

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Нижевартовский государственный гуманитарный университет

*А.Д. Эрнст*

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Курс лекций



Издательство  
Нижевартовского государственного  
гуманитарного университета  
2012

УДК 621.31(075)

Э 81

Печатается по решению Редакционно-издательского совета  
Нижевартовского государственного гуманитарного университета

Рецензент

к.т.н., доцент, главный специалист отдела строительных решений  
и инженерного обеспечения Ханты-Мансийского филиала  
ФАУ «Главгосэкспертиза России» *А.В.Беспалов*

**Эрнст А.Д.**

**Э 81**      **Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах:** курс лекций. — Нижневартовск: Изд-во НГГУ, 2012. — 199 с.

Изложены основные положения теории и практики расчетов электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах. Рассмотрены вопросы составления и преобразования схем замещения и применения практических методов расчета симметричных и несимметричных коротких замыканий в курсе «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Для студентов дистанционной, очной и заочной форм обучения по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.31(075)

© Эрнст А.Д., 2012

© Издательство НГГУ, 2012

## БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

$I$	— ток, действующее значение;
$i$	— ток, мгновенное значение;
$I_m$	— ток, амплитудное значение;
$I_{ном}$	— номинальный ток;
$i_{уд}$	— ударный ток КЗ;
$i_{дин}$	— ток электродинамической стойкости;
$I_{вкл}, i_{вкл}$	— ток включения, действующее и мгновенное значения;
$I_{скв}, i_{скв}$	— сквозной ток, действующее и мгновенное значения;
$I_{откл}, i_{откл}$	— отключаемый ток, действующее и мгновенное значения;
$I_t, i_t$	— ток в момент $t$ ;
$I_{тер}$	— ток термической стойкости;
$I_{\infty}$	— ток установившегося режима;
$I_k$	— ток КЗ, общее обозначение
$I_n; i_n$	— периодическая составляющая тока КЗ;
$I_a; i_a$	— аperiodическая составляющая тока КЗ ( $I_a = i_a$ );
$I_{n0}$	— начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ (Первый период КЗ) ( $t = 0$ );
$i_{a0}$	— начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ ( $t = 0$ );
$I_A, I_B, I_C$	— токи соответственно фаз А, В, С;
$I_N$	— ток в нейтральном проводе (земле);
$I_1, I_2, I_0$	— ток соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей;
$I_{\Sigma}$	— ток суммарный;
$I_d, I_q$	— токи соответственно по осям $d$ и $q$ ;
$I'$	— переходный ток;
$I''$	— сверхпереходный ток;
$U, u$	— напряжение, действующее и мгновенное значения;
$U_{ном}$	— номинальное напряжение;
$U_1, U_2, U_0$	— напряжения соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей;
$\Delta U$	— потеря напряжения;
$\varphi$	— угол сдвига фаз между напряжением и током;
$\cos \varphi$	— коэффициент мощности;
$E, e$	— электродвижущая сила (ЭДС), действующее и мгновенное значения;

$P$	— мощность активная;
$Q$	— мощность реактивная;
$S$	— мощность полная, модуль;
$f$	— частота колебаний электрической величины;
$\omega$	— частота колебаний электрической величины, угловая;
$R, r$	— сопротивление активное;
$X, x$	— сопротивление реактивное;
$Z, z$	— сопротивление полное;
$X_L$	— сопротивление реактивное, индуктивное;
$X_C$	— сопротивление реактивное, емкостное;
$Z_1, Z_2, Z_0$	— сопротивления соответственно прямой, обратной
$x_1, x_2, x_0$	и нулевой последовательностей полное и индуктивное;
$Y$	— проводимость электрическая;
$L$	— индуктивность собственная;
$M$	— индуктивность взаимная;
$K_{св}$	— коэффициент связи;
$\sigma$	— коэффициент рассеяния;
$\rho$	— удельное сопротивление;
$\gamma$	— удельная проводимость;
$W_э$	— энергия электрическая;
$W_{эм}$	— энергия электромагнитная;
$H$	— напряженность магнитного поля, модуль;
$\mu$	— проницаемость магнитная абсолютная;
$T$	— температура в шкале Кельвина;
$T$	— постоянная времени электрической цепи;
$T_a$	— постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ;
$k_y$	— ударный коэффициент;
$k$	— коэффициент трансформации;
$n$	— отношение числа витков;
$N$	— число витков обмотки;
$C$	— емкость;
$s$	— скольжение;
$s_{кр}$	— скольжение критическое;
$S$	— сечение проводника;
$T_j$	— постоянная инерции (механическая постоянная);
$F$	— сила, модуль;
$\Phi$	— магнитный поток;

$J$	— момент инерции;
$B_{\kappa}$	— интеграл Джоуля при КЗ;
$B_{тер}$	— нормированный интеграл Джоуля электрического аппарата для условий КЗ;
$t_{тер}$	— время термической стойкости электрического аппарата;
$t_{откл}$	— время отключения КЗ, расчетная продолжительность КЗ;
$t_{с.в.откл}$	— собственное время отключения выключателя;
$t_{в.откл}$	— полное время отключения выключателя;
$t_{р.з \text{ min}}$	— минимальное расчетное время срабатывания релейной защиты;
$t_{\delta m}$	— бестоковая пауза в цикле АПВ.

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## *1.1. Предмет изучения. Основные понятия. Возникновение и развитие проблем переходных процессов*

Первоначально конструкции электрических машин выполнялись с требованиями нормальной работы. Их мощности были малы, и они обладали естественным запасом устойчивости против механического и теплового действия токов короткого замыкания (далее КЗ). По мере роста мощности машин и осуществления их параллельной работы, размер повреждений при КЗ резко возрос, и вследствие этого стало необходимо рассчитывать аварийные условия работы. Серьезная разработка теории переходных процессов в электрических машинах началась в конце 20-х годов XX века. Наибольший вклад в теорию переходных процессов внесли Н.Н.Щедрин, С.А.Ульянов. В 1930—1935 годах Парком (США) и А.А.Горевым (СССР) была разработана общая теория переходных процессов в синхронных машинах, послужившая основой создания практических методов расчета. В настоящее время разработана нормативная база определяющая методики расчетов токов КЗ [1—7, 17].

Ниже рассмотрим основные определения курса.

*Электрическая система (далее ЭС)* — это условно выделенная часть электроэнергетической системы, в которой осуществляются выработка, преобразование, передача и потребление электрической энергии. В результате аварийных ситуаций в системе возникают переходные процессы, в течение которых происходит переход от одного энергетического состояния (режима) к другому.

*Режим работы системы* — это совокупность процессов, характеризующих работу электрической системы и ее состояние в любой момент времени. Параметры режима: напряжения, мощности и т.п. — связаны между собой параметрами системы. Параметры системы: сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации, постоянные времени и т.п. — определяются физическими свойствами элементов. Различают несколько видов режимов электрических систем.

*Установившийся (нормальный) режим* — состояние системы, когда параметры режима изменяются в небольших пределах, позволяющих считать эти параметры неизменными. Это основной расчетный режим, имеющий лучшие технико-экономические характеристики.

*Нормальные переходные режимы* возникают при нормальной эксплуатации системы (включение и отключение каких-либо элементов системы, изменение нагрузки, несинхронное включение синхронных машин (далее СМ) и т.п.).

*Аварийные переходные режимы* возникают в ЭС при таких возмущениях (авариях), как короткие замыкания, внезапные отключения элементов ЭС, повторные включения и отключения этих элементов, несинхронные включения СМ и т.п.

*Послеаварийные установившиеся режимы* наступают после отключения поврежденных элементов ЭС. При этом параметры послеаварийного режима могут быть как близкими к параметрам нормального (исходного) режима, так и значительно отличаться от них.

При переходе от одного режима к другому изменяется электромагнитное состояние элементов системы и нарушается баланс между механическим и электромагнитным моментами на валах генераторов и двигателей. Это означает, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе, которые взаимно связаны и представляют собой единое целое. Тем не менее очень часто переходный процесс делят на две стадии. На первой стадии из-за большой инерции вращающихся машин в ЭС преобладают электромагнитные изменения. Эта стадия длится от нескольких сотых до 0,1 ... 0,2 с и называется электромагнитным переходным процессом. На второй стадии проявляются механические свойства системы, которые оказывают существенное влияние на переходные процессы. Эта стадия называется электромеханическим переходным процессом. В настоящем курсе будут изучаться электромагнитные переходные процессы, протекающие при постоянной скорости вращения электрических машин  $\omega = \omega_0 = \text{const}$  .

Наиболее частой причиной возникновения аварийных переходных процессов является короткое замыкание.

*Короткое замыкание* — это не предусмотренное нормальными условиями эксплуатации замыкание между фазами или между фазами и землей. В системах с изолированной нейтралью замыкание одной фазы на землю называется простым.

В местах замыкания часто образуется электрическая дуга, сопротивление которой имеет нелинейный характер. Учет влияния дуги на ток КЗ представляет собой сложную задачу и в настоящем курсе не рассматриваются. Учет дуги производится в сетях до 1000 В.

Кроме сопротивления дуги в месте КЗ возникает переходное сопротивление, вызываемое загрязнением, наличием остатков изоляции, окислов и т.п. В случае, когда переходное сопротивление и сопротивление дуги малы, ими пренебрегают. Такое замыкание называют *металлическим*. Расчет максимально возможных токов проводится для металлических КЗ. В электрических системах наиболее часто возникает однофазное замыкание. Его вероятность возрастает с увеличением напряжения сети. Это связано с увеличением междуфазного расстояния (в среднем с 0,7 м в сети 6 ... 10 кВ до 14 м в сети 500 кВ). Иногда в процессе развития аварии первоначальный вид короткого замыкания переходит в другой (например, однофазное КЗ переходит в двухфазное на землю и т.п.).

Несимметричные КЗ, а также несимметричные нагрузки образуют в системе *поперечную несимметрию*. Нарушение симметрии какого-либо промежуточного элемента трехфазной сети (например, отключение одной фазы линии электропередачи) вызывает *продольную несимметрию*. Повреждения, сопровождающиеся сочетанием разных видов несимметрии (например, обрыв фазы с ее коротким замыканием) либо одним видом несимметрии в разных точках системы, называются, *сложными повреждениями* и в настоящем курсе не рассматриваются.

## ***1.2. Действие токов КЗ и последствия коротких замыканий***

Можно выделить несколько последствий КЗ:

Наибольшая опасность при коротком замыкании угрожает элементам системы, прилегающим к месту его возникновения.



В зависимости от места и продолжительности КЗ его последствия могут иметь местный характер (удаленное от источников питания КЗ) или отражаться на функционировании всей системы.

При анализе работы энергосистемы, а также при выборе электрооборудования необходимо учитывать следующие влияния токов КЗ на элементы системы.

1. *Термическое действие*, которое оценивается следующим выражением:

$$W = I^2 R t . \quad (1.1)$$

Термическое действие вызывает повреждение электрооборудования, связанное с его недопустимым нагревом токами КЗ.

2. *Динамическое действие* оценивается следующим условием:

$$F \equiv i^2 . \quad (1.2)$$

Динамическое действие может вызывать механическое повреждение электрооборудования из-за воздействия больших электромагнитных сил между токоведущими частями. Последствия термического и динамического действия в большей степени угрожают элементам системы, прилегающим к месту возникновения КЗ.

3. *Отрицательные влияния на линии других напряжений* и на линии связи (проявляется при несимметрии). При этом при несимметричных КЗ наводятся ЭДС в соседних линиях связи и сигнализации, опасные для обслуживающего персонала и оборудования.

4. *Ухудшение показателей качества электрической энергии*, таких как отклонение напряжения, несинусоидальность кривой напряжения и тока, несимметрия трехфазной системы и т.д. При этом ухудшаются условия работы потребителей. При понижении напряжения, например, до 60—70% от номинального в течение 1 с и более возможна остановка двигателей ответственных механизмов промышленных предприятий. Это, в свою очередь, может вызвать нарушение технологического процесса, приводящее к экономическому ущербу.

5. *Потеря устойчивости системы* (выпадение генераторов из синхронизма). Данный вопрос рассматривается в курсе «Устойчивость узлов нагрузки».

Потеря устойчивости может привести к системной аварии. Это наиболее опасное последствие коротких замыканий. Оно приводит к значительным технико-экономическим ущербам и нарушениям электроснабжения регионов.

Существуют определенные противоречия между некоторыми действиями токов КЗ, а именно: при ограничении величины токов КЗ падает запас статической и динамической устойчивости системы и ухудшаются условия пуска и самозапуска электродвигателей.

В связи со сложностью комплексного исследований переходных процессов принято их разделение по скорости протекания, что сформировало несколько дисциплин:

— *техника высоких напряжений* (изоляция и защита от перенапряжений), изучающая быстро протекающие процессы (до 1 мс);

— *электромагнитные переходные процессы* — предмет настоящего курса, изучающий процессы при синхронной скорости вращения электрических машин  $\omega = \omega_0 = \text{const}$  (до 0,5 с);

— *электромеханические переходные процессы* (устойчивость узлов нагрузки) при одновременном учете электромагнитных и механических процессов (0,1...10 с);

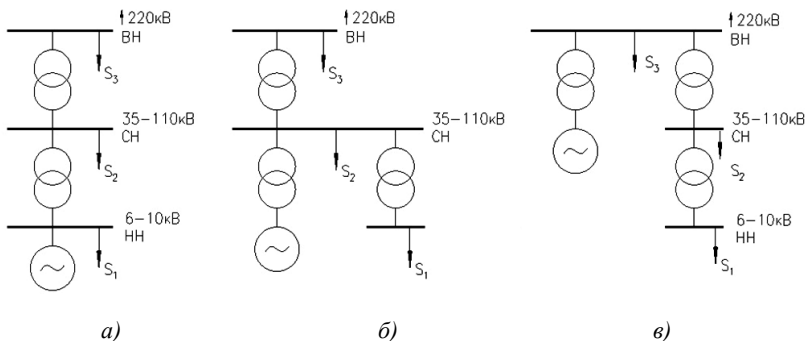
— *электрические системы и сети*, изучающие стационарные режимы работы систем.

### **1.3. Задачи расчета электромагнитных переходных процессов**

К основным задачам расчета электромагнитных переходных процессов относят следующие:

1. Выбор схемных решений.

Ярким примером тому являются исторические изменения схемы питания.



**Рис. 1.1. Блочные схемы электроснабжения**

При использовании блочных схем, представленных на рисунке 1.1, снижаются токи КЗ, поскольку увеличивается количество ступеней трансформации.

2. Выбор и проверка оборудования к термическому и динамическому действию тока КЗ. Например, нормирование параметров выключателя.

3. Выбор уставок устройств релейной защиты. При этом при расчете необходимо найти минимальные и максимальные значения токов КЗ в различных точках системы электроснабжения.

4. Выбор и проверка устройств системной автоматики.

5. Проверка условий работы оборудования в пусковых и аварийных режимах.

Расчеты токов КЗ необходимы для достижения следующих целей:

1) определения условий работы потребителей в аварийных режимах;

2) выбора аппаратов и проводников, их проверки по условиям электродинамической стойкости;

3) проектирования и настройки устройств релейной защиты и автоматики;

4) сопоставления, оценки и выбора схем электрических соединений;

5) определения влияния линий электропередачи на линии связи;

6) определения числа заземленных нейтралей и их размещения в ЭС;

7) выбора разрядников;

8) анализа аварий;

9) подготовки к проведению различных испытаний в ЭС.

Точность расчета КЗ зависит от его цели. В связи с этим вводятся понятия:

— *расчетные условия КЗ*, т.е. наиболее тяжелые, но достаточно вероятные условия КЗ;

— *расчетная схема*, как правило, включающая в себя все элементы электроустановки, через которые протекает ток в режиме КЗ;

— *расчетный вид короткого замыкания* для определения максимальных и минимальных величин тока КЗ;

— *расчетная точка короткого замыкания*, находящаяся непосредственно с одной или с другой стороны от рассматриваемого элемента электроустановки в зависимости от того, когда для него создаются наиболее тяжелые условия в режиме КЗ;

— *расчетная продолжительность короткого замыкания*, понимаемая как сумма времен действия токовой защиты ближайшего к месту КЗ выключателя и полного времени отключения этого выключателя.

Так, при выборе и проверке электрических аппаратов не требуется высокая точность расчета, потому что параметры аппаратов ступенчато изменяются в случае перехода от одного их типа к другому. При выборе устройств релейной защиты и автоматики точность расчета должна быть значительно выше, необходимо определение максимальных и минимальных токов КЗ для момента отключения КЗ. Часто не рабочие режимы, а условия выбора и проверки оборудования и кабельных линий к действию токов КЗ являются определяющими.

#### ***1.4. Координация и оптимизация токов короткого замыкания***

Сущность задач, решаемых в курсе «Электромагнитные переходные процессы», кроме непосредственного расчета уровней токов КЗ, заключается в нижеследующем.

1. Координация — согласование параметров оборудования с существующими уровнями токов КЗ электрических сетей при минимальных расчетных затратах и при соблюдении технических ограничений. Эта задача имеет место при расширении и реконструкции предприятий и электрических сетей со сложившимися исторически уровнями токов КЗ. При решении этой задачи необходима ориентация на новые типы оборудования.

2. Оптимизация — определение оптимальных с экономической точки зрения уровней токов КЗ электрических сетей при минимальных расчетных затратах и соблюдении технических ограничений. Такая задача возникает при проектировании новых предприятий и электрических систем. Поскольку наиболее дешевое оборудование ориентировано на уровни токов, не превышающие 20 кА, допущение иных уровней токов КЗ должно быть экономически обосновано.

Таким образом, как задача координации, так и задача оптимизации являются задачами технико-экономическими и требуют, кроме расчета уровней токов КЗ, сведения к минимуму затрат

$$Z \rightarrow \min, \quad (1.3)$$

где  $Z$  — затраты на строительство и реконструкцию энергосистемы, определяются по следующему выражению:

$$Z = P_n K + I + U, \quad (1.4)$$

где  $P_n$  — доля ежегодных отчислений на капитальные вложения;

$K$  — капитальные вложения;

$I$  — эксплуатационные расходы, включающие стоимость потерь электрической энергии;

$U$  — ущерб от перерывов электроснабжения, вызванный различным уровнем надежности оборудования.

В связи с дискретным рядом параметров электротехнического оборудования решение этих задач сводится к технико-экономическому сравнению двух или нескольких вариантов.

## 2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Согласно ПУЭ [1] в РФ принята следующая классификация режимов работы нейтрали электрических сетей.

1. Изолированная нейтраль — режим работы, при котором нейтраль трансформатора непосредственно не соединяется с землей.

2. Заземленная нейтраль.



*Рис. 2.1. Графическое изображение нейтрали на схеме:  
а) изолированной; б) заземленной*

В каждом режиме существуют разновидности [8]. Так, режим изолированной нейтрали включает в себя изолированную нейтраль с компенсацией емкостного тока; нейтраль, заземленную через большое активное сопротивление. Разновидностями заземленной нейтрали, или эффективно заземленной, являются глухо заземленная нейтраль (непосредственное соединение нейтрали с землей без промежуточных элементов), заземленная через реактор или резистор небольшого сопротивления. К этому классу относятся и системы с рассредоточенным заземлением нейтрали, то есть с разземлением части нейтралей трансформаторов для уменьшения тока однофазного КЗ. Выбор режима работы нейтрали определяется, в основном, поведением системы при наиболее часто встречающихся повреждениях — однофазных замыканиях. Разделение режимов работы нейтрали производится по величине коэффициента замыкания фазы на землю или коэффициента эффективности заземления нейтрали

$$k_3 = \frac{U_{\phi_3}}{U_{\phi}}. \quad (2.1)$$

Здесь:  $U_{\phi_3}$  — напряжение «здоровой» фазы при замыкании на землю другой;

$U_{\phi}$  — фазное напряжение в нормальном режиме работы сети.

При  $k_3 > 1,4$  — режим изолированной нейтрали,

при  $k_3 \leq 1,4$  — режим заземленной нейтрали.

### ***2.1. Причины возникновения переходных процессов***

Переходные процессы возникают вследствие изменения режимов, обусловленных изменением эксплуатационных условий или результатом повреждения изоляции или токоведущих частей электроустановок. Так как, в соответствии с законом сохранения энергии, энергия не может измениться мгновенно, это вызывает переход от одного режима к другому за конечное время. Наиболее тяжелые последствия вызывают переходные процессы при коротких замыканиях. Из всего многообразия причин возникновения КЗ можно выделить несколько основных.

1. Нарушение изоляции, вызванное ее старением, загрязнением поверхности изоляторов, механическими повреждениями.
2. Механическими повреждениями элементов электрической сети (обрыв провода линии электропередачи и т.п.).
3. Преднамеренные КЗ, вызываемые действием короткозамыкателей.
4. Перекрытие токоведущих частей животными и птицами.
5. Ошибки персонала подстанций при проведении переключений.

Уменьшение количества КЗ в электрических системах связано со строгим соблюдением «Правил технической эксплуатации электроустановок» и повышением качества продукции электро-технической промышленности.

## 2.2. Виды КЗ в системах электроснабжения

К основным видам КЗ относятся следующие.

1. В системах с заземленной нейтралью:

- однофазное КЗ —  $K^{(1)}$ ;
- двухфазное КЗ на землю —  $K^{(1,1)}$ ;
- двухфазное КЗ —  $K^{(2)}$ ;
- трехфазное симметричное КЗ —  $K^{(3)}$ .

2. В системах с изолированной нейтралью:

- простое однофазное замыкание —  $3^{(1)}$ ;
- двухфазное короткое замыкание —  $K^{(2)}$ ;
- трехфазное КЗ —  $K^{(3)}$ .

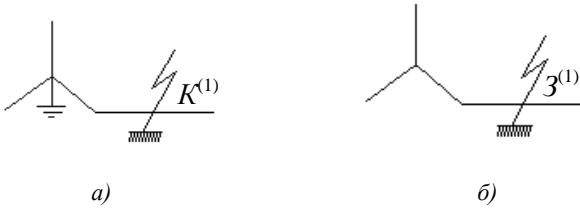


Рис. 2.2. Виды однофазных замыканий:

а) однофазное КЗ —  $K^{(1)}$ ; б) простое однофазное замыкание на землю —  $3^{(1)}$

КЗ на рисунке 2.2 а возникает наиболее часто (83—95%) и является самым распространенным повреждением в системах с заземленной нейтралью. Простое замыкание на землю (рис. 2.2 б) возникает с относительной вероятностью 65%, т.е. также является наиболее распространенным видом повреждений в системах с изолированной нейтралью.

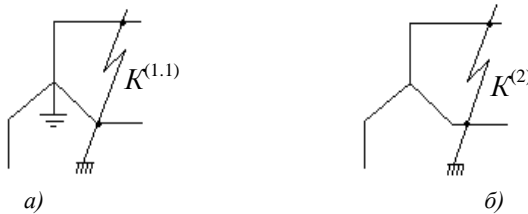
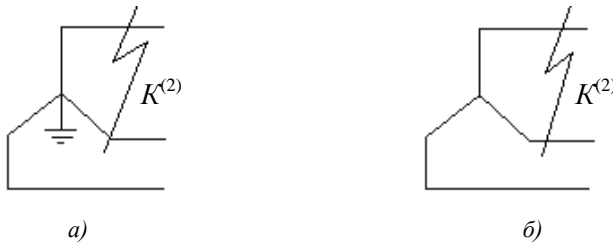


Рис. 2.3. Двухфазное на землю КЗ:

а)  $K^{(1,1)}$ ; б) эквивалентно  $K^{(2)}$



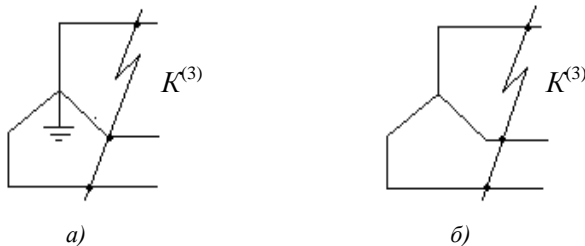
Для КЗ на рисунке 2.3 *а* вероятность возникновения 2—8%. Повреждение на рисунке 2.3 *б* возникает с относительной вероятностью 20%.



**Рис. 2.4. Двухфазное (междуфазное) КЗ:**  
*а)  $K^{(2)}$ ; б)  $K^{(2)}$*

Вероятность повреждения для КЗ на рисунке 2.4 *а* составляет 2—5%. Второй вид повреждений (рис. 2.4 *б*) возникает с относительной вероятностью 10%.

Ток трехфазного короткого замыкания не зависит от режима работы нейтрали.



**Рис. 2.5. Трехфазное КЗ:**  
*а)  $K^{(3)}$ ; б)  $K^{(3)}$*

Для рисунка 2.5 *а* вероятность трехфазного КЗ 1—4%. Для КЗ рис. 2.5 *б* характерна относительная вероятность возникновения — 5%.

Основным расчетным видом КЗ будет считаться трехфазное КЗ —  $K^{(3)}$ , поскольку последствия данного повреждения в большинстве случаев наиболее тяжелые для оборудования и системы в целом (если речь идет о системных авариях). Кроме этого,

как будет показано ниже, расчет несимметричного  $KЗ$  также сводится к расчету трехфазного короткого замыкания.

