac{x'_d}{x_d} - \dot{A}'_{q0} \frac{x'_d}{x_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}, \quad (5.72)$$

частное E_{q0}/x_d определяет установившийся ток КЗ, произведение которого на x'_d дает E'_q в режиме установившегося КЗ: $\dot{A}'_{q\infty} = \frac{\dot{A}'_{q0}}{x_d} x'_d$. Точно так же

$\frac{E_{q(0)}}{x_d} x'_d$ представляет собой значение \dot{A}'_q в первый момент КЗ, равное \dot{A}'_{q0} .

Таким образом, выражение (5.72) преобразуется к виду

$$\dot{A}'_q = \dot{A}'_{q\infty} + \left(\dot{A}'_{q0} - \dot{A}'_{q\infty} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}.$$

Кривая изменения ЭДС \dot{A}'_q представляет собой экспоненту с постоянной времени T'_d , также как кривая ЭДС \underline{E}_q , но начальное значение переменных совершенно различно. Если напряжение на выводах генератора падает, то ЭДС \dot{A}'_q остается неизменной, а \underline{E}_q резко возрастает.

Рассмотрим токи короткого замыкания. Ток КЗ в момент возникновения замыкания (первоначальный момент), если не учитывать активного сопротивления обмотки статора, может быть найден как

$$I_{k(0)} = \frac{\dot{A}'_{q0}}{x'_d},$$

где \dot{A}'_{q0} – продольная составляющая ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением в исходном нормальном режиме. Если не учитывать активного сопротивления обмотки статора, ток КЗ будет отставать по фазе на 90° от ЭДС \underline{E}'_q , т. е. ток при КЗ имеет лишь продольную составляющую тока.

Электродвижущая сила $\dot{A}'_{q(0)}$ в момент возникновения замыкания может быть определена по формуле

$$E_{q(0)} = E'_{q0} \frac{x_d}{x'_d} = I_{k(0)} x_d. \quad (5.73)$$

Полагая в выражении $U_q = E_q - I_d x_d$ напряжение U_q равным нулю, нетрудно найти ток статора при КЗ: $I_d = \underline{E}_q / x_d$. Таким образом, значение E_q из выражения (5.73), деленное на x_d , дает I_d для $t \geq 0$, т. е.

$$I_d = \frac{E_{q0}}{x_d} + \left(\frac{E_{q(0)}}{x_d} - \frac{E_{q0}}{x_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}. \quad (5.74)$$

Поскольку в установившемся режиме КЗ в рассматриваемом случае $I_{k\infty} = \underline{E}_{q0} / x_d$, то выражение (5.74) можно переписать в виде

$$I_k = I_{k\infty} + \left(I_{k(0)} - I_{k\infty} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}. \quad (5.75)$$

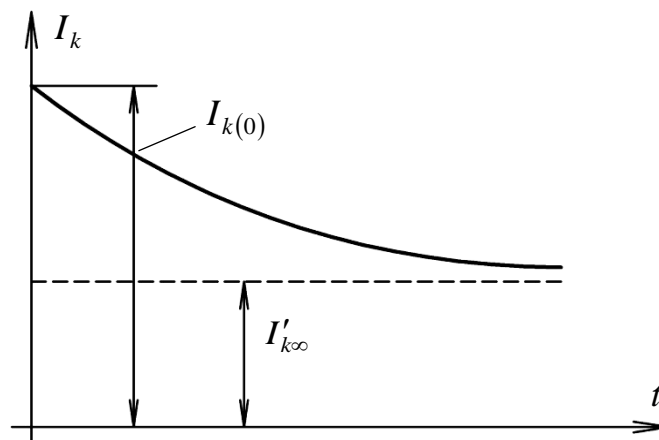


Рис. 5.19. Кривая изменения тока во времени

Эта кривая на графике будет иметь вид [рис. 5.19](#).