### 2.3. Трехфазные сети с изолированной нейтралью

#### 2.3.1. Простое замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью

Рассмотрим схему трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью, изображенную на рисунке 2.6, при замыкании фазы  $C$  на землю.

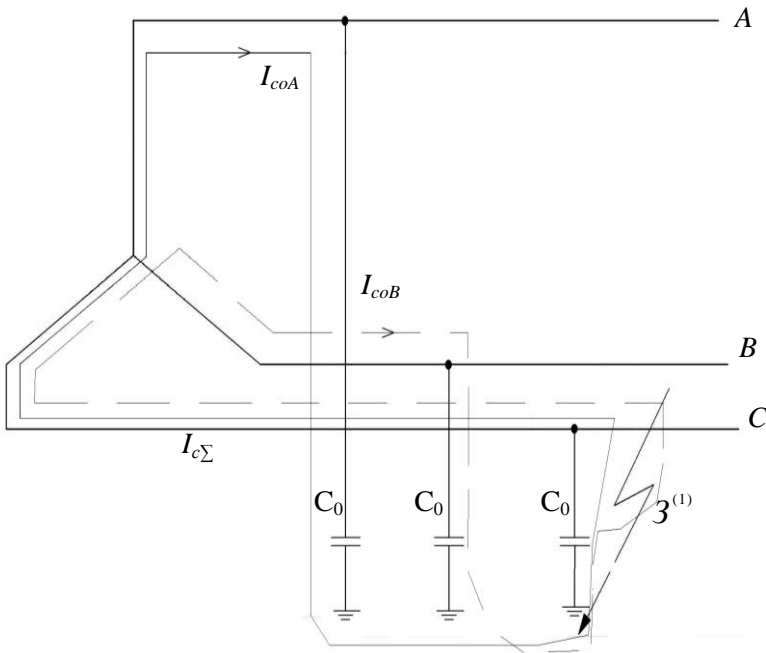


Рис. 2.6. Замыкание фазы с на землю в сети с изолированной нейтралью

Векторная диаграмма токов и напряжений изображена на рисунке 2.7.

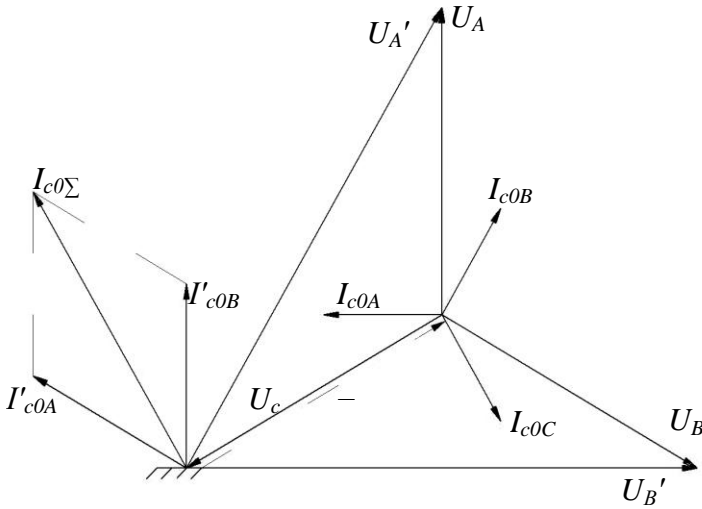


Рис. 2.7. Векторная диаграмма

При замыкании фазы на землю, называемом простым замыканием, ток определяется только емкостным сопротивлением сети. Емкостные сопротивления элементов сети значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, что позволяет при определении тока пренебречь последними.

Из векторной диаграммы следует:

— емкостный ток фазы  $C$  до замыкания:

$$I_{co} = \frac{U_{\phi}}{x_{co}} = \omega C_0 U_{\phi}; \quad (2.2)$$

— напряжение в фазе  $A$  после замыкания:

$$U'_A = U_A + -U_C; \quad (2.3)$$

— модуль напряжения фазы  $A$  после замыкания:

$$|U'_A| = |U'_B| = \sqrt{3}U_{\phi} = U; \quad (2.4)$$

— модуль емкостного тока фаз  $A$  и  $B$  после замыкания:

$$|I'_{co}| = \sqrt{3}I_{co}; \quad (2.5)$$

— ток через место повреждение и ток фазы  $C$ :

$$I_{c\Sigma} = \sqrt{3}I'_{co} = 3I_{co}. \quad (2.6)$$

Необходимо отметить то, что емкостные токи обычно малы и не соизмеримы с токами КЗ. Величина емкостного тока определяется емкостью всей электрически связанной сети.

Из выражений (2.3), (2.4) можно сделать вывод, что происходит повышение напряжения здоровых фаз при замыкании на землю в  $k_3 = \sqrt{3}$  раз, где  $k_3$  — коэффициент замыкания на землю. В месте замыкания часто возникает перемежающаяся дуга, а та, в свою очередь, вызывает перенапряжения (рис. 2.8), распространяющиеся на всю электрически связанную сеть.

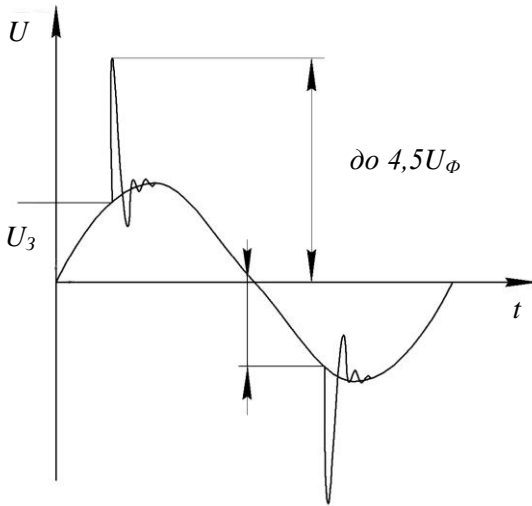


Рис. 2.8. Перенапряжение в сети;  $U_3$  — напряжение зажигания дуги

Из рисунка 2.8 видно, что в сети с изолированной нейтралью возможны коммутационные перенапряжения до  $4,5U_\phi$ .

### 2.3.2. Достоинства и недостатки сетей с изолированной нейтралью

Рассмотрим основные достоинства и недостатки сети с изолированной нейтралью.

#### *Достоинства*

1. Высокая надежность работы электрической сети — до 95% замыканий на землю простые и не требуют отключения.

2. Простота выполнения, а также экономия на устройствах релейной защиты. Например, допускается не устанавливать трансформатор тока на одну из фаз (обычно фазу В).

3. Невысокие требования к заземляющим устройствам.

Так, для сетей с изолированной нейтралью напряжением 6—35 кВ сопротивление заземляющего устройства рассчитывается как

$$r_3 = \frac{250}{I_c} \leq 10 \text{ Ом}. \quad (2.7)$$

При общем заземляющем устройстве сетей 6—10/0,4—0,66 кВ

$$r_3 = \frac{125}{I_c} \leq 4 \dots 2 \text{ Ом}. \quad (2.8)$$

#### *Недостатки*

1. Повышение напряжения до линейного. При изолированной нейтрали

$$k_3 = \sqrt{3}.$$

2. Дуговые коммутационные перенапряжения, что требует повышения уровня изоляции.

3. Наброс реактивной мощности, что изменяет качество потребляемой энергии.

4. Возможность возникновения феррорезонансных процессов.

Однако большие величины емкостного тока значительно увеличивают величину перенапряжений и могут вызвать расплавление изоляции и переход простого замыкания в КЗ. Допустимые значения емкостного тока, вызывающие перенапряжения не более  $2,5U_\phi$ , даны в таблице 2.1.

Таблица 2.1

## Допустимые значения емкостного тока

№ п/п	Класс напряжения, кВ	Допустимое значение емкостного ток, А
1	3—6	30
2	10	20
3	15—20	15
4	35	10
5	генераторные цепи	5
6	ЛЭП на ж/б опорах	10

При превышении допустимого значения емкостного тока необходима его компенсация.

Емкостный ток для кабельных и воздушных линий приближенно может быть определен:

— кабельные линии:

$$I_{скл} = \frac{Ul_{\Sigma}}{10}; \quad (2.9)$$

— воздушные линии:

$$I_{свл} = \frac{Ul_{\Sigma}}{350}, \quad (2.10)$$

где  $l_{\Sigma}$  — суммарная длина электрически связанных линий, км;

$U$  — напряжение сети, кВ;

$I_c$  — емкостный ток, А.

Значительное увеличение тока замыкания на землю дает применение батарей статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности. Их применение всегда требует компенсации емкостных токов замыкания на землю.

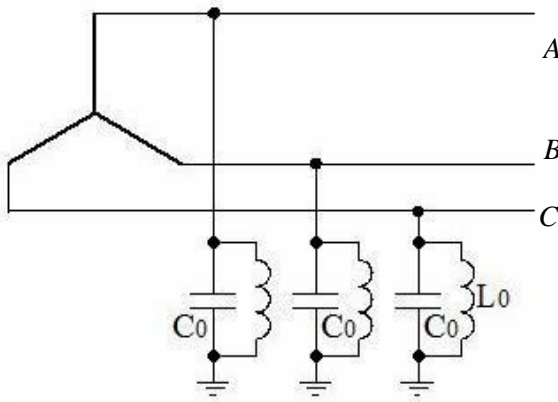
#### 2.4. Трехфазные сети с компенсацией емкостного тока. Достоинства и недостатки

В сетях напряжения 3 ... 20 кВ и небольшой протяженности воздушных и кабельных линий ток замыкания фазы на землю составляет несколько ампер. Дуга в этом случае оказывается

неустойчивой и самостоятельно гаснет. Такие сети могут нормально работать в режиме простого замыкания. Увеличение напряжения и протяженности сети приводит к росту тока замыкания на землю до десятков и сотен ампер. Дуга при таких токах может гореть долго, она часто переходит на соседние фазы, превращая однофазное замыкание в двух- или трехфазное. Устранение дуги достигается за счет компенсации тока замыкания на землю.

В качестве дугогасящего аппарата возможно применение шунтирующих и дугогасящих реакторов.

Для трех шунтирующих реакторов схема включения дана на рисунке 2.9.



*Рис. 2.9. Схема включения шунтирующих реакторов*

Для шунтирующих реакторов (рис. 2.9) справедливы следующие выражения:

$$x_{L0} = x_{c0}, \quad \omega L_0 = \frac{1}{\omega C_0}, \quad L_0 = \frac{1}{\omega^2 C_0}; \quad I_L = I_c. \quad (2.11)$$

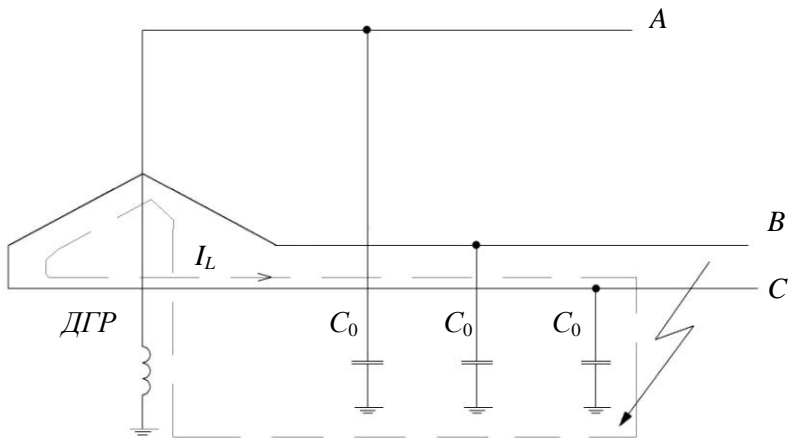


Рис. 2.10. Схема включения дугогасящего реактора

Для дугогасящего реактора ДГР (рис. 2.10) индуктивность

$$L_k = \frac{1}{3\omega^2 C_0}; \quad k = \frac{I_L}{I_c}; \quad \nu = 1 - k \cdot 100\%, \quad (2.12)$$

где  $k$  — степень настройки компенсации;  $\nu$  — степень расстройки компенсации.

Перенапряжения в сетях с компенсацией емкостного тока уменьшаются и не превышают значений

$$U_{\text{пн}} \leq 2,5U_{\phi} \quad \text{при } \nu = \pm 5\%. \quad (2.13)$$

Реально в электрических сетях используется только дугогасящий реактор в нейтрали, как наиболее экономичный.

Определим основные достоинства и недостатки сетей с компенсацией емкостного тока.

*Достоинства* такие же, как и в сетях с изолированной нейтралью при меньших уровнях перенапряжений. Кроме этого, для таких сетей практически полностью устраняется возможность возникновения феррорезонансных процессов.

*Недостатки* такие же, как и в сетях с изолированной нейтралью. Кроме того, возникают дополнительные затраты на



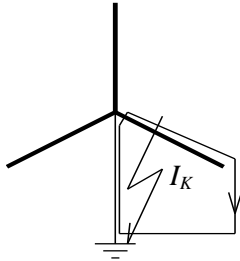
амортизацию и обслуживание ДГР таких сетей. Коэффициент замыкания фазы на землю  $k_3 = \sqrt{3}$ .

*Область применения:*

1. Сети напряжением 6—10 кВ.
2. Сети с питанием на генераторном напряжении.
3. Сети 35 кВ.

### **2.5. Трехфазные сети с заземленной нейтралью. Достоинства и недостатки**

В таких сетях нейтраль трансформатора заземляется либо «глухо», т.е. непосредственно присоединяется к заземляющему устройству, либо через низкоомный резистор или реактор. Ток при однофазном КЗ на землю в сети с глухозаземленной нейтралью будет протекать так, как показано на рисунке 2.11, что требует отключения такого КЗ.



**Рис. 2.11. Однофазное КЗ на землю в сети с заземленной нейтралью**

К основным достоинствам и недостаткам можно отнести следующее.

*Достоинства:*

- 1) отсутствие перенапряжения и более равномерное распределение напряжения по обмоткам;
- 2) изоляция рассчитывается чуть ниже линейного напряжения — как правило  $0,8U_H$ .

*Недостатки:*

1) низкая надежность, которая повышается при использовании резервирования и автоматического повторного включения;

2) высокие требования к заземляющим устройствам: при  $U \geq 110$  кВ сопротивление заземляющего контура не должно превышать 0,5 Ом.

В сети с заземленной нейтралью практически все электрооборудование защищается 80% разрядниками или ограничителями перенапряжений (ОПН). В этом случае напряжение «здоровой» фазы

$$U_{\text{фз}} = 0,8\sqrt{3}U_{\text{ф}} = 1,4U_{\text{ф}}. \quad (2.14)$$

Коэффициент замыкания фазы на землю для таких сетей  $k_3 \leq 1,4$ .

*Область применения:*

1. Сети напряжением 0,4—0,66 кВ.
2. Сети напряжением 110 кВ и выше.

## **2.6. Требования к защите от поражения электрическим током в электрических сетях**

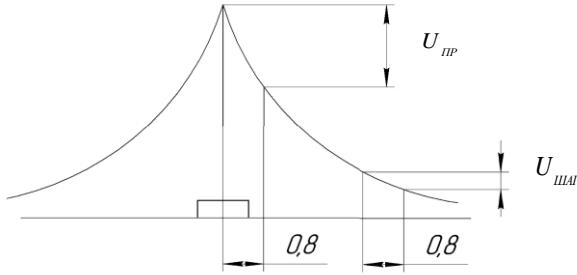
В сетях как с изолированной, так и с заземленной нейтралью предъявляются очень высокие требования к защите человека от поражения электрическим током.

Существует определенный порог тока, который человек начинает ощущать, и тока, который приводит к необратимым последствиям:

- 1 мА — осязаемый ток;
- 10 мА — неотпускающий ток;
- 50 мА — фибрилляционный ток.

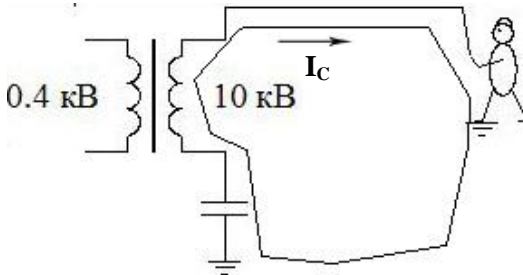
Величина тока, протекающего через тело человека, определяется ЭДС и внутренним сопротивлением источника и сопротивлением тела человека. При расчетах минимальное значение сопротивления человека  $R_{\text{ч}} \sim 200$  Ом.

Для сетей с изолированной нейтралью характерно длительное появление напряжения прикосновения и шагового напряжения (рис. 2.12).



**Рис. 2.12. Напряжение растекания**

Эти напряжения представляют собой относительную опасность и регламентируются величиной сопротивления защитного заземляющего устройства. Гораздо большую опасность вызывает прикосновение к токоведущим частям. Например, при прикосновении к выводу трансформатора (рис. 2.13) (испытание обратным напряжением) необходимо учитывать влияние емкости вывода и обмотки относительно земли.



**Рис. 2.13. Поражение человека емкостным током в сети переменного тока**

Емкостное сопротивление вывода относительно земли (рис. 2.13):

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f_0 C}; \quad (2.15)$$

Тогда ток, протекающий через тело человека,

$$I_c = \frac{U}{Z}. \quad (2.16)$$

Пример:  $U = 10 \text{ кВ}$ ;  $C = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 1000 \text{ пФ}$ .

Тогда емкостное сопротивление цепи  $x_c = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ , ток через человека  $I = 3 \text{ мА}$ . Как видно, ток является ощутимым даже при очень малой емкости вывода и обмотки относительно земли. При прикосновении к токоведущим частям систем с изолированной нейтралью емкость электрически связанной сети значительно выше. Можно показать, что ток через тело человека при прикосновении практически равен току замыкания на землю и может достигать десятков ампер.

В сетях с заземленной нейтралью напряжением до 1 кВ широко применяется защитное отключение участка сети при повреждении изоляции и прикосновении человеком токоведущих частей с помощью устройства защитного отключения (УЗО) [22].

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

#### 3.1. Переходный процесс в простейших трехфазных цепях

Трехфазная цепь называется простейшей, если она состоит из сосредоточенных активных и индуктивных сопротивлений и не имеет трансформаторных связей. Характер электромагнитного переходного процесса при трехфазном КЗ зависит от степени удаленности точки КЗ от источников питания.

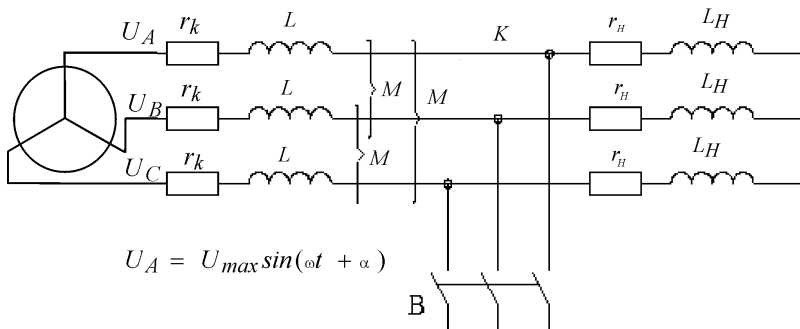
Рассмотрим короткое замыкание в точке, электрически удаленной от источников питания. КЗ, возникающие на ней, не оказывают существенного влияния на работу генераторов системы. Это обстоятельство позволяет считать напряжение системы неизменным. В этом случае шины источников питания называются шинами неизменного напряжения или шинами бесконечной мощности.

*Допущения при расчете*

1. Питание происходит от источника бесконечной мощности

$$Z = \frac{U^2}{S} \rightarrow 0, U_m = \text{const.}$$

1. В цепи отсутствуют поперечные проводимости: активные, индуктивные и емкостные.
2. Короткое замыкание симметричное и металлическое (отсутствует дуга и переходное контактное сопротивление).
3. Цепь симметрична и взаимные индуктивности между фазами одинаковы.



**Рис. 3.1. Схема замещения простейшей системы**

Рассмотрим переходный процесс при трехфазном КЗ, вызываемом выключателем В (рис. 3.1). Ток режима, предшествующего короткому замыканию, может быть определен как:

$$i_A = \frac{U_{Amax}}{Z_{\Sigma}} \sin(\omega + \alpha - \varphi). \quad (3.1)$$

Проекции векторов напряжений и токов на ось времени определяют их мгновенные значения. Угол  $\alpha$  между горизонталью и вектором  $U_A$  называется *фазой включения КЗ*.

После включения выключателя В при КЗ (рис. 3.1) схема делится точкой КЗ на две части: правую и левую. Ток в правой части будет существовать до тех пор, пока энергия, запасенная в индуктивности  $L_H$ , не перейдет в тепло в активном сопротивлении  $r_H$ .

$$ir_H + L_H \frac{di}{dt} = 0. \quad (3.2)$$

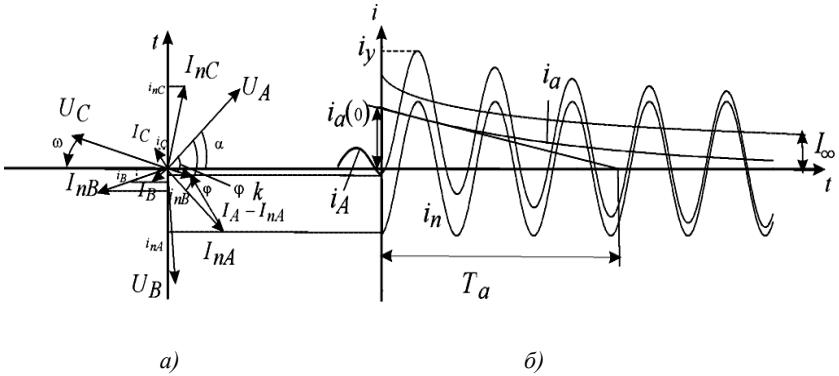


Рис. 3.2. а) векторная диаграмма; б) изменение токов в левой части схемы простейшей системы

Дифференциальное уравнение равновесия в каждой фазе левого участка имеет вид:

$$u_A = L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + r_k i_A. \quad (3.3)$$

Так как  $i_A + i_B + i_C = 0$ , то  $\frac{di_A}{dt} = - \left( \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right)$ , (3.4)

откуда 
$$u_A = (L - M) \frac{di_A}{dt} + r_k i_A, \quad (3.5)$$

или 
$$U_m \sin \omega t + \alpha = L_k \frac{di_A}{dt} + r_k i_A. \quad (3.6)$$

Решение состоит из принужденной ( $i_n$ ) и свободной ( $i_a$ ) составляющих и имеет вид:

$$i_A = i_n + i_a = \frac{U_m}{Z_{\Sigma k}} \sin \omega t + \alpha - \varphi_k + C e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad (3.7)$$

где  $T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}$  — постоянная времени цепи.

На рисунке 3.2:  $i_y$  — ударный ток — наибольшее мгновенное значение тока;

$I_\infty$  — установившийся ток КЗ.

В момент времени  $t = 0$ :  $i_{A0} = i_{n0} + C$ ;

$$C = i_{A0} - i_{n(0)} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k); \quad (3.8)$$

$$i_A = i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + (I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k))e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (3.9)$$

где  $I_{nm} = \frac{U_m}{Z_{\Sigma k}}$ ,  $I_m = \frac{U_m}{Z_\Sigma}$ ,  $\varphi = \arctg \frac{x_k}{r_k}$  согласно рисунку 3.3.

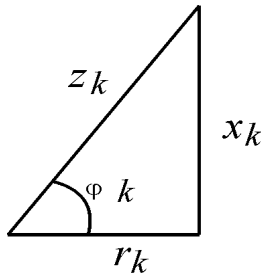


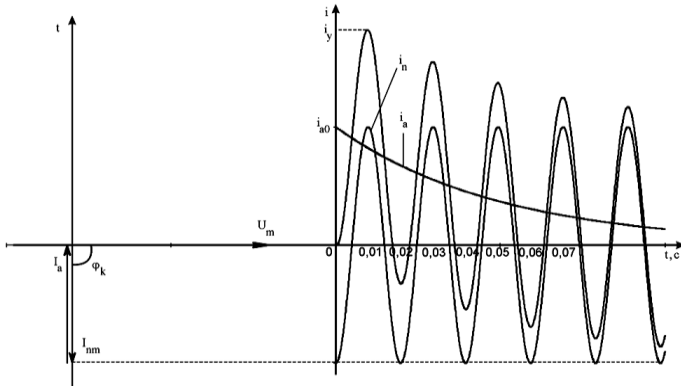
Рис. 3.3. Треугольник сопротивлений

Для других фаз выражения для тока подобны и в дальнейшем не приводятся.

Понятие симметричного КЗ условное и справедливо для амплитуд периодических составляющих, а аperiodические составляющие в фазах различны. При определенных условиях в одной из фаз может отсутствовать переходный процесс.

Расчетные величины переходного процесса для случая отсутствия предшествующего тока и  $\varphi_k = 90^\circ$  приведены на рисунке 3.4



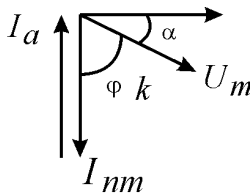


**Рис. 3.4. Переходный процесс при трехфазном КЗ при отсутствии предшествующего тока и  $\varphi_k = 90^\circ$**

### **3.2. Определение ударного тока КЗ**

Возможны два подхода в нахождении условий возникновения максимального значения ударного тока КЗ: *умозрительный* и *строгий*.

В практических расчетах максимальное мгновенное значение полного тока КЗ или ударного тока КЗ находят при наибольшей аperiodической составляющей (рис. 3.5). Это *умозрительный* подход.



**Рис. 3.5. Условие максимума аperiodической составляющей при КЗ**

Условием максимума аperiodической составляющей является отсутствие предшествующего тока при угле включения  $\alpha$ , изображенном на рисунке 3.5. С учетом этих условий выражение для ударного тока КЗ:

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = k_y I_{nm} = \sqrt{2} k_y I_n, \quad (3.10)$$

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

$I_n$  — действующее значение периодической составляющей тока в первый период КЗ.

Ударный коэффициент показывает превышение ударного тока над амплитудой периодической составляющей (рис. 3.4).

Это вычисление ударного тока не является строгим, так как полный ток зависит от времени и угла включения. Строгое условие максимального мгновенного значения тока можно получить нахождением экстремума выражения (3.9). При условии отсутствия предшествующего тока

$$i = I_{nm} (\sin \omega t + \alpha - \phi_k - \sin \alpha - \phi_k e^{-\frac{t}{T_a}}). \quad (3.11)$$

Приравнивая к нулю частные производные по времени и углу, получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial i}{\partial t} = \omega \cos \omega t + \alpha - \phi_k + \frac{1}{T_a} \sin \alpha - \phi_k e^{-\frac{t}{T_a}} = 0; \\ \frac{\partial i}{\partial \alpha} = \cos \omega t + \alpha - \phi_k - \cos \alpha - \phi_k e^{-\frac{t}{T_a}} = 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

Система уравнений (3.12) решается методом исключения относительно времени  $t$  и угла  $\alpha$ :

$$\omega = -\frac{1}{T_a} \operatorname{tg} \alpha - \phi_k. \quad (3.13)$$

Из треугольника сопротивлений рисунка 3.3:  $\operatorname{tg} \phi_k = \frac{x_k}{r_k}$ . Так как

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}, \quad (3.14)$$

то  $tg\phi_k = tg(\alpha - \phi_k)$ . Напряжение в момент включения должно проходить через ноль, т.е. угол  $\alpha = 0$ .

Время наступления максимального значения находится решением системы уравнений (3.12) при  $\alpha = 0$  и оно меньше 0,01 с. Это условие иллюстрирует векторная диаграмма рис. 3.7.

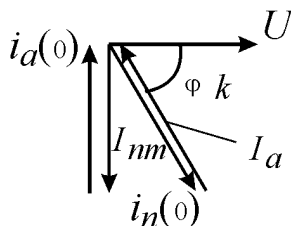


Рис. 3.7. Условие максимума тока при КЗ

При  $\phi_k = 90^\circ$  оба подхода совпадают.

В практике расчетов применяется первый подход. Ударный коэффициент чаще всего принимается равным  $k_y = 1,8$ . В этом случае

$$i_y = 2,55I_n, \quad (3.15)$$

Типовые постоянные времени и ударные коэффициенты на шинах оборудования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

#### Типовые постоянные времени и ударные коэффициенты

Наименование оборудования	Постоянная времени $T_a$ , с	Ударный Коэффициент $k_y$
Турбогенератор	0,1–0,3	1,95
Блок генератор-трансформатор	0,04	1,8
ВЛЭП	0,01	1,3
КЛЭП	0,001	1

В сетях низкого напряжения 0,4–0,66 кВ  $k_y \leq 1,3$ .

Пределы изменения ударного коэффициента в простейшей цепи:

$$1. L_k(x_k) = 0, T_a \rightarrow 0, k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{0}} = 1.$$

$$2. T_a \rightarrow \infty, k_y \rightarrow 1 + e^{\frac{-0,01}{\infty}} \rightarrow 2 \text{ и } k_y = 2.$$

Таким образом  $1 < k_y < 2$ .

При КЗ на выводах батарей статических конденсаторов БСК (рис. 3.8) ударный коэффициент может быть больше 2.

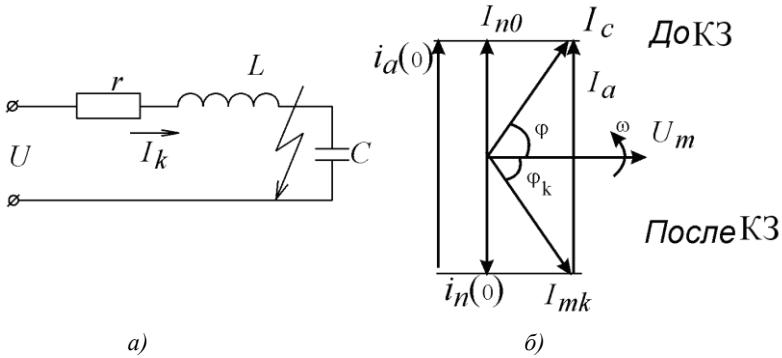


Рис. 3.8. КЗ на шинах БСК  
а) схема замещения; б) векторная диаграмма

### 3.3. Приближенное исследование переходных процессов

В сетях с напряжением выше 1000 В преобладают индуктивные сопротивления элементов и активными сопротивлениями часто можно пренебречь. При этом расчетные схемы сводятся к однородным и существенно сокращается число вычислительных операций при преобразованиях схем.

Действующее значение тока КЗ определяется следующим образом:

$$I_m = \frac{U_m}{Z_k} = \frac{U_m}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} = \frac{U_m}{x_k} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_k}{x_k}\right)^2 + 1}} = I_{m(r=0)} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_k}{x_k}\right)^2 + 1}}. \quad (3.16)$$

Условие, когда можно пренебречь активной составляющей полного сопротивления в цепи КЗ, чтобы погрешность при расчете тока не превышала 5%:

$$r_k \leq \frac{1}{3} x_k ; \text{ При этом: } \varphi_{k(r_k=0)} = 90^\circ .$$

В этом случае ударный коэффициент  $k_{y(r=0)} = 2$  и значение ударного тока:

$$i_{y(r_k=0)} = 1,05 \cdot 2I_m = 2,1I_m .$$

При активной составляющей, равной 1/3 индуктивной:

$$\phi_{k\left(r=\frac{1}{3}x\right)} = 72^\circ , \text{ и } k_{y(r=0)} = 1,37 . \text{ Тогда значение ударного тока:}$$

$$i_{y\left(r_k=\frac{1}{3}x_k\right)} = 1,37I_m .$$

При этом относительная погрешность в расчете ударного тока  $\varepsilon \approx 53\%$  и неприемлема.

Погрешность в определении динамического действия тока КЗ  $F \equiv i_y^2$ :

$$\varepsilon_F = \frac{(2,1I_m)^2}{(1,37I_m)^2} \approx 2,35 , \text{ или } 235\% .$$

Поэтому, если в расчете пренебрегают активным сопротивлением при определении периодической составляющей тока КЗ, ударный коэффициент принимается приближенно, исходя из удаленности точки КЗ от источников. В сетях высокого напряжения ударный коэффициент обычно принимается равным  $k_y = 1,8$ , а в сетях напряжением ниже 1000 В и  $k_y = 1,3$  либо по данным таблицы 3.1.

### 3.4. Эквивалентная постоянная времени

Для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов, определение постоянной времени не представляет труда,

принимая в ее расчете индуктивное и активное сопротивление всей короткозамкнутой цепи.

Решение сложной разветвленной сети наиболее эффективно достигается путем применения преобразований Лапласа, т.е. с использованием операторного метода. При этом число свободных составляющих равно числу ветвей сложной схемы. Для практических расчетов используют более простое приближенное решение. При этом эквивалентная постоянная времени

$$T_{a.э\kappa\beta} = \frac{x'_{k(r=0)}}{\omega r'_{k(x=0)}},$$

где  $x'_{k(r=0)}$  и  $r'_{k(x=0)}$  — суммарные сопротивления между источником питания и точкой КЗ, рассчитанные в предположении, что каждый элемент вводится в схему замещения своим либо активным, либо реактивным сопротивлением.

Полное сопротивление цепи КЗ при таком определении его составляющих не может быть использовано в расчетах, так как  $Z_K \neq \sqrt{x_k'^2 + r_k'^2}$ . Такой искусственный прием значительно упрощает решение и принят в стандарте на выключатели.

### ***3.5. Действующие значения величин и их составляющих при переходном процессе***

Понятие действующих значений величин необходимо для оценки действия электромагнитных переходных процессов, в том числе оценки теплового действия переменного тока в проводниках, а также именно действующие значения показывают измерительные приборы.

Понятие действующего значения тока определяется из условия равенства теплового эффекта переменного и постоянного токов.

Пусть через некоторый участок электрической цепи с сопротивлением  $r$  протекает переменный ток  $i$ . Тогда по закону Джоуля–Ленца на этом участке за время  $T$ , соответствующее периоду тока  $i$ , будет выделено количество тепла, равное

$$Q = \int_0^T i^2 r dt. \quad (3.17)$$

Обозначим через  $I$  некоторый постоянный ток, при протекании которого по тому же участку цепи за время  $T$  выделится такое же количество тепла. Тогда:

$$I^2 r T = \int_0^T i^2 r dt \Rightarrow I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (3.18)$$

При синусоидальном токе получим:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_m \sin \omega t + \psi_i]^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m, \quad (3.19)$$

т.е. величина постоянного тока, эквивалентного переменному току по количеству выделяемого тепла, называется действующим или среднеквадратичным значением переменного тока. Как следует из выражения (3.19), действующее и амплитудное значения синусоидального тока связаны между собой постоянным коэффициентом.

По аналогии с током действующие значения вводятся для напряжений и ЭДС

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m;$$

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707 E_m. \quad (3.20)$$

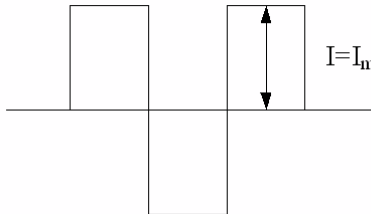


Рис. 3.9. Действующее значение тока прямоугольной формы

Действующее значение всегда меньше амплитудного значения переменной, в частном случае, при меандре (рис. 3.9), они могут быть равны  $I = I_m$ .

Действующее значение периодической и квазипериодической переменной можно найти двумя способами: разложением в ряд Фурье и численным вычислением интеграла.

1. *Разложение в ряд Фурье.* При наличии аналитического выражения функции  $i(t)$  и возможности взятия интеграла действующее значение тока определяется точно. Однако в общем случае на практике действующее значение определяется на основе информации о действующих значениях конечного ряда гармонических составляющих.

Пусть  $i(t) = \sum_{\kappa=0}^{\infty} I_{\kappa m} \sin \kappa \omega t + \varphi_{\kappa}$ . Тогда

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{\kappa=0}^{\infty} I_{\kappa m} \sin \kappa \omega t + \varphi_{\kappa} \right]^2 dt.$$

Таким образом,  $I^2 = I_0^2 + \sum_{\kappa=1}^{\infty} I_{\kappa}^2$  или  $I = \sqrt{\sum_{\kappa=0}^n I_{\kappa}^2}$ . (3.21)

Аналогичные выражения имеют место для ЭДС, напряжения и т.д. т.е. они определяются знакомым из курса электротехники выражением для действующего значения несинусоидальных величин [13].

2. *Численное вычисление интеграла.*

Так как функция  $i^2$  является непрерывной во всем интервале  $[0, T]$ , то интеграл (3.18) можно вычислить методом численного интегрирования с заменой интеграла на конечную сумму. Вычисление проводится путем разбиения интервала от 0 до  $T$  на множество конечных интервалов, приближенным нахождением площади каждой полоски, получающейся при таком разбиении, и дальнейшем суммировании площадей этих полосок. Следовательно, действующее значение тока в этом случае находится по формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^m i_n^2 \Delta t}. \quad (3.22)$$



Таким образом, можно найти, например, действующее значение квазипериодической функции тока намагничивания  $i_\mu$  при включении трансформатора на холостом ходу (рис. 3.10).

Так как действующее значение переменного тока — это величина постоянного тока эквивалентного переменному току по количеству выделяемого тепла, то действующее значение переменного тока можно охарактеризовать интегралом Джоуля (тепловым импульсом).

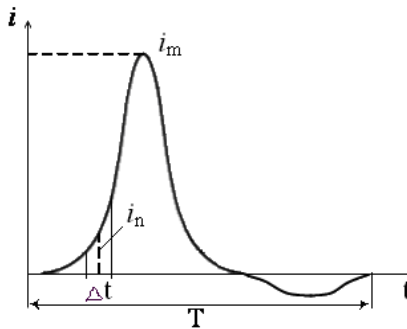


Рис. 3.10. К численному вычислению интеграла

Количественную оценку степени термического воздействия тока КЗ на проводники и электрические аппараты рекомендуется производить с помощью интеграла Джоуля

$$B_\kappa = \int_0^{t_{откл}} i_{\kappa t}^2 dt, \quad (3.23)$$

где  $i_{\kappa t}$  — ток КЗ в произвольный момент времени  $t$ , А;

$t_{откл}$  — расчетная продолжительность КЗ, с.

Интеграл Джоуля допускается определять приближенно как сумму интегралов от периодической и аperiodической составляющих тока КЗ, т.е.

$$B_\kappa = B_{\kappa,n} + B_{\kappa,a}, \quad (3.24)$$

где  $B_{\kappa,n}$  — интеграл Джоуля от периодической составляющей тока КЗ;

$B_{к.а}$  — интеграл Джоуля от аperiodической составляющей тока КЗ.

В случае, когда  $t_{откл} \geq 3T_{а.экв}$  интеграл Джоуля также допустимо определять по формуле:

$$B_{к} \approx I_{н.с}^2 t_{откл} + T_{а.экв}, \quad (3.25)$$

где  $I_{н.с}$  — действующее значение периодической составляющей тока КЗ от источника (системы), А;

$T_{а.эк}$  — эквивалентная постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с.

Расчетную продолжительность КЗ при проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость при КЗ следует определять сложением времени действия основной релейной защиты, в зону действия которой входят проверяемые проводники и аппараты, и полного времени отключения ближайшего к месту КЗ выключателя, а при проверке кабелей на невозгораемость — сложением времени действия резервной релейной защиты и полного времени отключения соответствующего выключателя.

При расчетной продолжительности КЗ до 1 с процесс нагрева проводников под действием тока КЗ допустимо считать адиабатическим, а при расчетной продолжительности более 1 с и при небыстродействующих АПВ следует учитывать теплоотдачу в окружающую среду.

В тех случаях, когда нагрузка проводника до КЗ близка к продолжительно допустимой, минимальное сечение проводника, отвечающее условию термической стойкости при КЗ, следует определять по формуле:

$$S_{мер \min} = \frac{\sqrt{B_{к}}}{C_{т}}, \quad (3.26)$$

Значения параметра  $C_{т}$  для жестких шин и кабелей принимаются по справочным данным [2].

Проверка выключателя на термическую стойкость при КЗ заключается в сравнении найденного при расчетных условиях значения интеграла Джоуля  $B_{к}$  с его допустимым для проверяемого

выключателя значением  $B_{к.дон}$ . Выключатель удовлетворяет условию термической стойкости, если выполняется условие

$$B_k \leq B_{тер.дон}. \quad (3.27)$$

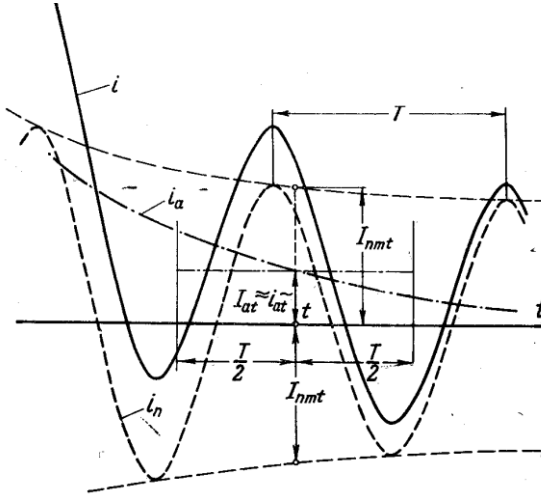


Рис. 3.11. Составляющие и полный ток КЗ

При упрощенных расчетах переходных процессов и наличии только периодической  $i_n$  и аperiodической  $i_a$  составляющих тока (рис. 3.11), которые определены по их значениям в середине рассматриваемого периода действующее значение периодической составляющей

$$I_{nt} = \frac{I_{nmt}}{\sqrt{2}}; \quad (3.28)$$

действующее значение аperiodической составляющей за один период равно мгновенному значению в момент, находящийся по середине данного периода

$$I_{at} = i_{at}. \quad (3.29)$$

Действующее значение полного тока в тот же момент будет равно:

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (3.30)$$

Наибольшее действующее значение полного тока короткого замыкания  $I_y$  имеет место за первый период переходного процесса. При условии  $i_{a(0)} = I_{nm}$ , его можно определить как:

$$I_y = \sqrt{I_n^2 + [k_y - 1 \sqrt{2} I_n]^2} = I_n \sqrt{1 + 2 k_y - 1^2}, \quad (3.31)$$

где  $k_y$  — ударный коэффициент,  $1 < k_y < 2$ .

Согласно этому, величина отношения  $I_y/I_n$  находится в пределах

$$1 < \frac{I_y}{I_n} < \sqrt{3}. \quad (3.32)$$

Следовательно, в расчетах переходных процессов апериодическая составляющая должна учитываться.

### ***3.6. Переходный процесс при включении трансформатора на холостом ходу***

Рассматриваемый процесс включения однофазного трансформатора с разомкнутой первичной обмоткой (рис. 3.12) полностью идентичен процессу включения катушки с ферромагнитным сердечником под синусоидальное напряжение и описывается уравнением [9]:

$$U_m \sin \omega t + \alpha = d\psi / dt + r i_\mu, \quad (3.33)$$

где  $U_m$  — амплитуда синусоидального напряжения;  $\alpha$  — фаза напряжения при  $t = 0$  (угол включения);  $\psi = n_1 \Phi$  — потокосцепление первичной обмотки;  $n_1$  — число витков первичной обмотки;  $\Phi$  — магнитный поток;  $i_\mu$  — мгновенное значение тока холостого хода;  $r$  — активное сопротивление первичной обмотки.

Магнитная характеристика трансформатора (характеристика холостого хода)  $\psi = f(i_\mu)$  нелинейна, следовательно, и дифференциальное уравнение (3.33) будет нелинейным.

Решить это дифференциальное уравнение можно, например, методом условной линеаризации [9], который заключается в следующем. Пусть второе слагаемое в первой части уравнения (3.33) мало по сравнению с первым. Такое условие соблюдается, например, при включении мощных трансформаторов, так как сопротивление  $r$  у них обычно незначительно. Поэтому второе слагаемое  $ri_\mu$  имеет второстепенное значение по сравнению с членом  $d\psi/dt$  и неточность его вычисления существенно не повлияет на определение параметров переходного процесса.

Зависимость  $\psi = L(i_\mu)i_\mu$  является нелинейной, так как  $L$  есть функция  $i_\mu$ , но в данном случае можно приближенно принять  $L = \text{const}$ , и связь между  $i_\mu$  и  $\psi$  становится линейной:

$$\psi = Li_\mu. \quad (3.34)$$

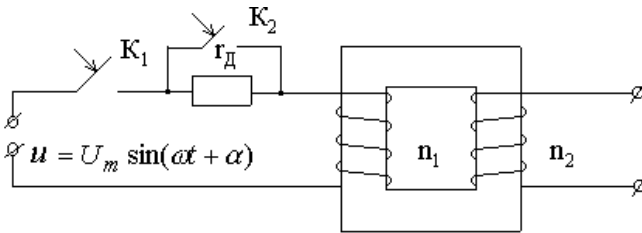


Рис. 3.12. Исследуемая схема включения однофазного трансформатора

Отсюда можно выразить  $i_\mu = \psi / L$  и подставить в уравнение (3.33). Тогда

$$U_m \sin \omega t + \alpha = d\psi/dt + r\psi / L. \quad (3.35)$$

Уравнение (3.35) становится линейным и имеет решение

$$\psi(t) = \Psi_m \sin(\omega t + \alpha - \phi) + Ae^{-r t/L}, \quad (3.36)$$

где  $\Psi_m = -U_m / \omega$  — амплитуда потокосцепления;  $(\alpha - \phi)$  — фаза включения потокосцепления; угол  $\phi = \text{arctg}(\omega L / r)$ . Так как

$r \ll (\omega L)$ , угол  $\phi \approx 90^\circ$ . Максимум потокоцепления соответствует фазе включения напряжения  $\alpha = 0^\circ$  и определяется уравнением:

$$\psi(t) = -\Psi_m \cos(\omega t) + \Psi_m e^{-t/L}, \quad (3.37)$$

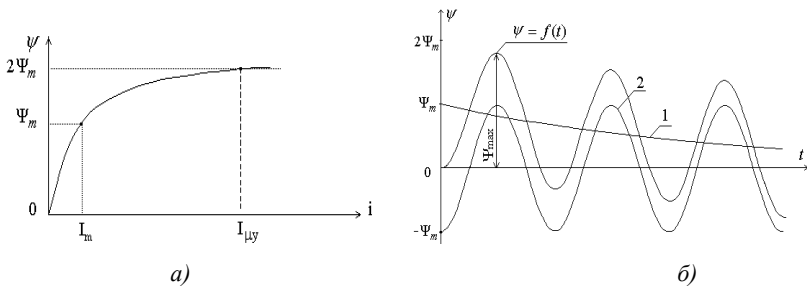
так как в этом случае  $A = -\Psi_m \sin(\alpha - \phi) = \Psi_m$ .

На рисунке 3.13 б приведена зависимость  $\psi(t)$  и ее составляющие —  $\psi' = \Psi_m e^{-t/L}$  и  $\psi'' = -\Psi_m \cos(\omega t)$ . Максимальное мгновенное значение потокоцепления  $\Psi_{\max}$  имеет место через половину периода, и при  $f = 50$  Гц можно записать

$$\Psi_{\max} = \Psi_m (1 + e^{-0,01 \cdot r/L}) = \Psi_m k_{\Psi y}. \quad (3.38)$$

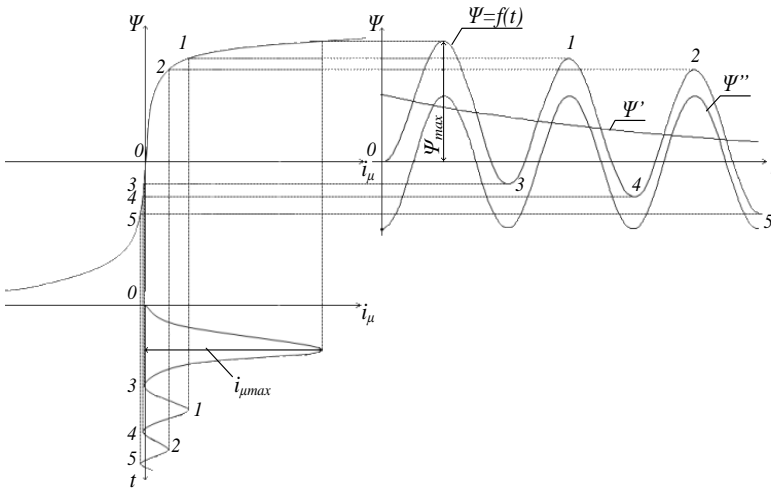
Из выражения (3.38) следует, что при большой постоянной времени  $T = L/r$  максимальное значение потокоцепления равно примерно  $\Psi_{\max} \approx 2\Psi_m$ , а ударный коэффициент [18]  $k_{\Psi y} = 2$ .

На рисунке 3.13 а приведена магнитная характеристика трансформатора. В установившемся режиме работы трансформатора амплитудное значение потокоцепления  $\Psi_m$  находится вблизи колена магнитной характеристики. Этому значению потокоцепления соответствует наибольшая по величине амплитуда тока  $I_m$ , но при включении трансформатора амплитуда потокоцепления превышает  $\Psi_m$  (рис. 3.13 б), рабочая точка переходит в область насыщения кривой, что приводит к очень большим броскам тока намагничивания.



**Рис. 3.13. Магнитная характеристика:**  
**а) трансформатора; б) кривая  $\psi = f(t)$  и ее составляющие**

На рисунке 3.14 показана форма тока, соответствующая зависимости  $\psi(t)$  и построенная по кривой намагничивания. Видно, что зависимость  $i_{\mu} = f(t)$  сильно отличается от синусоиды, особенно в начальной стадии переходного процесса.