Как видно из представленного графика, значение тока трехфазного КЗ синхронной машины с течением времени стремится к своему установившемуся значению.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под законом электромагнитной индукции?
2. Как называется закон Ленца применительно к переходным процессам в электрических машинах?
3. Что понимается под потокосцеплением или магнитным сцеплением?
4. Какие составляющие магнитных потоков представляются для синхронной машины?
5. Как формируется принцип постоянства потокосцеплений?
6. Как выглядит на векторных диаграммах баланс магнитных потоков для случаев: режим холостого хода СМ без учёта и с учётом рассеяния обмотки возбуждения; для нагруженной СМ?
7. К какой СМ относятся такие параметры, как «переходная ЭДС» и «реактивность СМ»?
8. Что означает приставка «сверх» в названиях «сверхпереходная ЭДС и реактивности»?
9. Как различаются реактивности СМ по продольной и поперечной осям СМ?
10. Каковы допущения, принимаемые при выводе уравнений электромагнитного потока?
11. Какой системой описываются уравнения, определяющие напряжения на выводах статора и ротора?
12. Каким представляется закон изменения индуктивностей и взаимоиндуктивностей СМ?
13. Что понимается под линейными преобразованиями?
14. В чем состоит «замена переменных» при выводе уравнений СМ?
15. Как записываются уравнения Горева – Парка?

ГЛОССАРИЙ

Аварийный режим работы энергосистемы – режим работы энергетической системы при возникновении аварий или при недопустимом отклонении показателей качества энергии в энергосистеме в целом или в ее части.

Ветвь электрической сети – участок электрической сети, состоящей из последовательно соединенных элементов с одним и тем же током.

Динамическая устойчивость электрической системы – способность электрической системы вернуться к установившемуся режиму, близкому к исходному, после больших возмущений (резких нарушений исходного установившегося режима).

Звено электрической сети – участок в схеме замещения электрической сети, содержащий только активные и реактивные сопротивления.

Коэффициент трансформации – отношение высшего напряжения трансформатора к низшему в режиме холостого хода.

Межсистемная связь – одна или несколько линий электропередачи, непосредственно соединяющих электростанции или подстанции разных энергосистем.

Переходный режим работы энергосистемы – режим работы энергосистемы, при котором скорости изменения параметров настолько значительны, что должны учитываться при рассмотрении конкретных практических задач.

Подстанция (электрическая) – электроустановка, предназначенная для приема, преобразования и распределения электрической энергии, состоящая из трансформаторов или других преобразователей электрической энергии, устройств управления, распределительных и вспомогательных устройств.

Послеаварийный режим энергосистемы – установившийся режим энергосистемы после устранения аварийных условий.

Приведенное напряжение – значение напряжения, пересчитанное через коэффициенты трансформации к ступени трансформации, принятой за базисную.

Рабочий режим энергосистемы – состояние энергетической системы, характеризующееся совокупностью условий и величин, в какой-либо момент времени или на интервале времени.

Статическая устойчивость электрической системы – способность электрической системы возвращаться к исходному режиму (или весьма близкому к нему) после малых возмущений режима.

Схема замещения – математическая модель, отображающая реальный элемент электрической сети (линию, трансформатор и др.) в виде режимных параметров по его концам.

Установившийся режим работы энергосистемы – режим работы энергосистемы, при котором его параметры могут приниматься неизменными или очень медленно изменяющимися.

Электрическая сеть – совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их линий электропередачи, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии.

Электрическая система – электрическая часть энергетической системы.

Электрическая станция – электроустановка для производства электрической энергии или электрической энергии и теплоты, содержащая строительную часть, оборудование для преобразования энергии и вспомогательное оборудование.

Энергетическая система – электрическая часть энергосистемы и питающиеся от неё приёмники электрической энергии, объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Энергетическая система (энергосистема) – совокупность электрических станций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электроэнергии и теплоты при общем управлении этим режимом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
2. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учеб. для вузов / С. А. Ульянов. – М. : Энергия, 1970. – 520 с.
3. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов и др. – М. : Изд. центр «Академия», 2005. – 416 с.
4. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах : учеб. пособие / Ю. А. Куликов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 283 с.
5. Расчет короткого замыкания: составление схемы замещения. Система относительных единиц : метод. указания / сост. : А. М. Дяков, В. Б. Зорин. – Красноярск : КрПИ, 1992. – 16 с.
6. Зорин, В. Б. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах : метод. указания / сост. : В. Б. Зорин. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 56 с.
7. Переходные процессы в электроэнергетических системах : метод. указания по лаб. работам № 1–2 / сост. : А. Э. Бобров, А. М. Дяков, В. Б. Зорин, Л. И. Пилюшенко. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 36 с.