**Рис. 3.14.** Кривая тока, соответствующая  $\psi = f t$  и построенная по кривой намагничивания

Наибольшее значение тока намагничивания  $i_{\mu y}$  — бросок намагничивающего тока возникает через полупериод (0,01 с). Величина  $i_{\mu y}$  может в десятки раз превосходить амплитуду тока установившегося режима  $I_m$ . Следовательно, в нелинейных цепях ударный коэффициент может значительно превосходить максимальное значение  $k_{iy} = 2$ . Такой всплеск тока может вызвать механические разрушения обмотки, так как электродинамические усилия пропорциональны квадрату тока.

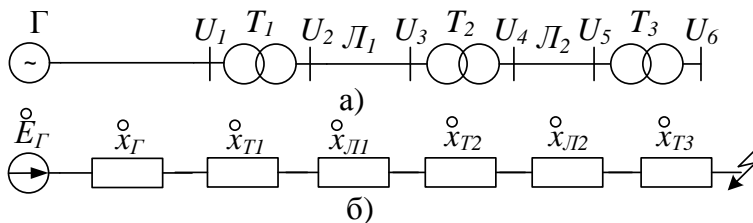
Оценка бросков намагничивающего тока  $i_{\mu y}$  важна и для правильной работы защиты трансформатора, которая не должна срабатывать при его включении. Для этого можно мощный ненагруженный трансформатор включить через дополнительное сопротивление  $r_{\partial}$ , которое затем необходимо замкнуть накоротко (рис. 3.12).

## 4. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

### 4.1. Принципы составления схем замещения

Перед расчетом переходного режима электрической системы на основе ее принципиальной схемы составляется расчетная схема. Она отличается от принципиальной тем, что на ней в однолинейном виде показываются только те элементы, по которым возможно протекание аварийных токов или их составляющих. При наличии в расчетной схеме трансформаторов необходимо имеющиеся в ней магнитносвязанные цепи представить одной эквивалентной электрически связанной цепью. При составлении схемы замещения рассчитываются ее параметры в именованных или относительных единицах, приведенные к основной ступени напряжения.

Рассмотрим схему рисунка 4.1.



*Рис. 4.1. Схема замещения*

Приведенные к основной ступени напряжения  $\overset{\circ}{U}_{осн} = U_6$  параметры генератора можно определить по известным из теории трансформатора формулам:



$$\overset{\circ}{E}_\Gamma = E_\Gamma \left( \frac{U_{\text{осн.}}}{U_5} \frac{U_4}{U_3} \frac{U_2}{U_1} \right) = E_\Gamma k_3 k_2 k_1 ;$$

$$\overset{\circ}{U}_\Gamma = U_\Gamma \left( \frac{U_{\text{осн.}}}{U_5} \frac{U_4}{U_3} \frac{U_2}{U_1} \right) = U_\Gamma k_3 k_2 k_1 ;$$

$$\overset{\circ}{I}_\Gamma = I_n \frac{1}{\frac{U_{\text{осн.}}}{U_5} \frac{U_4}{U_3} \frac{U_2}{U_1}} = I_n \frac{1}{k_3 k_2 k_1} ;$$

$$\overset{\circ}{Z}_\Gamma = Z_\Gamma \left( \frac{U_{\text{осн.}}}{U_5} \frac{U_4}{U_3} \frac{U_2}{U_1} \right)^2 = Z_\Gamma k_3 k_2 k_1^2 ;$$

$$\overset{\circ}{S}_\Gamma = S_\Gamma.$$

*Коэффициент трансформации  $k$*  — это отношение междуфазных напряжений холостого хода обмоток трансформатора по направлению от основной ступени к той ступени, элементы которой подлежат приведению.

При точном приведении в качестве основной ступени напряжения обычно принимается напряжение в месте КЗ. На рисунке 4.1 этому соответствует напряжение в месте КЗ  $U_{\text{осн}} = U_6$ .

В общем виде в соответствии с рисунком 4.1 приведение величин вида

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{E} &= E_n k_1 k_2 k_3 \dots k_n ; \quad \overset{\circ}{U} = U_n k_1 k_2 k_3 \dots k_n ; \\ \overset{\circ}{I} &= I_n \left( \frac{1}{k_1 k_2 k_3 \dots k_n} \right) ; \quad \overset{\circ}{Z} = Z k_1 k_2 k_3 \dots k_n^2 ; \\ \overset{\circ}{S} &= S \end{aligned} \quad (4.1)$$

называется точным приведением.

При приближенном приведении к одному классу напряжения коэффициенты трансформации определяются как отношение средних номинальных напряжений. При этом промежуточные напряжения сокращаются. Каждому классу соответствует свое среднее номинальное напряжение.

При приближенном приведении за основную ступень напряжения принимают среднее напряжение в соответствии с таблицей 4.1., т.е.:  $U_{осн} = U_{осн.ср}$ .

Таблица 4.1

**Значения средних напряжений**

Номинальное напряжение сети, кВ	Среднее напряжение, кВ	Номинальное напряжение сети, кВ	Среднее напряжение, кВ
1150	1175	Генераторное	13,8; 15,75; 16,5; 18; 20; 24; 27,5
750	770	10	10,5
500	515	6	6,3
330	340	3	3,15
220	230	0,66	0,69
150	154	0,38	0,4
110	115	0,22	0,23
35	37		

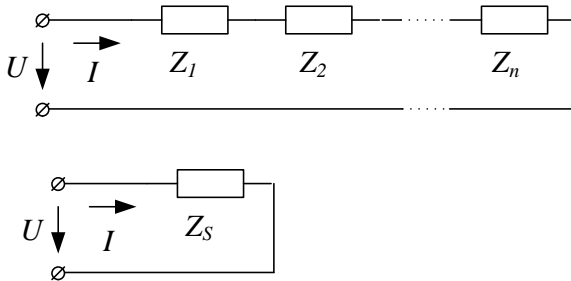
Приближенное приведение имеет вид:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{E} &= E \left( \frac{U_{осн.ср.}}{U_{н.ср.}} \right); \quad \overset{\circ}{U} = U_n \left( \frac{U_{осн.ср.}}{U_{н.ср.}} \right); \quad \overset{\circ}{I} = I_n \left( \frac{U_{н.ср.}}{U_{осн.ср.}} \right); \\ \overset{\circ}{Z} &= Z \left( \frac{U_{осн.ср.}}{U_{н.ср.}} \right)^2; \\ \overset{\circ}{S} &= S. \end{aligned} \tag{4.2}$$

**4.2. Методы преобразования схем замещения**

Для нахождения взаимного сопротивления между источником и точкой КЗ могут быть использованы методы, известные из теории линейных цепей: последовательное сложение сопротивлений, параллельное сложение сопротивлений, преобразование звезды в треугольник, треугольника в звезду, многолучевой звезды в полный многоугольник.

*Последовательное сложение сопротивлений.* Если элементы включены последовательно, то по ним протекает один и тот же ток (рис. 4.2).



**Рис. 4.2. Последовательное сложение сопротивлений**

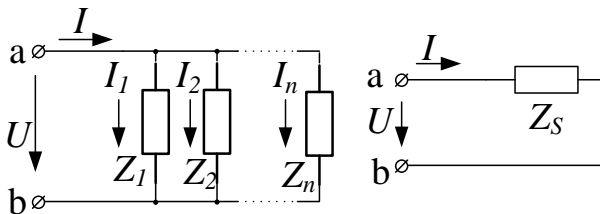
По второму закону Кирхгофа:  $U = IZ_1 + IZ_2 + \dots + IZ_n = I \sum_{i=1}^n Z_i$  ;

$$U = IZ_{\Sigma} .$$

Тогда

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (4.3)$$

*Параллельное сложение сопротивлений.* При одном и том же напряжении  $U$  между точками а и б исходной и эквивалентной схем входные токи  $I$  одинаковы (рис. 4.3).



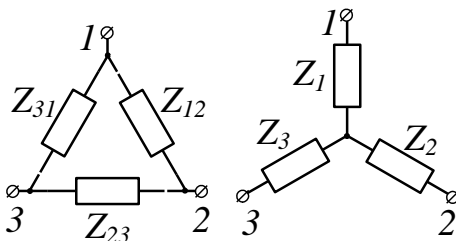
**Рис. 4.3. Параллельное сложение сопротивлений**

Тогда  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ ;  $I = Y_1 U + Y_2 U + \dots + Y_n U = U \sum_{i=1}^n Y_i$ ;

$I = Y_2 U$

$$Y_2 = \sum_{i=1}^n Y_i; \quad Z_2 = \frac{1}{Y_2}; \quad \frac{1}{Z_2} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \quad (4.4)$$

*Преобразование треугольника в звезду и звезды в треугольник.*



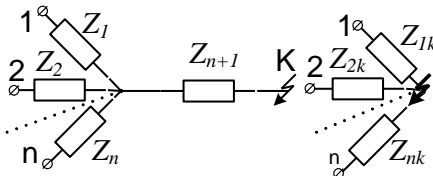
**Рис. 4.4.** Преобразование звезды в треугольник, треугольника в звезду

$$Z_1 = \frac{Z_{12}Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}; \quad Z_2 = \frac{Z_{12}Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}; \quad Z_3 = \frac{Z_{23}Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}. \quad (4.5)$$

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}; \quad Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1};$$

$$Z_{31} = Z_3 + Z_1 + \frac{Z_3 Z_1}{Z_2}. \quad (4.6)$$

*Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник*  
(рис. 4.5)



**Рис. 4.5.** Преобразование многолучевой звезды

$$Z_{1k} = Z_1 Z_{n+1} \sum \frac{1}{Z_i}, Z_{2k} = Z_2 Z_{n+1} \sum \frac{1}{Z_i}, \dots, Z_{nk} = Z_n Z_{n+1} \sum \frac{1}{Z_i}, \quad (4.7)$$

где  $Z_i = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n + Z_{n+1}$ .

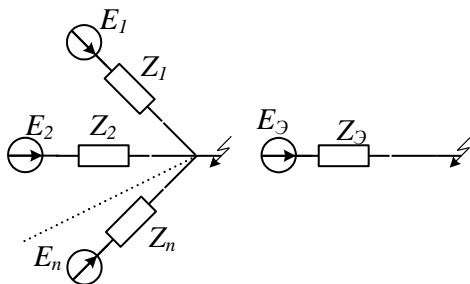


Рис. 4.6. Сложение активных ветвей

*Сложение активных ветвей*

$$E_{\mathcal{E}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_i}, \quad \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}. \quad (4.8)$$

При этом  $E_{\mathcal{E}}$  имеет средневзвешенное значение, т.е. ее величина всегда находится между большим и меньшим значением ЭДС исходной схемы.

Для двух ветвей с источником ЭДС и нагрузкой (рис. 4.7):

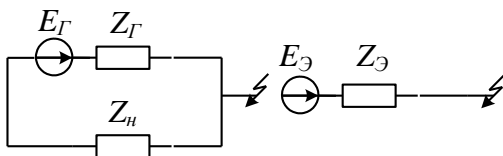
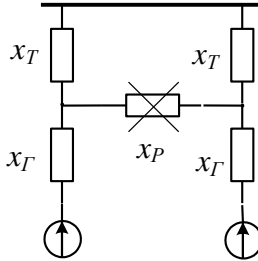


Рис. 4.7. Сложение двух ветвей

$$E_{\ominus} = \frac{EZ_n}{Z_r + Z_n}, \quad Z_{\ominus} = Z_r // Z_n. \quad (4.9)$$

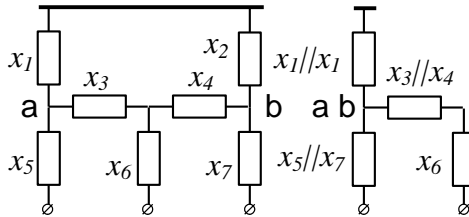
В ходе преобразований элементы, через которые не протекает ток в режиме КЗ, могут исключаться из расчетов (рис. 4.8).



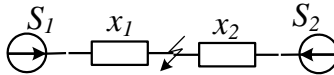
**Рис. 4.8.** Исключение из расчетов элементов

$$x_{\Sigma} = \frac{x_T + x_r}{2}.$$

Точки равного потенциала могут быть соединены накоротко (рис. 4.9).



**Рис. 4.9.** Объединение точек равного потенциала



**Рис. 4.10.** Объединение равноудаленных источников разной мощности

Равноудаленные источники разной мощности (рис. 4.10) можно объединить в один, если:  $\frac{S_1 x_1}{S_2 x_2} = 0,4 \dots 2,5$ .

При  $\frac{S_1}{S_2} > 20$ ,  $\frac{x_1}{x_2} < 0,05$  источником  $S_2$  можно пренебречь.

### 4.3. Система относительных единиц при расчетах КЗ

Выражение электрических величин в относительных единицах широко применяется в теории электрических машин. Это обусловлено тем, что представление любой величины не в именованных, а относительных единицах существенно упрощает теоретические выкладки и придает результатам расчета большую наглядность. Достоинства системы относительных единиц:

- 1) не нужно следить за обозначениями;
- 2) позволяет выбрать удобные для расчета числа;
- 3) основа теории подобия позволяет связать задачи поля с задачами расчета цепей:

$$L = \frac{\psi}{i}; E = \omega \psi; x = \omega L; x_* = \omega_* L_*, \text{ где } \omega_* = \frac{\omega}{\omega_{\bar{\sigma}}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{синх}}} = 1.$$

$$\text{Тогда: } x_* = L_*; E_* = \omega_* \psi_* = \psi_*; t_* = \frac{t}{t_{\bar{\sigma}}} = \omega_0 t_{(c)} = 314 t_{(c)}.$$

Под относительным значением какой-либо величины следует понимать ее отношение к другой одноименной величине, принятой за базисную:

$$f_{\bar{\sigma}} = \frac{f}{f_{\bar{\sigma}}}. \quad (4.10)$$

Следовательно, перед тем как представить какие-либо величины в относительных единицах, надо выбрать базисные единицы.

За базисный ток и базисное линейное напряжение принимают произвольные величины  $I_{\bar{\sigma}}$ ,  $U_{\bar{\sigma}}$ . Тогда базисная мощность трехфазной цепи будет определяться формулой:

$$S_{\bar{\sigma}} = \sqrt{3} U_{\bar{\sigma}} I_{\bar{\sigma}}, \quad (4.11)$$

а базисное сопротивление:

$$Z_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} I_{\delta}}. \quad (4.12)$$

Отсюда вытекает, что только две базисные величины могут быть выбраны произвольно, а остальные являются связанными. Обычно выбирается  $S_{\delta}$  и  $U_{\delta}$ . Причем выбранные базисные величины должны быть единичными для всей расчетной схемы и применяться как к полным величинам, так и к их отдельным составляющим. Следовательно, параметры электрической системы в относительных единицах при выбранных базисных условиях будут вычисляться по формулам:

$$E_{*\delta} = \frac{E}{U_{\delta}}; U_{*\delta} = \frac{U}{U_{\delta}}; I_{*\delta} = \frac{I}{I_{\delta}}; \quad (4.13)$$

$$S_{*\delta} = \frac{S}{S_{\delta}}; P_{*\delta} = \frac{P}{S_{\delta}}; Q_{*\delta} = \frac{Q}{S_{\delta}}; \quad (4.14)$$

$$Z_{*\delta} = \frac{Z}{Z_{\delta}} \quad r_{*\delta} = \frac{r}{Z_{\delta}} \quad x_{*\delta} = \frac{x}{Z_{\delta}}. \quad (4.15)$$

Здесь  $U, I, S, Z$  — параметры в именованных единицах. При расчетах токов КЗ приняты размерности расчетных параметров кВ, кА, МВ·А, МВт, Мвар, Ом. При этом все формулы не требуют дополнительных согласующих коэффициентов.

При задании паспортных данных оборудования в относительных единицах их параметры относят к номинальным параметрам элементов:

$$E_{*н} = \frac{E}{U_{н}}; U_{*н} = \frac{U}{U_{н}}; I_{*н} = \frac{I}{I_{н}}; S_{*н} = \frac{S}{S_{н}}; Z_{*н} = \frac{Z}{Z_{н}}. \quad (4.16)$$

Так, относительное сопротивление при номинальных условиях показывает относительное падение напряжения на элементе при протекании номинального тока, что придает физическую наглядность параметру:



$$Z_{*n} = \frac{Z}{Z_n} = \frac{Z_{(Om)}}{Z_{n(Om)}} = \frac{Z_{(Om)} I_n \sqrt{3}}{U_n} = \frac{\Delta U_\phi \sqrt{3}}{U_n} = \frac{\Delta U_\Delta}{U_n}.$$

При расчетах в системе относительных единиц исходные параметры обычно задаются либо в именованных единицах (и.е.) либо в относительных единицах (о.е.) при номинальных условиях элемента. При построении расчетных схем замещения требуется их перевод в относительные единицы при базисных условиях с обязательным приведением параметров на основную ступень.

При этом для построения расчетных формул требуется решение двух задач:

- 1) заданы параметры в и.е. — требуется их перевод в о.е. при базисных условиях с приведением на основную ступень;
- 2) заданы параметры в о.е. при номинальных условиях — требуется их перевод в о.е. при базисных условиях с приведением на основную ступень.

Рассмотрим порядок построения расчетных формул на примере сопротивлений и ЭДС.

- 1) Заданы  $Z_{(Om)}$ ,  $E_{(KB)}$ .

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{Z}_{*6} &= \frac{Z_{(Om)}}{Z_{6(Om)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = \frac{Z_{(Om)} \sqrt{3} I_\delta}{U_\delta} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = \\ &= Z_{(Om)} \frac{S_\delta}{U_\delta^2} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = Z_{(Om)} \frac{S_\delta}{U_\delta^{\circ 2}}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Здесь:  $U_\delta^\circ = U_\delta \frac{1}{(k_1 k_2 k_3 \dots k_n)}$  — базисное напряжение, приведенное на расчетную ступень.

$$\overset{\circ}{E}_{*6} = \frac{E_{(KB)}}{U_{6(KB)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n) = \frac{E_{(KB)}}{U_{6(KB)}^\circ}. \quad (4.18)$$

Формулы (4.17) и (4.18) являются формулами точного приведения. При приближенном приведении

$$\overset{\circ}{Z}_{*\bar{\sigma}} = \frac{Z_{(OM)}}{Z_{\bar{\sigma}(OM)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{н\bar{\nu}}} \right)^2 = \frac{Z_{(OM)} \sqrt{3} I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{н\bar{\nu}}} \right)^2 = Z_{(OM)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2} \left( \frac{U_{очн}}{U_{н\bar{\nu}}} \right)^2; \quad (4.19)$$

$$\overset{\circ}{E}_{*\bar{\sigma}} = \frac{E_{(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{н\bar{\nu}}} \right), \quad (4.20)$$

где  $U_{н\bar{\nu}}$  — номинальное напряжение ступени, где установлен элемент.

При обычно используемом условии  $U_{\bar{\sigma}} = U_{очн}$  формулы принимают вид:

$$\overset{\circ}{Z}_{*\bar{\sigma}} = Z_{(OM)} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{н\bar{\nu}}^2}; \quad \overset{\circ}{E}_{*\bar{\sigma}} = \frac{E_{(\kappa B)}}{U_{н\bar{\nu}(\kappa B)}} = \overset{\circ}{E}_{*н}. \quad (4.21)$$

2) Заданы  $Z_{*н}$ ,  $E_{*н}$ .

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{Z}_{*\bar{\sigma}} &= \frac{Z_{(OM)}}{Z_{\bar{\sigma}(OM)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = \frac{Z_{*н} Z_{н}}{Z_{\bar{\sigma}(OM)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = \\ &= \frac{Z_{*н} U_{нн} \sqrt{3} I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}} \sqrt{3} I_{н}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = Z_{*н} \frac{S_{\bar{\sigma}} U_{нн}^2}{S_{н} U_{\bar{\sigma}}^2} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n)^2 = \quad (4.22) \\ &= Z_{*н} \frac{S_{\bar{\sigma}} U_{нн}^2}{S_{н} U_{\bar{\sigma}}^2}; \end{aligned}$$

$$\overset{\circ}{E}_{*\bar{\sigma}} = \frac{E_{(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n) = \frac{E_{*н} U_{нн(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}} (k_1 k_2 k_3 \dots k_n) = \frac{E_{*н} U_{нн(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}}. \quad (4.23)$$

Здесь  $U_{нн}$  — номинальное паспортное напряжение элемента.

Формулы (4.22) и (4.23) являются формулами точного приведения. При приближенном приведении

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{Z}_{*\bar{\sigma}} &= \frac{Z_{(OM)}}{Z_{\bar{\sigma}(OM)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right)^2 = \frac{Z_{*н} Z_{н}}{Z_{\bar{\sigma}(OM)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right)^2 = \frac{Z_{*н} U_{нн} \sqrt{3} I_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}} \sqrt{3} I_{н}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right)^2 = \\ &= Z_{*н} \frac{S_{\bar{\sigma}} U_{нн}^2}{S_{н} U_{\bar{\sigma}}^2} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right)^2 = Z_{*н} \frac{S_{\bar{\sigma}} U_{нн}^2}{S_{н} U_{\bar{\sigma}}^2}; \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\overset{\circ}{E}_{*\bar{\sigma}} = \frac{E_{(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right) = \frac{E_{*н} U_{нн(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}} \left( \frac{U_{очн}}{U_{ну}} \right) = \frac{E_{*нн} U_{нн(\kappa B)}}{U_{\bar{\sigma}(\kappa B)}}. \quad (4.25)$$

При обычно используемых условиях  $U_{\bar{\sigma}} = U_{очн}$  и  $U_{нн} = U_{ну}$  формулы принимают вид:

$$\overset{\circ}{Z}_{*\bar{\sigma}} = Z_{*н} \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{н}}; \quad \overset{\circ}{E}_{*\bar{\sigma}} = E_{*н}. \quad (4.26)$$

В дальнейшем индекс приведения будет опускаться.

#### 4.4. Определение сопротивления элементов электрических систем и их схемы замещения

Формулы определения сопротивлений приведены в относительных единицах при приближенном приведении к базисным условиям.

*Генераторы.* У генераторов практически никогда не учитывается активное сопротивление, так как оно пренебрежительно мало по сравнению с индуктивным. Номинальное сопротивление генератора в относительных единицах  $x_{*н}$  может быть определено из паспортных данных:

—  $x_d$ ,  $x_q$  — синхронные сопротивления по продольной и поперечной оси, которые характеризуют установившийся режим.

—  $x'_d$  и  $x'_q$ ,  $x''_d$  и  $x''_q$  — переходные и сверхпереходные сопротивления в момент времени  $t = 0$ .

—  $x_2$ ,  $x_0$  — сопротивления обратной и нулевой последовательностей.

Номинальное сопротивление генератора в относительных единицах при базисных условиях определяется формулой:

$$x_c = x_{*н} \frac{S_{\sigma}}{S_n}.$$

*Двигатели.* Параметры синхронных электродвигателей определяются аналогично генераторам.

*Реакторы.* Токоограничивающие реакторы могут иметь различное устройство и конструктивное исполнение, а также технические и технико-экономические характеристики и параметры.

*Линейные реакторы,* включаемые последовательно в соответствующую линию, ограничивают ток КЗ и поддерживают относительно высокий уровень остаточного напряжения. Сопротивление линейного реактора можно определить по формуле:

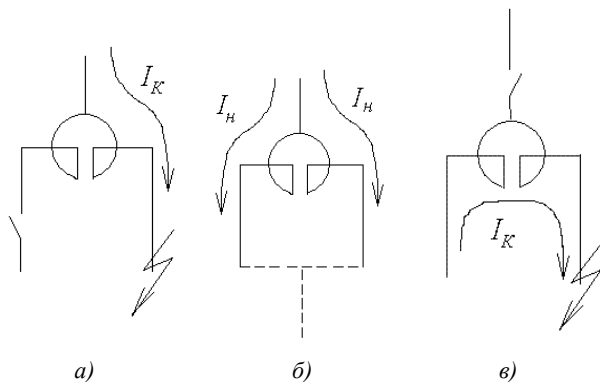
$$x_p = x_p(Ом) \frac{S_{\sigma}}{U_{нр}^2}, \text{ где } x_p(Ом) \text{ лежит в пределах } 0,1 \dots 0,4 \text{ Ом.}$$

*Сдвоенный реактор* обладает лучшими характеристиками. Между ветвями реактора существует магнитная связь, которая в сквозном режиме позволяет уменьшить потери напряжения в реакторе. Коэффициент магнитной связи идентичных ветвей обмотки реактора равен:

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L} \approx 0,4 \dots 0,6.$$

Сдвоенный реактор имеет 3 режима работы (рис. 4.11)

*Одноцепный режим* (рис. 4.11 а). В одноцепном режиме общее сопротивление реактора определяется как сопротивление одной его ветви:  $x_{робщ.} = x_p.$



**Рис. 4.11. Режимы работы сдвоенного реактора**

*Двухцепный (сквозной) режим* (рис. 4.11 б). Двухцепный режим — это нормальный режим работы реактора. В таком режиме магнитные потоки ветвей направлены встречно, что вызывает уменьшение индуктивного сопротивления одной ветви.

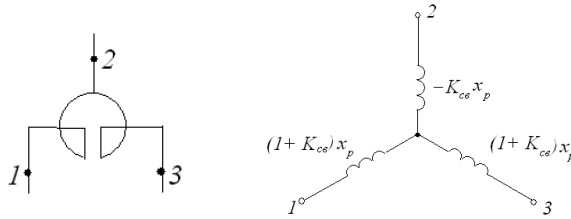
Индуктивное сопротивление одной ветви:  $x_1 = (1 - K_{св})x_p$ .

Общее индуктивное сопротивление:  $x_{p\text{общ.}} = \frac{1}{2}(1 - K_{св})x_p$ .

*Продольный режим* (рис. 4.11 в). В продольном режиме магнитные потоки ветвей направлены согласно и индуктивность ветви увеличивается.

$$x_1 = (1 + K_{св})x_p; \quad x_{p\text{общ.}} = 2(1 + K_{св})x_p.$$

Каждый режим работы реактора может быть представлен своей схемой замещения. Активное сопротивление обычно не учитывается, но оно может быть найдено по потерям активной мощности в реакторе. На рисунке 3 приведена общая схема замещения сдвоенного реактора.



**Рис. 4.12.** Обозначение сдвоенного реактора и его схема замещения

Рассмотрим пример. Используя схему замещения (рис. 4.12), определим сопротивление реактора в одноцепном, сквозном и продольном режимах. Коэффициент связи равен  $K_{ce} = 0,5$ .

В режиме КЗ (одноцепном):

$$x_{p\text{общ}} = (1 + K_{ce})x_p - K_{ce}x_p = (1 + 0,5)x_p - 0,5x_p = x_p.$$

В нормальном (сквозном) режиме:

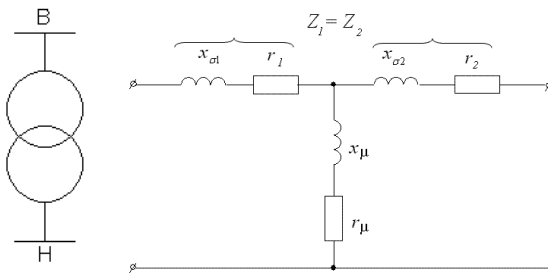
$$x_{p\text{общ}} = \frac{1}{2}(1 + K_{ce})x_p - K_{ce}x_p = \frac{1}{2}(1 + 0,5)x_p - 0,5x_p = 0,25x_p.$$

В продольном режиме:

$$x_{p\text{общ}} = 2(1 + K_{ce})x_p = 2(1 + 0,5)x_p = 3x_p.$$

### Трансформаторы

*Двухобмоточный трансформатор.* Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рисунке 4.13.



**Рис. 4.13.** Условное обозначение и схема замещения двухобмоточного трансформатора

Параметры схемы замещения производятся по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

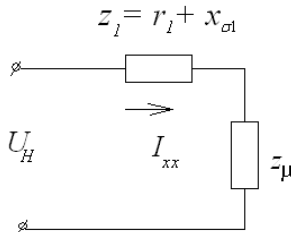
*Опыт холостого хода* (рис. 4.14) позволяет определить ток холостого хода  $I_{xx}$ , потери в ветви намагничивания  $\Delta P_{xx}$  и сопротивление холостого хода.

Потери холостого хода:

$$\Delta P_{xx} = I_{xx}^2 (r_1 + r_\mu) \approx I_{xx}^2 r_\mu$$

Сопротивление холостого хода:

$$z_1 + z_\mu = \frac{U_H}{\sqrt{3}I_{xx}} \approx z_\mu; r_* = \frac{\Delta P S_\delta}{S_n S_H}.$$



**Рис. 4.14. Опыт холостого хода**

*Опыт короткого замыкания* (рис. 4.15) позволяет определить напряжение короткого замыкания и потери короткого замыкания:

$z_T = \frac{u_{к, \%}}{100} \frac{S_\delta}{S_H}$ , следовательно, индуктивное сопротивление рассеивания определяется как  $x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}$ .

Напряжение короткого замыкания  $u_k = (4...13)\%$ .

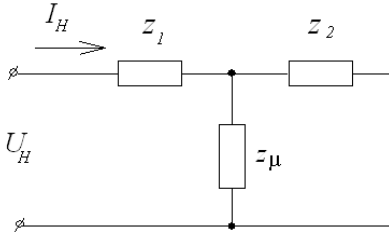


Рис. 4.15. Опыт короткого замыкания

Потери короткого замыкания:  $\Delta P_k = 3I_n^2 r_\phi$ .

Активное сопротивление трансформатора:  $r_\phi (Ом) = \frac{\Delta P_k}{3I_n^2}$ .

Пренебрегая ветвью намагничивания  $z_\mu$ , получим упрощенную схему замещения (рис. 4.16):

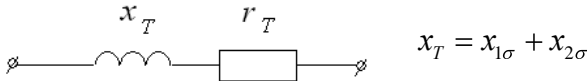


Рис. 4.16. Схема замещения

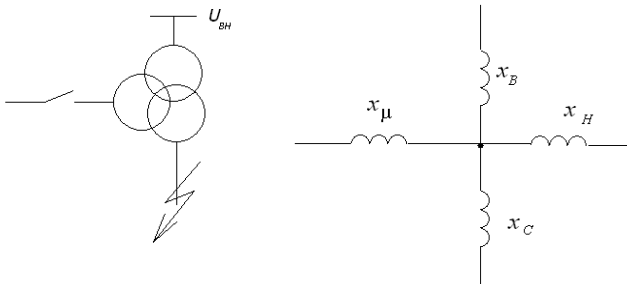
Активное сопротивление трансформатора в относительных единицах, приведенное к базисным условиям:

$$\dot{r}_{T^* \sigma} = \frac{r_\phi}{r_\sigma} \frac{U_\sigma^2}{U_n^2} = r_\phi \frac{S_\sigma}{U_\sigma^2} \frac{U_\sigma^2}{U_n^2} = \frac{\Delta P_k}{3I_n^2} \frac{S_\sigma}{U_n^2} = \frac{\Delta P_k (\sqrt{3}U_n)^2}{3S_n^2} \frac{S_\sigma}{U_n^2} = \frac{\Delta P_k}{S_n} \frac{S_\sigma}{S_n} = r_{*H} \frac{S_\sigma}{S_n},$$

где  $r_{*H} = \frac{\Delta P_{к, \%}}{100}$  — номинальное активное сопротивление в относительных единицах.



## Трехобмоточный трансформатор



**Рис. 4.17.** Условное обозначение и схема замещения трехобмоточного трансформатора

В относительных единицах напряжения короткого замыкания обмоток будут равняться их сопротивлениям рассеивания и их значения для обмоток высшего, среднего и низшего напряжений трехобмоточного трансформатора могут быть определены по формулам:

$$u_{KBH} = x_{BH} = x_B + x_H$$

$$u_{KCH} = x_{CH} = x_C + x_H, \text{ где } u_K = \frac{U_{к, \%}}{100};$$

$$u_{KBC} = x_{BC} = x_B + x_C$$

$$x_B = \frac{1}{2}(x_{BH} + x_{BC} - x_{CH}) \frac{S_{\delta}}{S_{HB}}$$

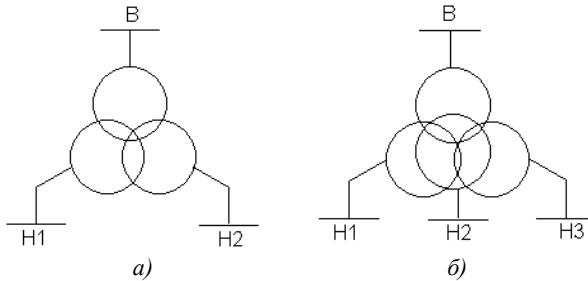
$$x_C = \frac{1}{2}(x_{BC} + x_{CH} - x_{BH}) \frac{S_{\delta}}{S_{HC}}$$

$$x_H = \frac{1}{2}(x_{BH} + x_{CH} - x_{BC}) \frac{S_{\delta}}{S_{HH}}$$

Данные формулы справедливы и для автотрансформатора,  $x_{\mu}$  обычно в расчеты не вводится.

*Трансформатор с расщепленной обмоткой.* На электростанциях и подстанциях применяются силовые трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, так как это позволяет существенно снизить ток КЗ в сетях низшего

напряжения. Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой используются для формирования крупных блоков электростанций, особенно на ГЭС.



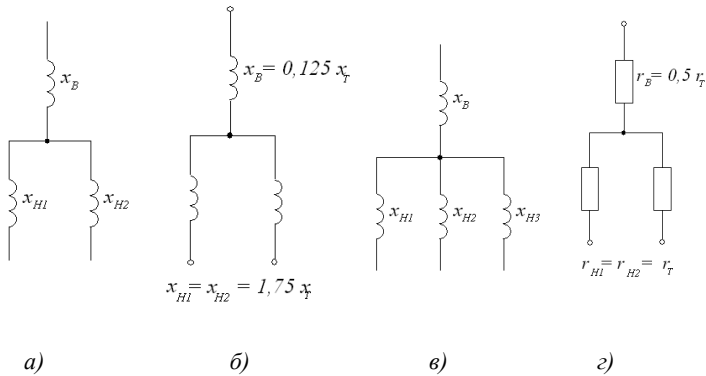
**Рис. 4.18. Условное обозначение трансформатора с расщепленной обмоткой:**  
*а) обмотка низшего напряжения расщеплена на 2 части;*  
*б) обмотки низшего напряжения расщеплена на 3 части*

Сопротивление трансформатора с расщепленной обмоткой характеризуется следующими параметрами:

- сопротивление расщепления  $x_{расц}$ , равное сопротивлению между выводами двух произвольных частей расщепленной обмотки;
- сквозное сопротивление  $x_{скв}$ , равное сопротивлению между выводами обмотки высшего напряжения и объединенными выводами частей расщепленной обмотки низшего напряжения;
- коэффициент расщепления  $k_{расц}$ , равный отношению сопротивления расщепления к сквозному сопротивлению:

$$k_{расц} = \frac{x_{расц}}{x_{скв}}.$$

При расщеплении обмотки на две части  $k_{расц} \leq 4$  (рис. 4.18 а), а при расщеплении на три части  $k_{расц} \leq 6$  (рис. 4.18 б). Коэффициент расщепления также зависит от исполнения трансформатора, например, для трансформатора броневого исполнения (рис. 4.18 а) при отсутствии других данных следует принимать  $k_{расц} = 3,5$ . Для группы однофазных трансформаторов  $k_{расц} = 4$ .



**Рис. 4.19** Схемы замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

Сопротивление рассеивания обмоток трансформатора:

$$x_T = x_{скв} = \frac{U_{к, \% скв}}{100} \frac{S_{б}}{S_{HT}}$$

При расщеплении низшей обмотки на 2 части (рис. 4.19 а) сопротивление обмоток низшего напряжения:

$$x_{H1} = x_{H2} = \frac{x_{расц}}{2} = \frac{k_{расц} x_{скв}}{2}$$

Сопротивление обмотки высшего напряжения:

$$x_B = x_{скв} - \frac{x_H}{2} = x_{скв} - \frac{k_{расц} x_{скв}}{2 \cdot 2} = \left(1 - \frac{k_{расц}}{4}\right) x_{скв}$$

Для трансформатора строжневого типа и  $k_{расц} = 3,5$  схемы замещения для активных и индуктивных сопротивлений приведены на рис. 4.19 б, в.

При расщеплении низшей обмотки на 3 части (рис. 4.19 г) сопротивление обмотки высшего напряжения:  $x_B = \left(1 - \frac{k_{расц}}{6}\right) x_T$ .

Сопротивление обмоток низшего напряжения:

$$x_{H1} = x_{H2} = x_{H3} = \frac{k_{расц} x_T}{2}.$$

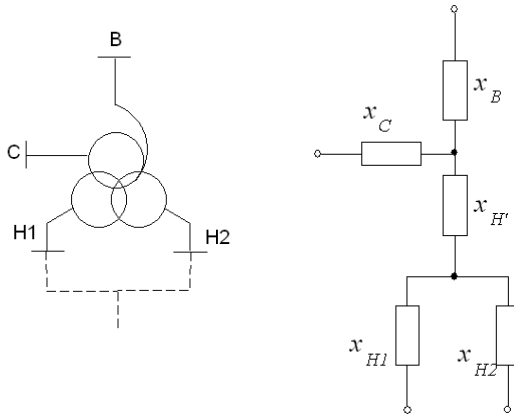
*Пример.* Автотрансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения на 2 части (рис. 4.20).

Сопротивление расщепленных обмоток низшего напряжения:

$$x_{H1} = x_{H2} = \frac{x_{HH}}{2}; x'_H = x_H - \frac{x_{HH}}{4}.$$

Сопротивления обмоток высшего, среднего и низшего напряжений:

$$x_B = \frac{1}{2}(x_{BH} + x_{BC} - x_{CH}); x_C = \frac{1}{2}(x_{BC} + x_{CH} - x_{BH}); x_H = \frac{1}{2}(x_{BH} + x_{CH} - x_{BC});$$



**Рис. 4.20. Автотрансформатор с расщепленной обмоткой и его схема замещения**

## 5. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

### 5.1. Основные характеристики и параметры

*Установившийся режим короткого замыкания* — это та стадия переходного процесса, когда затухли все возникшие в начальный момент времени свободные токи и полностью закончился подъем возбуждения от действия системы АРВ.

Расчет установившихся режимов короткого замыкания ничем не отличается от расчета установившихся нагрузочных режимов, однако он сопровождается большими токами.

Основными характеристиками и параметрами машины в установившемся режиме короткого замыкания являются:

- 1) характеристики холостого хода и короткого замыкания;
- 2) синхронное индуктивное сопротивление;
- 3) предельное (потолочное) возбуждение;
- 4) векторная диаграмма.

Приведем основные условные обозначения индексов параметров электрических машин:

- $a$  — статор;
- $d, q$  — продольная и поперечная оси ротора;
- $\sigma$  — рассеивание;
- $\delta$  — воздушный зазор;
- $f$  — обмотка возбуждения;
- $1d, 1q$  — демпферные обмотки по продольной и поперечной оси (успокоительные обмотки, например, беличья клетка);
- $'$  — начальный момент без демпферной обмотки;
- $''$  — начальный момент с демпферной обмоткой.

Пример:  $x_{\delta 2d}$  — сопротивление рассеивания второй демпферной обмотки по продольной оси.

Рассмотрим каждую характеристику отдельно.

*Характеристики холостого хода (Х.Х.) и короткого замыкания (К.З).*

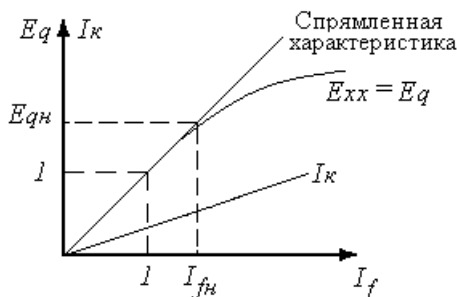


Рис. 5.1. Зависимость ЭДС и тока КЗ от тока возбуждения

Если машина работает на холостом ходу при номинальном напряжении, то она имеет единичное возбуждение. Для иллюстрации этого рассмотрим зависимость ЭДС от тока возбуждения.

На рисунке 5.1 вследствие насыщения  $E_{q*} \neq I_{f*}$  наблюдается изгиб кривой тока при ХХ. При спрямлении характеристики можно принять  $E_{q*} = I_{f*}$ .

Синхронное индуктивное сопротивление определяется для продольной и поперечной оси электрической машины на основе схем замещения.

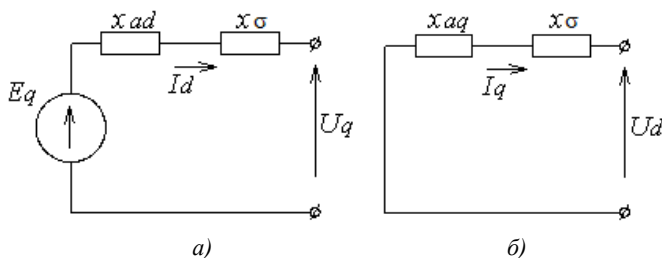


Рис. 5.2. Схема замещения синхронной машины по осям:  
а) продольной; б) поперечной

Из рисунка 5.2 видно, что синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси определяется как

$$x_d = x_{\sigma} + x_{ad}, \quad (5.1)$$

где  $x_d$  — сопротивление по продольной оси;

$x_{\sigma}$  — сопротивление рассеивания;

$x_{ad}$  — сопротивление реакции статора по продольной оси.

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси определяется как

$$x_q = x_{\sigma} + x_{aq}, \quad (5.2)$$

где  $x_q$  — сопротивление по поперечной оси;

$x_{\sigma}$  — сопротивление рассеивания;

$x_{aq}$  — сопротивление реакции статора по поперечной оси.

Для явнополусной синхронной машины (гидрогенератор, тихоходный синхронный двигатель) соотношение синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям выглядит следующим образом:

$$x_d \neq x_q, \quad x_q \approx 0,6 x_d. \quad (5.3)$$

Для неявнополусной машины (турбогенератор, турбодвигатель):

$$x_d = x_q. \quad (5.4)$$

Максимальная мощность двухполусных генераторов — 1,2 ГВт, максимальная скорость вращения при этом — 3000 об/мин.

С другой стороны, синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси:

$$x_d = \frac{C}{OK3} = \frac{1}{OK3}, \quad \text{где } OK3 = \frac{I_{i_f=1 \text{ КЗ}}}{I_n} = k_c.$$

Для турбогенераторов:  $k_c \approx 0,9$ ,  $x_d \approx 1,43$ .

Для гидрогенераторов:  $k_c \approx 1,1$ ,  $x_d \approx 0,9$ .

Учет явнополусности при расчете токов короткого замыкания в установившемся режиме уточняет расчет не более чем на 3% и при практических расчетах явнополусность не учитывается.

*Предельное (потолочное) возбуждение* определяется типом возбудителя и термической стойкостью обмотки возбуждения.

В расчете предельное возбуждение учитывается при расчетах с АРВ.

При спрямлении характеристики холостого хода в относительных единицах:

$$I_{*fnp} = E_{qnp*}. \text{ Обычно } I_{*fnp} = (3...5)I_{fn}.$$

Векторная диаграмма дана на рисунке 5.4 для турбогенератора при  $x_d = x_q$ , для схемы замещения — на рисунке 5.3.

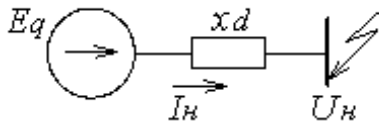


Рис. 5.3. Схема замещения турбогенератора по продольной оси

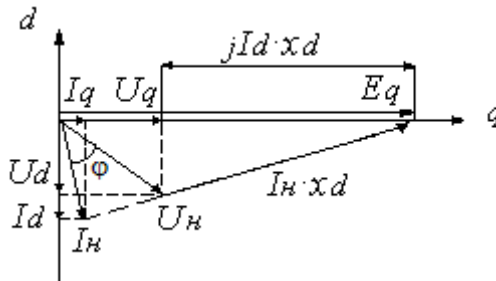


Рис. 5.4. Векторная диаграмма турбогенератора

Из векторной диаграммы определяем фазную ЭДС по поперечной оси

$$E_q = \sqrt{U_n \cos \phi^2 + U_n \sin \phi + I_n x_d^2}, \quad (5.5)$$

где  $U_n$  — номинальное фазное напряжение.

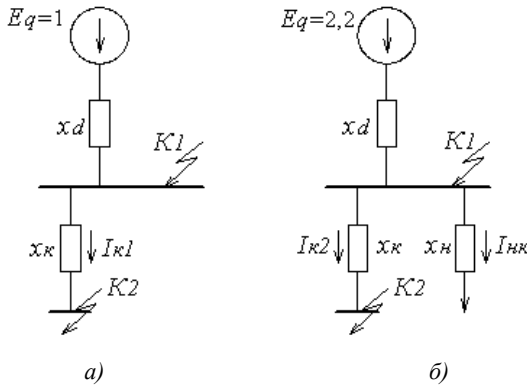
В относительных единицах  $U_{n*} = 1$ .



## 5.2. Учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания

Нагрузка, подключенная до короткого замыкания, увеличивает ЭДС и, следовательно, ток короткого замыкания и перераспределяет токи при КЗ

Как правило, в практических расчетах комплексную нагрузку заменяют на индуктивную  $x_n$ . Для определения этого сопротивления рассмотрим следующие расчетные схемы:



**Рис. 5.5. Расчетные схемы замещения  
а) без учета нагрузки; б) с учетом нагрузки**

Из схемы (рис. 5.5 б) до КЗ в номинальном режиме при  $U = U_n$ :

$$I_n = \frac{U_n}{x_n}; I_n = \frac{E_q}{x_d + x_n}.$$

Приравнявая токи, получаем:

$$x_n = x_d \frac{U_n}{E_q - U_n}. \quad (5.6)$$

Для турбогенератора, у которого  $x_d \approx 1,43$ ;  $E_q = 2,2$ ;  $U_n = 1$ , индуктивное сопротивление нагрузки равно  $x_n = \frac{1,43 \cdot 1}{2,2 - 1} \approx 1,2$ .

Это сопротивление отнесено к номинальной мощности нагрузки, номинальному напряжению ступени, куда нагрузка подключена.

Сопротивление нагрузки в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_{н*б} = 1,2 \frac{S_{б}}{S_{нагр}} . \quad (5.7)$$

В том случае, когда сопротивление нагрузки не вводят в схему замещения, ее влияние учитывают увеличением ЭДС. В этом случае ток в месте КЗ будет равен току генератора при КЗ, что вносит погрешность в расчет.

### 5.3. Расчет установившегося режима КЗ при отсутствии и наличии АРВ

При отсутствии у генератора системы АРВ расчет установившегося режима трехфазного КЗ сводится к решению задачи нахождения токов и напряжений в линейной схеме, в которой известны все сопротивления и ЭДС.

*Расчет при отсутствии АРВ:* Ток генератора при КЗ для расчетной схемы (рис. 5.6 а) определяется

$$I_{Гк} = \frac{E_q}{x_d + \frac{x_n x_k}{x_n + x_k}} . \quad (5.8)$$

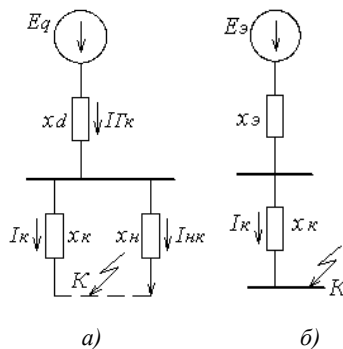


Рис. 5.6. Расчетная схема замещения без АРВ

Для нахождения тока  $I_{\kappa}$  воспользуемся правилом эквивалентирования, согласно которому эквивалентные ЭДС, сопротивление и ток короткого замыкания определяются

$$E_{\vartheta} = \frac{\sum E_i Y_i}{\sum Y_i} = \frac{E_q x_n}{x_d + x_n}; \quad x_{\vartheta} = \frac{1}{\sum Y_i}; \quad I_{\kappa} = \frac{E_{\vartheta}}{x_{\vartheta} + x_{\kappa}}. \quad (5.9)$$

При наличии АРВ возможны два режима (рис. 5.7 а, б).

1. Режим номинального напряжения (рис. 5.7 а). При этом система АРВ генератора справилась с подъемом напряжения, т.е.  $U_T = U_n$ . Ток КЗ (рис. 5.8 а) будет определяться

$$I_{\kappa} = \frac{U_n}{x_{\kappa}}. \quad (5.10)$$

То есть имеет место далекое короткое замыкание,  $x_{\text{вн}} \geq x_{\text{кр}}$ ;

$$I_{\kappa} < I_{\text{кр}} = \frac{U_n}{x_{\text{кр}}}.$$

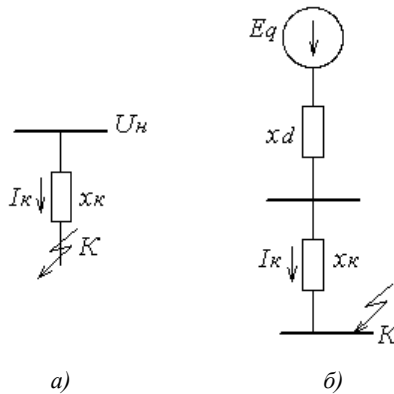


Рис. 5.7. Расчетная схема замещения с АРВ

2. Режим предельного возбуждения. Система возбуждения генератора не справилась с подъемом напряжения, т.е.  $U_T < U_n$ . В этом случае ЭДС генератора по поперечной оси будет определяться предельным возбуждением, т.е. имеет место следующее соотношение:  $E_q = E_{qnp}$ .

Таким образом, ток короткого замыкания, согласно схеме рисунка 5.7 б, равен

$$I_{\kappa} = \frac{E_{qnp}}{x_d + x_{\kappa}}. \quad (5.11)$$

Здесь имеет место близкое короткое замыкание  $x_{вн} \leq x_{кр}$ ;  
 $I_{\kappa} > I_{кр}$ .

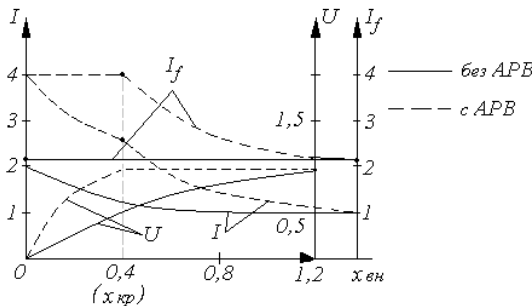
При  $x_{\kappa} = x_{кр}$  справедливы обе формулы.

Приравнявая (5.10) и (5.11) при  $x_{\kappa} = x_{кр}$ , получим выражение для критического сопротивления:

$$x_{кр} = \frac{x_d U_n}{E_{qnp} - U_n}. \quad (5.12)$$

Пример:  $x_d \approx 1,2$ ;  $E_{qnp} = I_{фпр} = 4$ . Тогда  $x_{кр} = 0,4$ , ток  $I_{кр} = \frac{U_n}{x_{кр}} = 2,5$ .

Оба случая представлены на зависимости (рис. 5.8).



**Рис. 5.8. Зависимости тока возбуждения, напряжения генератора и тока КЗ от  $x_{вн}$**

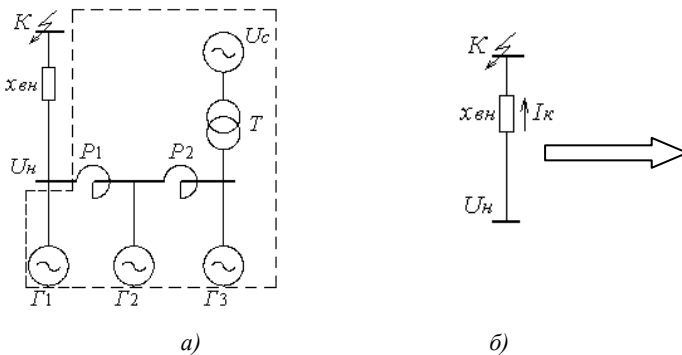
Сложные схемы рассчитываются методом последовательного приближения.

1. Для каждого из генераторов произвольно задаются режимом предельного возбуждения относительно места КЗ, т.е. водят генератор в схему со своими  $E_{qnp}$  и  $x_d$  либо  $U_n$ ,  $x_d = 0$ .

2. Производят расчет схемы и сравнивают наибольшие токи генераторов с их критическими токами. Для этого используются следующие критерии:

- режим номинального напряжения  $I_{iГ} \leq I_{iкр}$ ;
- режим предельного возбуждения  $I_{iГ} \geq I_{iкр}$ .

При этом ток  $I_{ki} = \frac{U_n}{x_{кри}}$ , где  $x_{кри} = \frac{x_{di} U_n}{E_{qпр} + U_n}$ .



**Рис. 5.9. Пример сложной развитой схемы**

Если генератор работает в режиме номинального напряжения (рис. 5.9), обведенную штриховой линией часть схемы можно отбросить и определить ток КЗ, как показано на рисунке 5.9 б):

$$I_{к} = \frac{U_n}{x_{ен}}. \quad (5.13)$$

## 6. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВНЕЗАПНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА

### 6.1. Баланс магнитных потоков. Переходные параметры синхронной машины

При рассмотрении начального момента внезапного изменения режима синхронную машину можно рассматривать как трансформатор [9]. Исследование начального момента произведем на основе принципа сохранения начального потокосцепления для выявления неизменной ЭДС и сопротивления при переходе от рабочего режима к режиму КЗ. Для машины без демпферных обмоток эти параметры носят название переходных. Рассмотрим изменение периодической составляющей для машины с параметрами, приведенными к статору в системе относительных единиц. Индексы комплексных величин опускаются.

Рассмотрим картину магнитного поля синхронной машины.

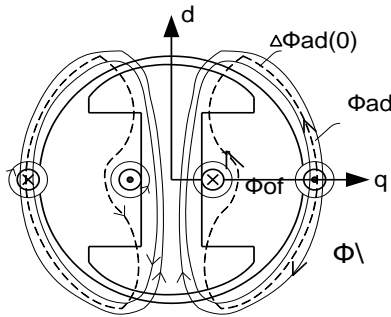


Рис. 6.1. Картина магнитного поля в явнополюсной синхронной машине

Магнитный поток, сцепленный с ротором в момент внезапного изменения режима, остается неизменным. Кроме того, соответствующая ему ЭДС, наведенная в статоре, в тот же момент также остается неизменной. То есть для синхронной машины условия в начальный момент переходного процесса аналогичны тем же условиям для трансформатора, питаемого источником синусоидального напряжения.

Баланс магнитных потоков будет выглядеть следующим образом.

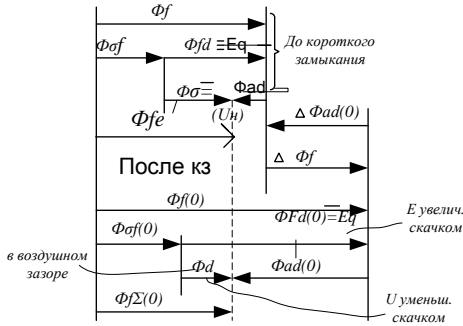


Рис. 6.2. Баланс магнитных потоков в синхронной машине

Из рисунка 6.2 видно, что при внезапном изменении режима остается неизменным результирующий магнитный поток, сцепленный с обмоткой возбуждения:

$$\begin{aligned}\Phi_{f\Sigma} &= \text{const}; \\ \Psi_{f\Sigma} &= \text{const}.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Часть этого потока, которая связана со статором, с учетом  $\sigma_f$  — коэффициента рассеивания обмотки возбуждения, т.е.  $\Psi'_d = \Psi_{f\Sigma} - \sigma_f \Psi_{f\Sigma}$  наводит ЭДС в обмотке статора. Назовем эту ЭДС — *переходной ЭДС*  $E'_q$ . Она определяется:

$$\begin{aligned}\Psi'_d &= \Psi_{f\Sigma} - \sigma_f \Psi_{f\Sigma} = (1 - \sigma_f) \Psi_{f\Sigma} = (1 - \sigma_f) (\Psi_{ad} + \Psi_f) = \\ &= \left[ 1 - \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] (I_d x_{ad} + I_f (x_{\sigma f} + x_{ad})) = \\ &= \left[ \left( \frac{x_{\sigma f} + x_{ad} - x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) \right] (I_d x_{ad} + I_f (x_{\sigma f} + x_{ad})) \\ &= \left[ \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] I_d + I_f x_{ad}.\end{aligned}\tag{6.2}$$

Из (6.2) получаем следующее

$$\Psi'_d = \left[ \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] I_d + I_f x_{ad}. \quad (6.3)$$

Умножим (6.3) на  $(-j\omega)$ . С учетом, что  $E = -j\omega_* \Psi$ .

Второе слагаемое в правой части уравнения (6.3) есть не что иное, как  $E_q = U_q + jI_d x_d$ .

Тогда

$$E'_q = E_q - j \left[ \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] I_d = U_q + jI_d \left( x_d - \left[ \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] \right). \quad (6.4)$$

Тогда переходная ЭДС из (6.4)

$$E'_q = U_q + jI_d x'_d. \quad (6.5)$$

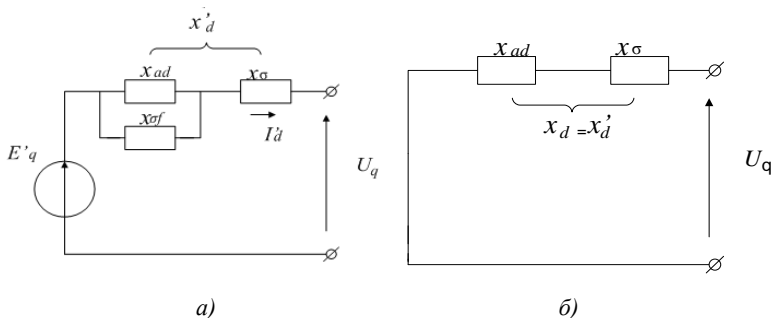
До КЗ эту ЭДС можно измерить при условии, что  $I_d = 0$ . При этом получим  $E'_q = U_u = 1$ , в остальных случаях она рассматривается как расчетная или фиктивная. Сверхпереходное сопротивление находится как

$$\begin{aligned} x'_d &= x_d - \left[ \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] = x_\sigma + \left[ \frac{x_{ad} x_{\sigma f} + x_{ad}^2 - x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right] = \\ &= x_\sigma + \left[ \frac{x_{ad} x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right], \end{aligned} \quad (6.6)$$

где  $x_d = x_\sigma + x_{ad}$ .

Из (6.6) видно, что  $x'_d \ll x_d$ , т.е. сопротивление при КЗ часто падает почти на порядок. Рассмотрим схему замещения.





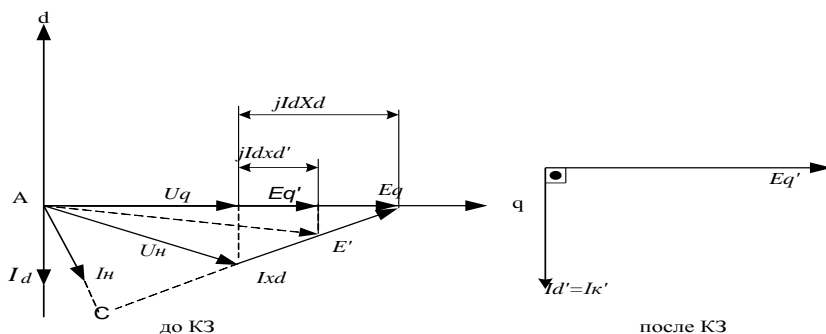
**Рис. 6.3. Схемы замещения синхронной машины по осям в переходном режиме: а) продольной; б) поперечной**

Так как до и после КЗ переходная ЭДС одна и та же, это дает возможность определить продольную составляющую тока КЗ —  $I'_d$ . При отсутствии контуров по оси  $q$   $E_d = 0$ , поэтому  $x_q = x'_q$ , а, следовательно, после КЗ  $I'_q = 0$ .

Тогда полный ток КЗ будет равен:

$$I'_\kappa = I'_d = \frac{E'_q}{x'_d + x_{BH}}. \quad (6.7)$$

Векторные диаграммы режимов до и после КЗ представлены на рисунке 6.5.



**Рис. 6.5. Векторная диаграмма**

Здесь

$$E'_q \approx E' = \sqrt{U_{ном} \cos \phi^2 + U_{ном} \sin \phi + I_{ном} x'_d}^2. \quad (6.8)$$

В (6.8) в скобках под знаком квадратного корня находятся фазные значения величин.

## 6.2. Сверхпереходные параметры синхронной машины

По аналогии с разделом 6.1 рассмотрим явнополусную синхронную машину с демпферными (успокоительными) обмотками, а также схемы замещения по продольной и поперечной осям. По сравнению с машиной без демпферных обмоток пути изменившегося магнитного потока статора практически полностью замыкаются в воздушном зазоре и не проникают в магнитный ротор. Это приведет к еще большему уменьшению сопротивления машины в сверхпереходном режиме, то есть в начальный момент для машины с демпферными обмотками путь изменившегося магнитного потока статора синхронной машины с демпферными обмотками проходит вне ротора, что резко уменьшает  $x_{ad}$  и, следовательно  $x_d$  (рис. 6.6).

По оси  $q$  демпферная обмотка  $I_q$  оказывает влияние, подобное влиянию обмотки возбуждения машины без демпферных обмоток, что приводит к уменьшению сопротивления машины по поперечной оси и возникновению ЭДС  $E'_d$ .

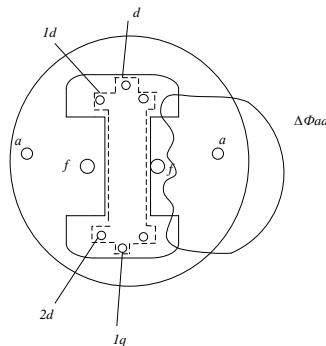
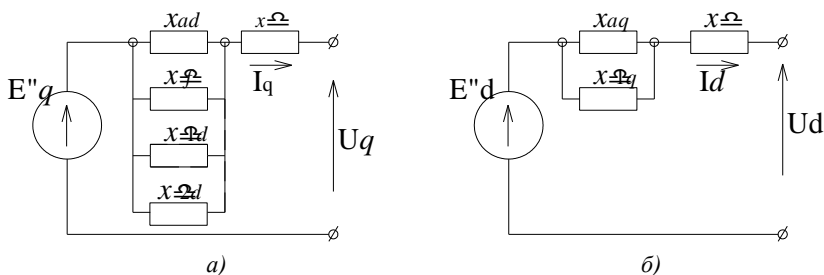


Рис. 6.6. Путь изменившегося магнитного потока статора синхронной машины с демпферными обмотками



**Рис. 6.7. Схема замещения:  
а) по продольной оси; б) по поперечной оси**

Применим 2-й закон Кирхгофа к схеме рисунка 6.7 а):

$$E''_q = U_q + j I_d x_d'', \quad (6.9)$$

где для (6.9) справедливо  $x_d'' < x_d' \ll x_d$ .

В выражении (6.9)  $E''_q$  — поперечная составляющая сверхпереходной ЭДС.

Аналогичную операцию произведем для схемы рисунка 6.7 б):

$$E''_d = U_d + j I_q x_q''. \quad (6.10)$$

Здесь  $E''_d$  — продольная составляющая сверхпереходной ЭДС, при этом  $x_q'' \ll x_q' = x_q$ .

Тогда величины тока по продольной и поперечной оси и полного тока будут определяться как

$$I_d'' = \frac{E''_q}{x_d'' + x_{BH}}; \quad I_q'' = \frac{E''_d}{x_q'' + x_{BH}}; \quad I'' = \sqrt{I_d''^2 + I_q''^2}. \quad (6.11)$$

По выражениям (6.9) — (6.10) строится векторная диаграмма до и после короткого замыкания (рис. 6.8).

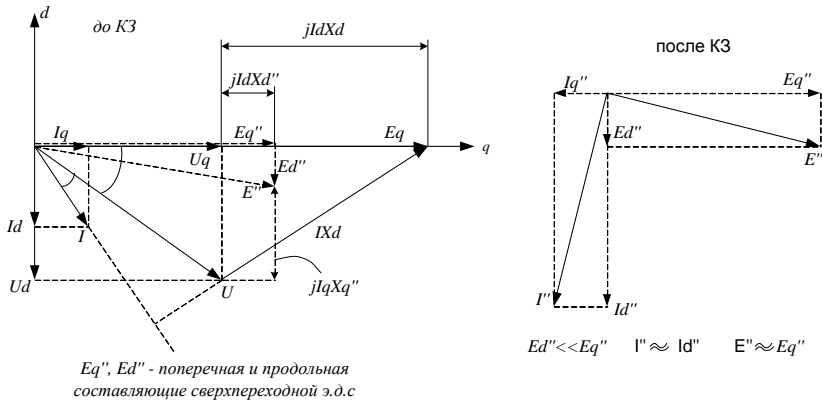


Рис. 6.8. Векторные диаграммы до и после КЗ

Таким образом, начальные ток и ЭДС приближенно могут быть найдены как

$$I'' = \frac{E''}{x_d'' + x_{BH}}; E'' = \sqrt{U_{ном} \cos \varphi^2 + U_{ном} \sin \varphi + I_{ном} x_d''^2}. \quad (6.12)$$

### 6.3. Учет подпитки синхронных и асинхронных двигателей при расчете токов КЗ

В начальный момент времени все двигатели, подключенные к системе, ведут себя как генераторы и посылают ток к месту короткого замыкания, увеличивая тем самым ток КЗ, т.е. осуществляется подпитка места, где произошло КЗ. При этом подпитка может достигать 30% и более от общего тока, и ее необходимо учитывать в расчетах.

Рассмотрим простейшую схему ГПП промышленного предприятия, к которой подключены электродвигатели. Из рисунка 6.9 видно, что в наиболее тяжелых условиях при КЗ находится выключатель отходящей линии. Учет подпитки всегда производится для наиболее тяжелого режима, то есть при включенном секционном выключателе. Можно сделать вывод о том, что номинальные

токи не определяют выбор оборудования, силового питающего кабеля и т.д., решающее значение имеют токи КЗ, при расчете которых необходимо учитывать подпитку от всех двигателей.

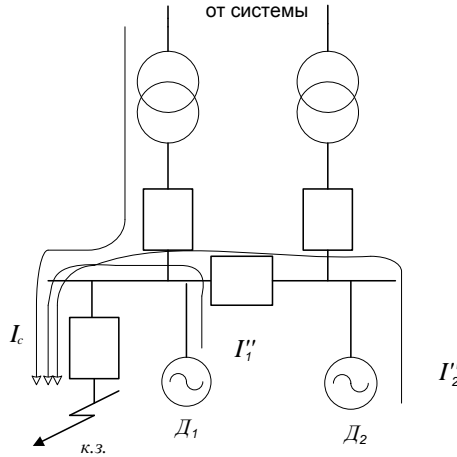


Рис. 6.9. Подпитка двигателями места КЗ на ГПП

*Синхронный двигатель (СД).*

Подпитку от синхронного двигателя учитывают как в ударном, так и в отключаемом токе КЗ. СД может работать в двух режимах:

— режим перевозбуждения — при этом  $E'' > U_H$ . Если  $E'' > U_{(0)}$  при КЗ, то двигатель будет посылать ток к месту КЗ (рис. 6.10);

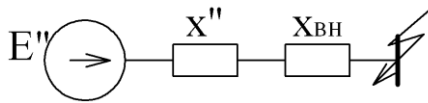


Рис. 6.10. Расчетная схема замещения

сверхпереходный ток КЗ при этом

$$I'' = \frac{E''}{x'' + x_{вн}}; \tag{6.13}$$

— режим недовозбуждения — при этом  $E'' < U_H$ . В этом случае, если  $E'' > U_{(0)}$ , то двигатель также будет посылать ток к месту КЗ.

И сверхпереходный ток КЗ в данном случае будет находиться как

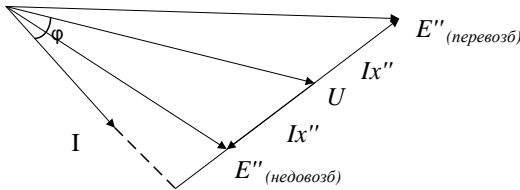
$$I'' = \frac{E'' - U_0}{x''}. \quad (6.14)$$

Однако если же  $E'' < U_H$  и  $E'' < U_{(0)}$ , то двигатель будет потреблять реактивный ток и не увеличивает ток в месте КЗ.

Обычно если двигатель отделен от места короткого замыкания более чем двумя трансформациями [2], подпитку можно не учитывать. При расчете подпитки синхронный двигатель необходимо рассматривать как *перевозбужденный*.

#### *Асинхронный двигатель (АД)*

Расчет подпитки от асинхронного двигателя производится подобно СД, но при меньших значениях ЭДС, что видно из векторной диаграммы рисунка 6.11. Как для СД, так и для АД не учитывается различие параметров по продольной и поперечной осям.



**Рис. 6.11. Векторная диаграмма электродвигателя**

$$E'' = \sqrt{U_{ном}^2 \cos^2 \varphi + U_{ном}^2 \sin^2 \varphi \pm I_{ном} x''^2}.$$

Знак + соответствует перевозбужденному СД, знак — недовозбужденному СД либо АД.

Максимальный ток подпитки от асинхронного двигателя при трехфазном коротком замыкании на его выводах будет определяться как

$$I'' = \frac{E''}{x'' + x_{BH}}, \quad (6.15)$$

где:  $x'' = \frac{1}{I_{пуск*}} \approx (0,125 - 0,35)$ , где  $I_{пуск*}$  — кратность пускового тока электродвигателя,  $E'' < U_H$ .

Если двигателей много, то они рассматриваются как обобщенная нагрузка. При этом принимается  $x'' = 0,35$ ,  $E'' = 0,85$ . Здесь значения приведены к полной номинальной мощности нагрузки и номинальным напряжениям той ступени, где она присоединена.

Пределы изменения реактивных сопротивлений синхронных генераторов и данных, необходимых для расчета подпитки места КЗ, приведены в таблицах 6.1 и 6.2:

Таблица 6.1

#### Типовые реактивности генераторов

Параметр	Турбогенератор (неявнополюсный)	Гидрогенератор (явнополюсный)
$x_d$	0,85...2,56	0,6...1,94
$x_d'$	0,18...0,46	0,2...0,57
$x_d''$	0,07...0,32	0,13...0,45

Таблица 6.2

#### Сверхпереходные реактивные сопротивления и ЭДС

Генератор	$x''$	$E''$
Турбогенератор мощностью менее 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенератор мощностью 100—500 МВт	0,2	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	0,2	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,2	1,18
Синхронный двигатель	0,2	1,1
Синхронный компенсатор	0,2	1,2
Асинхронный двигатель	0,2	0,9
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

## 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

### 7.1. Учет системы при расчете токов короткого замыкания

В зависимости от мощности источника питания предприятия при расчетах токов короткого замыкания выделяют два характерных случая:

- КЗ в цепях, питающихся от системы бесконечной мощности;
- КЗ вблизи генератора ограниченной мощности.

Системой бесконечной мощности считают источник, напряжение на шинах которого остается практически неизменным при любых изменениях тока в подключенной к нему сети (т.е. малое собственное сопротивление по сравнению с сопротивлением цепи КЗ).

Если на предприятии имеется собственный источник питания или питание от источников, расположенных вблизи предприятия, то периодическая составляющая тока трехфазного короткого замыкания в первый период КЗ не равна току установившегося КЗ  $I_{n(0)}^{(3)} \neq I_{\infty}$  и значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени  $t$  следует определять по расчетным кривым (см. ниже).  $U_c = 1 \dots 1.1$ . При расчетах максимальных значений тока принимается  $U_c = 1.1$ , минимальных —  $U_c = 1$ , расчетах для выбора электрооборудования —  $U_c = 1,05$ . Приводимые ниже формулы даны в относительных единицах при базисных условиях и приближенном приведении на базисную ступень.

Рассмотрим различные способы задания системы при расчете токов КЗ.

1. Задаются параметры в именованных единицах  $x_{c(Oм)}$ ,  $U_{c(кВ)}$ . Тогда относительное сопротивление системы приведенные к базисным условиям в о.е.:

$$x_{c*\bar{\sigma}} = \frac{x_{c(Oм)} S_{\bar{\sigma}}}{U_c^2}. \quad (7.1)$$



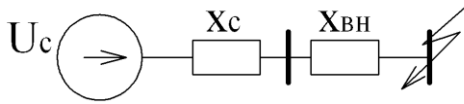


Рис. 7.1. Схема замещения

Из рисунка 7.1 можно определить ток КЗ как

$$I_c = \frac{E_c}{x_c + x_{BH}}. \quad (7.2)$$

При этом ток от системы не зависит от времени  $I_c'' = I_{ct} = I_\infty$ .

2. Задаются номинальное сопротивление системы в о.е. и номинальная мощность системы ( $x_{c*ном}, S_{ном}$ ). Тогда базисное сопротивление системы в о.е.:

$$x_{c*\delta} = \frac{x_{c*ном} S_\delta}{S_{ном}}. \quad (7.3)$$

3. Задаются бесконечная мощность и нулевое сопротивление ( $x_c = 0, S = \infty$ ). Тогда ток КЗ от системы:

$$I_c = \frac{U_c}{x_{BH}}. \quad (7.4)$$

4. Задаются сверхпереходная мощность (либо сверхпереходный ток в кА и напряжение системы в кВ) ( $I_{кА}'', S'', U_{c(кВ)}$ ). Тогда сопротивление системы в о.е. при базисных условиях:

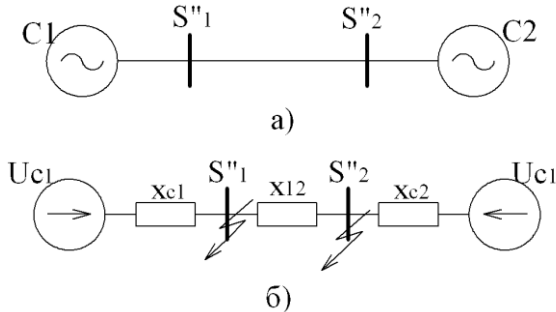
$$x_{c*\delta} = \frac{S_\delta}{S''} = \frac{I_\delta}{I''}, \quad (7.5)$$

при этом для тока в числителе и знаменателе стоят значения, приведенные к одному напряжению.

5. Питание подключается к шинам подстанции к определенной ячейке. Определяются паспортные мощность и ток отключения выключателя ( $I_{отк}'' = I'', S_{отк} = S''$ ). Тогда базисное сопротивление системы в о.е.:

$$x_{c*\delta} = \frac{S_{\delta}}{S_{отк}} = \frac{I_{\delta}}{I_{отк}}. \quad (7.6)$$

6. Питание происходит от двух систем с разными сверхпереходными мощностями в двух точках (рис. 7.2).



**Рис. 7.2. Питание от двух систем:**  
а) исходная схема; б) схема замещения

В этом случае имеет место система уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = x_{c1} / (x_{12} + x_{c2}) = \frac{x_{c1} (x_{12} + x_{c2})}{x_{c1} + x_{12} + x_{c2}} = \frac{S_{\delta}}{S_1}; \\ x_2 = x_{c2} / (x_{12} + x_{c1}) = \frac{S_{\delta}}{S_2}. \end{cases} \quad (7.7)$$

Из системы уравнений (7.7) легко найти сопротивления системы  $x_{c1}$  и  $x_{c2}$ .

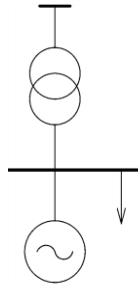
### **7.2. Метод расчетных кривых. Основные допущения и последовательность расчета**

Метод расчетных кривых является одним из первых методов расчета переходных процессов при коротком замыкании. Метод был разработан в 1940 г., он применяется, когда задача ограничена нахождением тока в месте КЗ или остаточного напряжения за аварийной ветвью.

Метод основан на применении специальных кривых, которые дают для произвольного момента процесса КЗ при различной расчетной реактивности схемы относительные значения периодической составляющей тока в месте КЗ.

В соответствии с особенностями энергетики того времени были приняты следующие допущения.

1. Мощность генераторов составляла не более 50—100 МВт.
2. Нагрузка питалась с шин генераторного напряжения:



*Рис. 7.3. Схема питания нагрузки с шин генераторного напряжения*

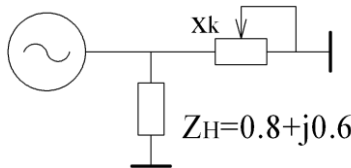
3. При расчете использовали типовые параметры генераторов электрической сети.

4. Генераторы использовались с АРВ и без АРВ.

5. На тот момент турбогенераторы и гидрогенераторы сильно различались по типовым параметрам.

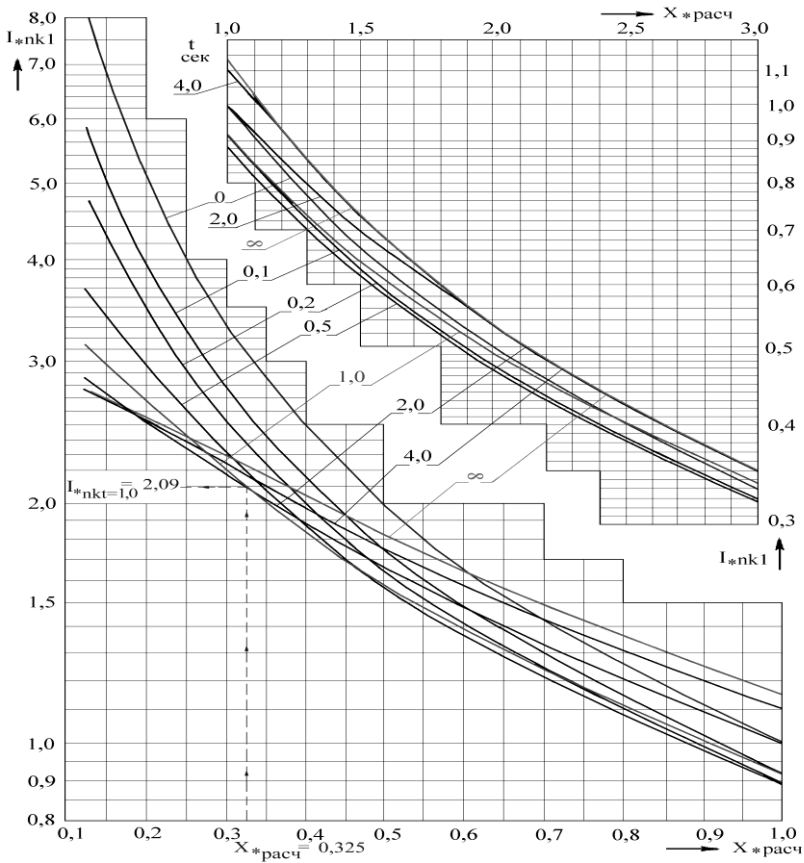
Как следует из сказанного выше, существует четыре основных вида кривых. В 1965 году предпринимались попытки усовершенствования метода для генераторов мощностью до 500 МВт, но новые кривые не нашли широкого применения.

Расчетная схема выглядит следующим образом (рис. 7.4).



*Рис. 7.4. Расчетная схема замещения*

Расчетные кривые типового турбогенератора с АРВ приведены на рисунке 7.5.



**Рис. 7.5. Расчетные кривые типового турбогенератора**

На рисунке 7.5  $I_{*nk1}$  — кратность периодической составляющей тока КЗ в интересующий момент времени относительно номинального тока источника либо группы источников.

Приведем алгоритм использования метода при расчете по общему изменению, т.е. от группы однотипных источников.

1. Составляется расчетная схема замещения (рис. 7.6), в которой генераторы вводятся со своими сверхпереходными сопротивлениями. ЭДС генератора и нагрузки не учитывается, т.к. они учтены самим методом.

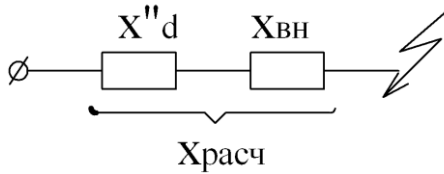


Рис. 7.6

2. Методом эквивалентных преобразований находят суммарное сопротивление относительно точки КЗ.

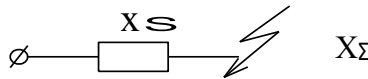


Рис. 7.7

3. Находится расчетное сопротивление, т.е. суммарное сопротивление, отнесенное к номинальной мощности источника:

$$x_{расч} = \frac{x_{\Sigma} \cdot S_{ном\Sigma}}{S_{\delta}}; \quad (7.8)$$

$$x_{расч} = \frac{x_{\Sigma} \cdot S_{ном\Sigma}}{U_{номср}^2}, \quad (7.9)$$

где выражение (7.8) — расчетное сопротивление при расчете схемы в относительных единицах, а (7.9) — при расчетах в именованных единицах.

4. Используя кривые метода отдельно для турбогенератора либо гидрогенератора с АРВ или без АРВ находят значение тока в относительных единицах  $I_{*нкг}$  и периодическое составляющей тока КЗ как

$$I_{nkt} = I_{*nkt} I_{ном\Sigma} , \quad (7.10)$$

где

$$I_{ном\Sigma} = \frac{S_{ном\Sigma}}{\sqrt{3}U_{номср}} . \quad (7.11)$$

Здесь  $U_{номср}$  находится для той ступени напряжения, где определяют ток КЗ.

По мере увеличения расчетной реактивности (или удаленности места КЗ) различие между токами во времени становится все меньше, т.е.  $x_{расч} > 3$  периодическая составляющая тока остается неизменной и равна своему начальному значению. Также с увеличением расчетной реактивности различие в типах генераторов сказывается все меньше и уже при  $x_{расч} > 1$  расчетные кривые для генераторов разных типов практически совпадают.

При  $x_{расч} > 3$  величину тока для всех моментов времени определяют как

$$I_{*nkt} = \frac{1}{x_{расч}} . \quad (7.12)$$

В этом случае искомая величина периодической составляющей тока КЗ в любой момент времени:

$$I_{nkt} = \frac{I_{ном\Sigma}}{x_{расч}} = \frac{I_{\sigma}}{x_{\Sigma}^{*\sigma}} . \quad (7.13)$$

Недостаток данного метода заключается в том, что он не дает возможности найти распределение тока короткого замыкания в схеме в произвольный момент времени, т.к. неизвестно сопротивление источников в произвольный момент времени.

*Пример 7.1.* Определить периодическую составляющую тока короткого замыкания для  $t = 0,5$  с с использованием метода расчетных кривых для электрической системы (рис. 7.8).

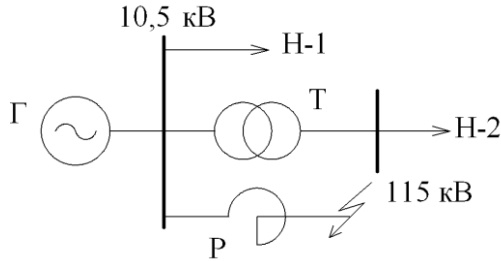


Рис. 7.8. Схема электрической системы

Элементы схемы рис. 7.8 характеризуются нижеследующими параметрами.

Генератор Г:

$$P_{ном} = 50 \text{ МВт}; \cos \varphi_{ном} = 0,8; x_d'' = 0,15; x_d = 1,2; U_{ном} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$I_{*f \text{ нр}} = E_{q \text{ нр}} = 3.$$

Трансформатор Т:

$$S_{ном} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}; U_{K\%} = 12\%;$$

Реактор Р:

$$x_p = 0,12 \text{ Ом}; U_{ном} = 10 \text{ кВ};$$

Нагрузка Н-1, Н-2:

$$x_H = 1,2; S_{H-1} = 30 \text{ МВ} \cdot \text{А}; S_{H-2} = 10 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Выбор базисных величин:

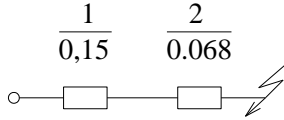
$$\text{— базисная мощность: } S_{\sigma} = S_{ном} = \frac{P_{ном\Gamma}}{\cos \varphi_{ном\Gamma}} = \frac{50}{0,8} = 62,5 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\text{— базисное напряжение: } U_{\sigma} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$\text{— базисный ток: } I_{\sigma} = I_{ном} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} U_{\sigma}} = \frac{62,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 3,44 \text{ кА}.$$

Расчет будет производиться в относительных единицах при приближенном приведении.

Составим схему замещения относительно места КЗ и определим ее параметры.



**Рис. 7.9**

$$x_1 = x_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{ном\Gamma}} = 0,15; x_2 = x_{P(Ом)} \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2} = 0,12 \cdot \frac{62,5}{10,5^2} = 0,068.$$

Методом эквивалентных преобразований находим суммарное сопротивление относительно точки КЗ (рис. 7.10).



**Рис. 7.10**

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 = 0,15 + 0,068 = 0,218.$$

Расчетное сопротивление системы:

$$x_{расч} = x_{\Sigma} \frac{S_{ном\Gamma}}{S_{\delta}} = 0,218 \cdot \frac{62,5}{62,5} = 0,218.$$

По расчетным кривым (рис. 7.5) находится при  $t = 0,5$  с;  $x_{расч} = 0,218$ ;

кратность тока:  $I_{*nkt} = 2,9$ .

Тогда ток в месте КЗ:

$$I_{k0,5} = I_{*nkt} I_{ном\Gamma} = 2,9 \cdot 3,44 = 9,98 \text{ кА}. \quad (7.20)$$

### **7.3. Метод спрямленных характеристик.**

#### **Основные допущения и последовательность расчета**

Рассмотрим теперь метод, который позволяет найти в произвольный момент переходного процесса не только ток в месте КЗ,



но и распределение этого тока в схеме, что часто необходимо при решении вопросов релейной защиты и автоматики энергосистем [17].

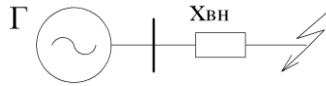


Рис. 7.11

Когда генератор представлен своими  $E''$ ,  $x''_d$  (рис. 7.11), величины которых не зависят от изменения внешних условий, сверхпереходный ток трехфазного КЗ определяется как

$$I'' = \frac{E''}{x''_d + x_{BH}}. \quad (7.21)$$

Если время принять, что  $t \rightarrow \infty$ , тогда ток установившегося КЗ (для генератора без АРВ) находится как

$$I_\infty = \frac{E_q}{x_d + x_{BH}}, \quad (7.22)$$

а для генератора с АРВ  $x_{BH} < x_{KPt}$

$$I_\infty = \frac{E_{qnp}}{x_d + x_{BH}}. \quad (7.23)$$

Желательно иметь формулу определения тока трехфазного КЗ в произвольный момент времени подобного вида:

$$I_t = \frac{E_t}{x_t + x_{BH}}. \quad (7.24)$$

Строго говоря, это сделать нельзя, так как ЭДС и сопротивление генератора зависят не только от времени, но и от внешних условий. Однако спрямляя характеристики генератора, это было сделано [9].

Недостаток метода заключается в том, что для каждого момента времени составляется новая схема, а также в низкой точности. Таким образом, это аналитический метод.

Кривые метода выглядят следующим образом (рис. 7.12).

Алгоритм применения метода спрямленных характеристик следующий:

1. Составляется расчетная схема замещения для интересующего момента времени, в которую генераторы без АРВ вводятся своими  $E_t$  и  $x_t$ . Нагрузка вводится в точке ее присоединения величиной реактивности  $x_n = 1, 2$ . Для генератора с АРВ оценивается режим следующим образом:

— если  $x_{BH} > x_{KPI}$ , то, следовательно, имеет место режим номинального напряжения  $E_t = U_{ном}$ ,  $x_G = 0$ ;

— если  $x_{BH} < x_{KPI}$ , то генератор работает в режиме подъема возбуждения и  $E_t$  и  $x_t$  находятся по кривым метода в зависимости от типа генератора.

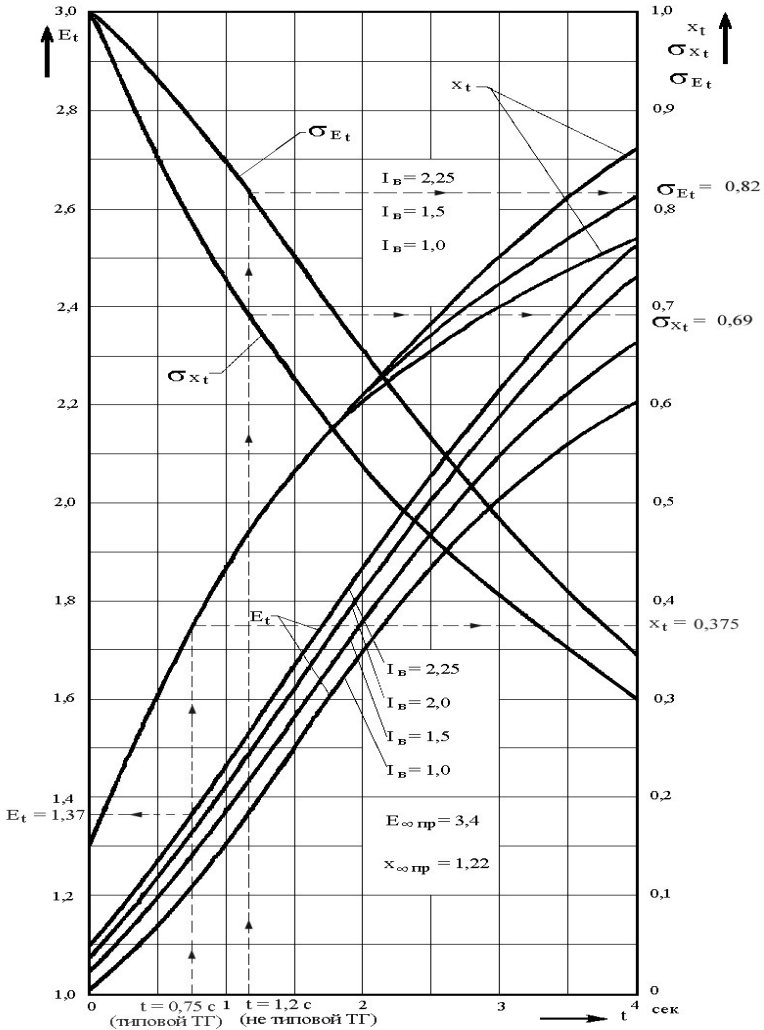
При оценке режима  $x_{KPI} = x_t \frac{U_{ном}}{E_t - U_{ном}}$ .

Для сложных схем режим оценивается приближенно.

2. Методом эквивалентных преобразований либо другим и известным методом производится расчет схемы и находится ток  $I_{Gi}$ . При этом:

— если  $I_{Gi} < I_{KPI}$ , то имеет место режим номинального напряжения при  $x_{BH} > x_{KPI}$ ;

— если  $I_{Gi} > I_{KPI}$ , то генератор работает в режиме подъема возбуждения при  $x_{BH} < x_{KPI}$ . Здесь  $I_{KPI} = \frac{U_{ном}}{x_{KPI}}$ .



**Рис. 7.12. Кривые спрямленных характеристик для типового турбогенератора**

Если расчетный режим не совпадает с заданным, то расчет производится заново.

Для генераторов с известными параметрами удобнее использовать вспомогательные кривые метода для  $\delta_{Et}$  и  $\delta_{xt}$  и находить  $E_t$  и  $x_t$  с учетом выражений:

$$\begin{aligned} E_t &= E_{qnp} - (E_{qnp} - E_0'') \delta_{Et}; \\ x_t &= x_d - x_d - x_d'' \sigma_{xt}, \end{aligned} \quad (7.25)$$

где  $\delta_{Et}$  и  $\sigma_{xt}$  — коэффициенты, определяемые кривыми метода спрямленных характеристик, для генераторов имеющих нетиповые параметры;

$E_{qnp}$  — предельное (потолочное) значение синхронной ЭДС;

$x_d$  — синхронное сопротивление генератора.

*Пример 7.2.* Определить периодическую составляющую тока короткого замыкания для  $t = 0,5$  с с использованием метода спрямленных характеристик для электрической системы (рис. 7.8).

Относительный ток возбуждения предшествующего режима равен относительной ЭДС  $E_{0*} = I_{f0*}$ .

$$\begin{aligned} E_{0*} &= \sqrt{\left[ U_{ном} \cos \varphi \right]^2 + \left[ U_{ном} \sin \varphi + I_0 x_d \right]^2} = \\ &= \sqrt{1 \cdot 0,8^2 + 1 \cdot 0,6 + 0,64 \cdot 1,2^2} = 1,41 = I_{f0*} \end{aligned}$$

Ток предшествующего режима в относительных единицах

$$I_{0*} = \frac{S_{ном\Sigma}}{S_{\sigma}} = \frac{30 + 10}{62,5} = 0,64.$$

По кривым для времени  $t = 0,5$  с при  $E_{0*} = I_{f0*} = 1,41$  определяются  $E_{0,5} = 1,19$ ;  $x_{0,5} = 0,3$ .

Сначала оценивается режим. Для этого находится критическое сопротивление при  $t = 0,5$  с.

$$x_{KP(0.5)} = x_t \left[ \frac{U_{ном}}{E_t - U_{ном}} \right] \frac{S_{\sigma}}{S_{ном}} = 0,3 \cdot \left[ \frac{1}{1,19 - 1} \right] \frac{62,5}{62,5} = 1,58.$$

Так как  $x_{BH} < x_{KPI}$ , то генератор работает в режиме подъема возбуждения.

Составляется расчетная схема замещения (рис. 7.13).

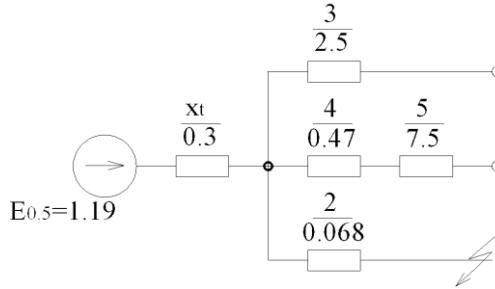


Рис. 7.13. Схема замещения

Параметры схемы замещения:

$$x_3 = 1,2 \frac{S_{\sigma}}{S_{H-1}} = 1,2 \cdot \frac{62,5}{30} = 2,5; \quad x_4 = \frac{U_{K\%} S_{\sigma}}{100 S_{ном}} = 0,12 \frac{62,5}{16} = 0,47;$$

$$x_5 = 1,2 \frac{S_{\sigma}}{S_{H-2}} = 1,2 \cdot \frac{62,5}{10} = 7,5; \quad x_t = 0,3 \frac{S_{\sigma}}{S_{номГ}} = 0,3 \cdot \frac{62,5}{62,5} = 0,3.$$

Произведем эквивалентные преобразования схемы (рис. 7.13) относительно точки КЗ.

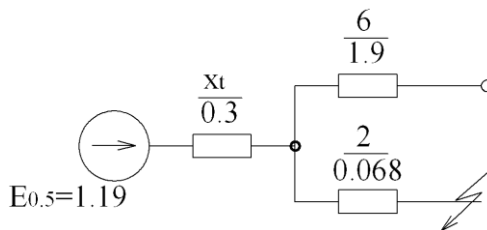


Рис. 7.14

Здесь сопротивление  $x_6$  находится как

$$x_6 = \frac{x_3 \cdot x_4 + x_5}{x_3 + x_4 + x_5} = \frac{2,5 \cdot 0,47 + 7,5}{2,5 + 0,47 + 7,5} = 1,9. \text{ Далее (рис. 7.15):}$$

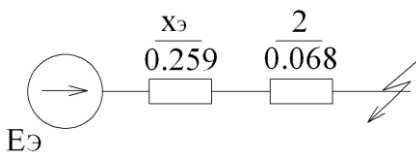


Рис. 7.15

$$E_{\mathcal{E}} = \frac{E_t x_6}{x_t + x_6} = \frac{1,19 \cdot 1,9}{0,3 + 1,9} = 1,027; \quad x_{\mathcal{E}} = \frac{x_6 x_t}{x_6 + x_t} = \frac{1,9 \cdot 0,3}{1,9 + 0,3} = 0,259.$$

Периодическая составляющая тока КЗ в относительных и именованных единицах

$$I_{*0,5} = \frac{E_{\mathcal{E}}}{x_{\mathcal{E}} + x_2} = \frac{1,027}{0,259 + 0,068} = 3,14;$$

$$I_{0,5} = I_{*0,5} I_{\sigma} = 3,14 \cdot 3,44 = 10,8 \text{ кА}. \quad (7.26)$$

Для генератора с известными параметрами определим  $E_t$  и  $x_t$  для времени  $t = 0,5$  с по формулам (7.25).

$$E'' = \sqrt{\left[ (U_{\text{ном}} \cos \varphi)^2 + (U_{\text{ном}} \sin \varphi + I_0 x_d'')^2 \right]} =$$

$$\sqrt{(1 \cdot 0,8)^2 + (1 \cdot 0,6 + 0,64 \cdot 0,15)^2} = 1,06.$$

При  $E_{qnp} = 3$ ;  $x_d = 1,2$  и найденным по кривым  $\delta_{Et} = 0,93$  и  $\delta_{xt} = 0,85$ .

$$E_t = E_{qnp} - (E_{qnp} - E_0'') \delta_{Et} = 3 - (3 - 1,06) \cdot 0,93 = 1,2;$$

$$x_t = x_d - (x_d - x_d'') \delta_{xt} = 1,2 - (1,2 - 0,15) \cdot 0,85 = 0,307.$$

В этом случае расчет начального значения тока для времени  $t = 0$  с совпадает с расчетом, полученным по методу типовых кривых, так как  $\delta_{Et} = \delta_{xt} = 1$ .

Расчет периодической составляющей тока КЗ для момента времени  $t = 0,5$  с.

$$\text{Здесь: } E_{\text{э}} = \frac{E_t x_6}{x_t + x_6} = \frac{1,2 \cdot 1,9}{0,307 + 1,9} = 1,033 ;$$

$$x_{\text{э}} = \frac{x_6 x_t}{x_6 + x_t} = \frac{1,9 \cdot 0,307}{1,9 + 0,307} = 0,264 .$$

Периодическая составляющая тока КЗ в относительных и именованных единицах

$$I_{*0,5} = \frac{E_{\text{э}}}{x_{\text{э}} + x_2} = \frac{1,033}{0,264 + 0,068} = 3,11 ;$$

$$I_{0,5} = I_{*0,5} I_{\sigma} = 3,11 \cdot 3,44 = 10,7 \text{ кА} . \quad (7.27)$$

#### ***7.4. Метод типовых кривых. Основные допущения и последовательность расчета***

Этот метод является современным и основным методом расчета переходных процессов при коротком замыкании [2, 11, 12].

Основные допущения:

1. Мощность генераторов  $P_{\text{ном}} > 100$  МВт .
2. Питание нагрузки осуществляется любым способом, в том числе при блочной схеме.
3. Наличие АРВ на всех генераторах.
4. При расчете используются не типовые, а реальные параметры.

Независимо от типа генератора кривая изменения периодической составляющей тока во времени зависит только от удаленности короткого замыкания и тесно связана с начальным значением тока короткого замыкания. Данный метод требует аналитического расчета начального тока КЗ. Кривые метода выглядят следующим образом (рис. 7.16):

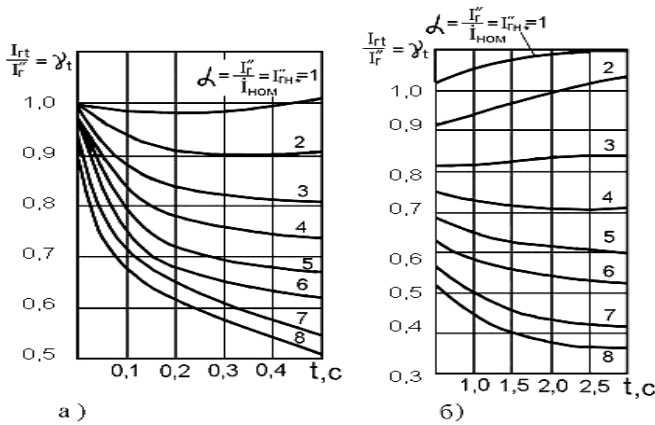


Рис. 7.16. Типовые кривые токов короткого замыкания генераторов а) в генераторе при времени до 0,5 с; б) в генераторе при времени от 0,5 до 3 с

Алгоритм расчета с применением метода типовых кривых:

1. Составляется расчетная схема замещения для начального момента времени, в которую генераторы вводятся с параметрами начального момента  $E_q'', x_d''$ . Нагрузка вводится шунтирующими ветвями с величиной  $x_H = 1,2$ . Учет подпитки синхронных и асинхронных двигателей производится отдельно, независимо от расчета (для двигателей также имеются кривые).

2. Любым известным методом производится расчет начальных значений токов КЗ и начальных значений генераторных токов при КЗ  $I_K'', I_G''$ .

3. Для интересующего момента времени  $t$  при известном отношении  $\alpha = \frac{I_G''}{I_H''}$  определяются так называемые коэффициенты

$\gamma = \frac{I_{Гt}''}{I_G''}$  и находятся  $I_{Гt}$  и  $I_{kt}''$  как

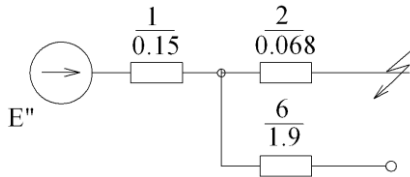
$$I_{Гt} = \gamma I_G''; I_{kt} = \gamma I_k''. \quad (7.28)$$

При этом если  $\alpha < 1$ , то можно считать, что  $I_G'' = I_{kt} = I_\infty$ , либо принять  $\alpha = 1$ .



**Пример 7.3.** Определить периодическую составляющую тока короткого замыкания для  $t=0,5$  с с использованием метода типовых кривых для электрической системы (рис. 7.8).

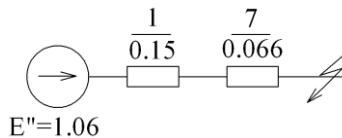
Схема замещения:



**Рис. 7.17**

Значение сверхпереходной ЭДС и остальные параметры схемы найдены в примерах 7.1 и 7.2.

Преобразуем схему относительно точки КЗ и найдем токи



**Рис. 7.18**

На схеме рисунка 7.18 сопротивление  $x_7$

$$x_7 = \frac{x_2 x_6}{x_2 + x_6} = \frac{0,068 \cdot 1,9}{0,068 + 1,9} = 0,066.$$

Ток генератора при КЗ:  $I_G'' = \frac{E''}{x_1 + x_7} = \frac{1,06}{0,15 + 0,066} = 4,91.$

Напряжение на шинах генератора при КЗ:  $U_{ГК} = I_G'' x_7 = 4,91 \cdot 0,066 = 0,324.$

Ток КЗ:  $I_K'' = \frac{U_{ГК}}{x_2} = \frac{0,324}{0,068} = 4,76.$

Определяются коэффициенты для нахождения тока КЗ

$$\alpha = \frac{I_G''}{I_{ном}} = \frac{4,91}{1} = 4,91.$$

Используя кривые рис. 7.16 для момента времени  $t = 0,5$  с, по известному значению  $\alpha$  находится значение  $\gamma = 0,67$ .

Окончательно определяется ток трехфазного КЗ в момент времени  $t = 0,5$  с.

$$I_{K(t=0,5)} = \gamma I_K'' I_\sigma = 0,67 \cdot 4,76 \cdot 3,44 = 10,97 \text{ кА.} \quad (7.29)$$

Для оценки точности нахождения тока короткого замыкания всеми тремя методами расчета определим максимальную погрешность между наименьшим и наибольшим из полученных токов для одной и той же схемы (т.е. для метода расчетных кривых и метода типовых кривых) как

$$\varepsilon_{\max} = \frac{10,97 - 9,98}{9,98} \cdot 100\% = 9,9\% . \quad (7.30)$$

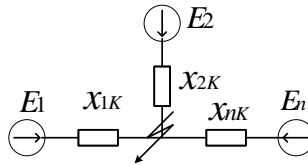
Как видно из (7.30), получена небольшая погрешность между полученными результатами. Кроме того, наибольшая погрешность имеет место при использовании метода типовых кривых.

### ***7.5. Уточнение расчетов практическими методами. Нахождение коэффициентов распределения***

Закон изменения периодической составляющей тока определяется близко расположенными источниками, и это не учитывается в должной мере при объединении источников. Сущность уточнения расчетов практическими методами состоит в разделении источников по определенным критериям. При расчете необходимо учитывать следующие критерии:

- 1) электрическую удаленность источника;
- 2) разделение источников по типу (турбогенератор, гидрогенератор);
- 3) разделение источников по мощности (в том числе отдельно для подпитки двигательной нагрузкой);
- 4) отдельный учет системы, так как ток от системы считается не зависимым от времени.

При этом необходимо учитывать доленое участие каждого источника системы нахождением взаимного сопротивления между источником и точкой КЗ.



*Рис. 7.19. Простейшая схема сложной сети с n генераторами*

Для нахождения взаимного сопротивления между источником и точкой КЗ могут быть использованы методы, известные из теории линейных цепей и рассмотренные ранее: преобразование звезды в треугольник, треугольника в звезду, многолучевой звезды в полный многоугольник.

Для нахождения распределения токов в схеме при использовании метода спрямленных характеристик и аналитического метода можно обойтись без преобразования схемы, а непосредственно использовать известные методы расчета: метод контурных токов, метод узловых напряжений и т.д.

Часто удобно произвести преобразование схемы к простейшему виду с помощью коэффициентов распределения (токораспределения). Коэффициенты распределения (доли от единичного тока) находятся как относительные токи для начального момента КЗ и найденное токораспределение распространяется на весь процесс, вплоть до  $t = \infty$ . Это, естественно, вносит определенную погрешность, так как сопротивления источников при переходном процессе изменяются во времени.

По известному коэффициенту распределения  $C_m$  любого  $m$ -того источника питания и результирующему сопротивлению схемы  $x_{\Sigma}$  можно найти взаимное сопротивление между этим источником и точкой КЗ.

$$x_{km} = \frac{x_{\Sigma}}{C_m}. \quad (7.31)$$

Коэффициент распределения находится разворачиванием схемы от результирующего сопротивления до исходной схемы. Ниже показан способ нахождения коэффициентов распределения для случаев параллельного и последовательного сложения сопротивлений.

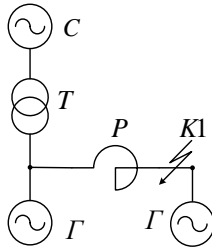
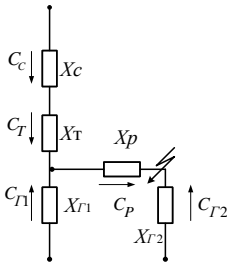


Рис. 7.20. Исходная схема

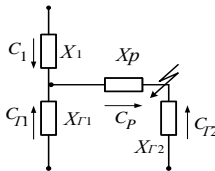
Преобразования схемы и расчет коэффициентов распределения:

$$C_{\Sigma} = 1, \quad C_P = C_2 = C_3 = \frac{x_{\Sigma}}{x_3}, \quad C_{G2} = \frac{x_{\Sigma}}{x_{G2}}, \quad C_C = C_T = C_1 = \frac{x_2}{x_1} C_2,$$

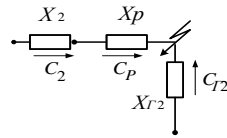
$$C_{G1} = \frac{x_2}{x_{G1}} C_2.$$



$$x_1 = x_T + x_C$$



$$x_2 = x_{G1} // x_1$$



$$x_3 = x_p + x_2$$

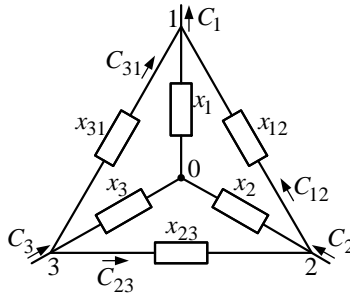


$$x_{\Sigma} = x_3 // x_{T2}$$

**Рис. 7.21. Этапы преобразования исходной схемы**

Для схемы, преобразованной из треугольника в звезду или наоборот, расчет коэффициентов распределения можно произвести применением 1-го или 2-ого законов Кирхгофа, то есть

$$\sum_i C_i = 0 \text{ — для узла; } \sum_j C_j x_j = 0 \text{ — для контура.}$$



**Рис. 7.22. Исходная схема**

Для принятого на рисунке 7.22 направления коэффициентов распределения

$$\text{узел 1: } C_{31} + C_{12} - C_1 = 0,$$

$$\text{узел 2: } C_{23} - C_{12} + C_2 = 0, \tag{7.32}$$

$$\text{узел 3: } -C_{31} - C_{23} + C_3 = 0;$$

$$\text{контур 1201: } -C_{12}x_{12} + C_2x_2 + C_1x_1 = 0,$$

$$\text{контур 2302: } -C_{23}x_{23} + C_3x_3 - C_2x_2 = 0, \tag{7.33}$$

$$\text{контур 3103: } C_{31}x_{31} - C_1x_1 - C_3x_3 = 0.$$

Из полученных соотношений могут быть найдены неизвестные коэффициенты распределения. Сумма коэффициентов распределения всех источников питания должна равняться единице.

## 8. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

### 8.1. Постановка задачи и проблемы решения

Исследование переходных процессов в электрических машинах представляет собой сложную задачу. Для ее упрощения при исследовании электромагнитных процессов в синхронных машинах вводятся допущения идеализирующие конструкцию. Некоторые допущения в дальнейшем могут быть сняты.

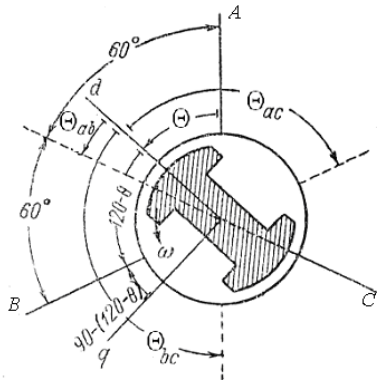
Допущения:

- 1) будем считать, что индуктивности не зависят от намагничивающих сил;
- 2) распределение магнитной индукции в воздушном зазоре носит синусоидальный характер, т.е. наведенные ЭДС будут синусоидальными;
- 3) в машине отсутствуют демпферные обмотки;
- 4) не учитываются потери в магнитной системе машины (активные сопротивления статора и ротора при этом необходимо учитывать);
- 5) скорость машины постоянна и равна синхронной  $\omega_0 = \text{const}$ ;
- 6) машина симметрична, ротор симметричен относительно осей  $d$  и  $q$ .

Расчетная модель трехфазной синхронной машины приведена на рисунке 8.1

Дифференциальные уравнения равновесия по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений в естественной системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = -\frac{d\psi_a}{dt} - r_i i_a \\ U_b = -\frac{d\psi_b}{dt} - r_i i_b \\ U_c = -\frac{d\psi_c}{dt} - r_i i_c \\ U_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f. \end{array} \right. \quad (8.1)$$



**Рис. 8.1. Расчетная модель**

Потокоцепления фазных обмоток статора и обмотки возбуждения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_a = L_{aa} i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{af} i_f; \\ \psi_b = L_{bb} i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + M_{bf} i_f; \\ \psi_c = L_{cc} i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + M_{cf} i_f; \\ \psi_f = L_{ff} i_f + M_{fa} i_a + M_{fb} i_b + M_{fc} i_c; M_{ba} = M_{ab}. \end{array} \right. \quad (8.2)$$

Собственные и взаимные индуктивности, кроме собственной индуктивности обмотки возбуждения зависят от положения ротора и, следовательно, являются функциями времени. Система уравнений (8.1) при этом является нелинейной и не имеет



аналитического решения. Численное решение может быть получено, но оно не наглядно и всегда имеет частный характер. Ниже будет проведено преобразование исходной трехфазной машины в двухфазную модель путем замены переменных, впервые проведенное Парком (США) и Горевым А.А. (СССР). Замена переменных не уменьшает их число, но может существенно упростить решение. После получения решения для двухфазной модели, используя полученные связи, можно получить решение для реальной трехфазной синхронной машины.

Рассмотрим законы изменения индуктивностей и путь получения дифференциальных уравнений двухфазной модели.

### 8.2. Индуктивности обмоток синхронной машины

Собственные и взаимные индуктивности фазных обмоток изменяются по периодическому закону с двойной частотой (рис. 8.2).

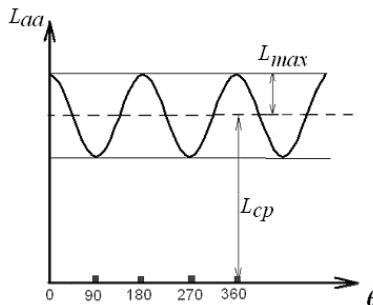


Рис. 8.2. Собственная индуктивность фазы

$$L_{aa} = L_{cp} + L_{max} \cos 2\Theta;$$

$$L_{bb} = L_{cp} + L_{max} \cos 2(\Theta + 120^\circ) =$$

$$L_{cp} + L_{max} \cos(2\Theta - 120^\circ);$$

$$L_{cc} = L_{cp} + L_{max} \cos(2\Theta + 120^\circ);$$

$$\begin{aligned}
M_{ab} &= L_{ab} = M_{cp} + M_{\max} \cos 2(\Theta_{ab}) = \\
M_{cp} &+ L_{\max} \cos 2(\Theta + 60^\circ) = \\
M_{cp} &+ L_{\max} \cos(2\Theta + 120^\circ) = M_{ba}; \\
M_{ac} &= M_{ca} = M_{cp} + L_{\max} \cos(2\Theta - 120^\circ); \\
M_{bc} &= M_{cb} = M_{cp} + L_{\max} \cos(2\Theta).
\end{aligned}$$

Взаимная индуктивность между фазой и обмоткой возбуждения изменяется по закону основной частоты:

$$\begin{aligned}
M_{af} &= M_{fa} = M_f \cos \Theta; \quad M_{bf} = M_f \cos(\Theta + 120^\circ); \\
M_{cf} &= M_f \cos(\Theta - 120^\circ).
\end{aligned}$$

Собственная индуктивность обмотки возбуждения:

$$L_{ff} = \text{const}.$$

Таким образом, закон изменения потокосцепления носит сложный характер.

С учетом закона изменения тока  $i_a = I_{ma} \sin(\omega t + \psi)$  и угла  $\Theta = \omega t + \Theta_0$ .

$$\begin{aligned}
\psi_a &= L_{aa}i_a + M_{ab}i_b + M_{ac}i_c + M_{af}i_f = \\
&(L_{cp} + L_{\max} \cos 2(\omega t + \Theta_0))I_m \sin(\omega t + \psi) + \\
&+(M_{cp} + L_{\max} \cos(2(\omega t + \Theta_0 + 120^\circ)))I_m \sin(\omega t + \psi + 120^\circ) + \\
&+(M_{cp} + L_{\max} \cos(2(\omega t + \Theta_0 - 120^\circ)))I_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ) + \\
&+ M_f \cos(\omega t + \Theta_0)i_f.
\end{aligned}$$

Для уменьшения числа коэффициентов введем понятие обобщенного вектора трехфазной системы с заменой трехфазной машины на двухфазную.

### 8.3. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных

Мгновенные значения фазных величин трехфазной системы можно получить, как проекции трех фазных величин на одну ось времени, так и проектируя один вектор на три оси времени, сдвинутых на  $120^\circ$ . Этот вектор носит название обобщенного или изображающего вектора (рис. 8.3).

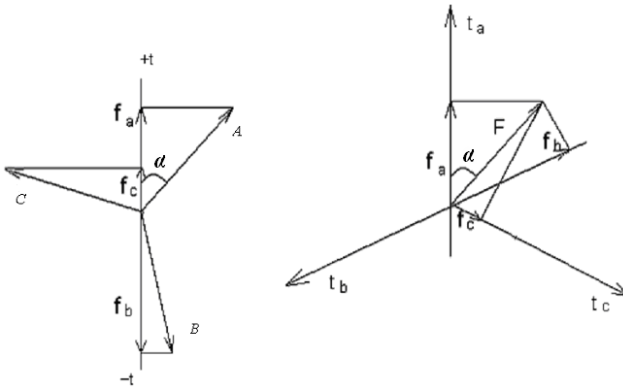


Рис. 8.3. Обобщенный вектор трехфазной системы

Связь между двумя системами определяется соотношениями:

$$\begin{cases} f_a = F \cos \alpha; & f_a^2 + f_b^2 + f_c^2 = \frac{3}{2} F^2 \\ f_b = F \cos(\alpha - 120^\circ); & F = \sqrt{\frac{2}{3}(f_a^2 + f_b^2 + f_c^2)} \\ f_c = F \cos(\alpha + 120^\circ); & \alpha = \arccos \frac{f_a}{F} \end{cases}$$

Обобщенный вектор удобно представить в неподвижной декартовой системе координат  $xу$ . Такой способ носит название замены переменных. Число переменных при замене не изменяется. Связь между системами определяется соотношениями:

$$f_x = F \cos(\Theta - \alpha); \quad f_y = F \sin(\Theta - \alpha);$$

$$f_a = f_{ax} + f_{ay} = f_x \cos \Theta + f_y \sin \Theta;$$

В симметричном режиме:

$$\begin{cases} f_a = f_x \cos \Theta + f_y \sin \Theta; \\ f_b = f_x \cos(\Theta - 120^\circ) + f_y \sin(\Theta - 120^\circ); \\ f_c = f_x \cos(\Theta + 120^\circ) + f_y \sin(\Theta + 120^\circ); \end{cases}$$

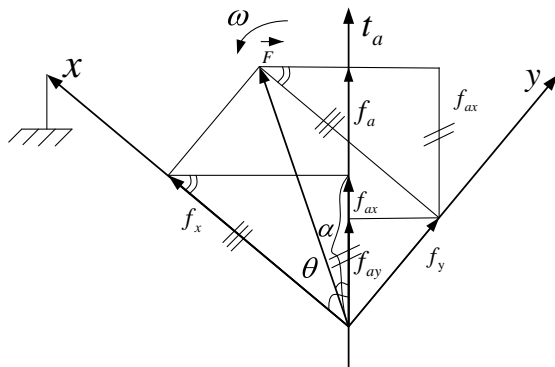


Рис. 8.4. Замена переменных

В несимметричном режиме машины вводится нулевая составляющая  $f_0$ . При этом  $f_a + f_b + f_c = 3f_0$ .

$$\begin{cases} f_a = f_x \cos \Theta + f_y \sin \Theta + f_0; \\ f_b = f_x \cos(\Theta - 120^\circ) + f_y \sin(\Theta - 120^\circ) + f_0; \\ f_c = f_x \cos(\Theta + 120^\circ) + f_y \sin(\Theta + 120^\circ) + f_0; \end{cases} \quad (8.3)$$

$f_a + f_b + f_c = 0$  — частный случай. Симметричный режим машины.

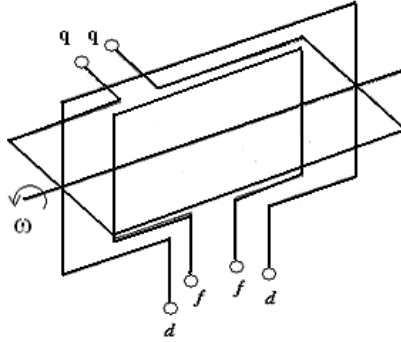
В декартовой системе координат (двухфазной машине) число коэффициентов собственных и взаимных индуктивностей уменьшилось, но не устранена переменность коэффициентов. Такая система координат осей  $x$ ,  $y$ , неподвижных в пространстве, используется при анализе переходных процессов в несимметричных режимах синхронных машин. При анализе переходных процессов

асинхронных машин вводятся оси, связанные с ротором при переменной скорости вращения. Такие оси носят название осей  $\alpha, \beta$ .

Симметричные переходные процессы в синхронной машине целесообразно исследовать в системе координат, вращающихся вместе с ротором (ось  $x$  при этом совмещают с осью  $d$  ротора). Эта система осей называется осями  $d, q$ . Удобство системы координат, жестко связанных с ротором, для синхронной машины заключается в том, что для наблюдателя, вращающегося вместе с этими осями, машина в магнитном отношении оказывается симметричной независимо от положения ротора. То есть ротор вращается вместе со статором и ротор относительно статора остается неподвижным. В такой модельной машине невозможно образование ЭДС вращения, но они могут быть получены при обратном переходе от двухфазной машины к трехфазной.

Поэтому в системе координат  $d, q$ , потокосцепления уже не содержат переменных индуктивностей, а дифференциальные уравнения имеют постоянные коэффициенты, что существенно облегчает исследование. Преобразование к осям  $d, q$  является практически единственным, приводящим дифференциальные уравнения синхронной машины с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами. Это делает преобразование к осям  $d, q$  весьма важным, играющим фундаментальное значение в теории синхронной машины. Это преобразование было предложено Блонделем для установившегося режима и развито для переходных процессов Парком и Горевым. Уравнения носят название уравнений по огибающим (так как в новой системе координат и старой системе координат максимальные значения совпадают) или уравнений Парка–Горева.

Модель преобразованной машины представлена на рисунке 8.5. Если для этой машины составить дифференциальные уравнения, то это будут дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами, которые можно будет решить и осуществить обратный переход к трехфазной машине по соотношениям (8.3).



**Рис. 8.5. Модель преобразованной синхронной машины**

Потокосцепления модели и связь параметров модели и трехфазной машины:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + M_f i_f; & L_d = L_{cp} - M_{cp} + \frac{3}{2} L_m \\ \psi_q = L_q i_q; & L_q = L_{cp} - M_{cp} - \frac{3}{2} L_m \\ \psi_o = L_o i_o; & L_o = L_{cp} - 2M_{cp} \\ \psi_f = L_f i_f + M_f i_d & \end{cases} \quad (8.4)$$

#### **8.4. Вывод уравнений Парка–Горева**

Заменяем  $\Theta$  на  $\gamma$  при этом  $\gamma = \omega_* t + \gamma_0$  и выразим все входящие в уравнение (8.1) переменные через новые переменные по соотношениям (8.3):

$$\begin{aligned}
 u_a &= -\frac{d\psi_a}{dt} - r i_a; \\
 u_a &= u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_o; \\
 \psi_a &= \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma + \psi_o; \\
 i_a &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_o.
 \end{aligned}$$

$$u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_o + \frac{d}{dt} \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma + \psi_o + r i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_o = 0;$$

$$u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_o + \frac{d\psi_d}{dt} \cos \gamma - \psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\psi_q}{dt} \sin \gamma + \psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\psi_o}{dt} + r i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_o = 0.$$

Группируем слагаемые:

$$\left( u_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\gamma}{dt} + r i_d \right) \cos \gamma + \left( u_q + r i_q - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} + \frac{d\psi_q}{dt} \right) \sin \gamma + \left( \frac{d\psi_o}{dt} + u_o + r i_o \right) = 0$$

Приравнивая нулю каждого выражения в скобках и добавляя уравнение для обмотки возбуждения (8.1) и соотношения для потокоцеплений (8.4), получаем дифференциальные уравнения модели, носящие название уравнений Парка–Горева, выражающие основу теории двух реакций:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - r i_d \\ u_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - r i_q \\ u_o = -\frac{d\psi_o}{dt} - r i_o \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ \psi_d = L_d i_d + M_f i_f; \\ \psi_q = L_q i_q \\ \psi_f = L_f i_f + M_f i_d \\ \psi_o = L_o i_o \end{array} \right. \quad (8.5)$$

Некоторые допущения, которые имели место, могут быть сняты. Так, если добавить уравнение движения, то уравнения могут быть использованы для решения задач расчета электромеханических переходных процессов.

Например:  $T_j \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + P_{\mathcal{O}} = P_{\text{мех}}$ .

$\frac{d\psi_d}{dt}$  — ЭДС трансформации. С учетом известного выражения для ЭДС вращения  $E_q = -j\omega\psi_d$  при синхронной скорости вращения  $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega t + \gamma_0) = \omega$  и  $\psi_q \frac{d\gamma}{dt} = \psi_q \omega$  — ЭДС вращения;  $ri$  — падение напряжения на активном сопротивлении.

### **8.5. Уравнения Парка–Горева в системе относительных единиц**

При  $x_* = \omega_* L_*$  и синхронной скорости  $\frac{d\gamma}{dt} = \omega_* = 1$ . В дальнейшем опускаем индекс относительной величины \*, и уравнения (8.5) принимают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q - ri_d \\ u_q = -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d - ri_q \\ u_o = -\frac{d\psi_o}{dt} - ri_o \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f; \\ \psi_q = x_q i_q \\ \psi_f = x_f i_f + x_{ad} i_d \\ \psi_o = x_o i_o. \end{array} \right. \quad (8.6)$$

В такой форме уравнения применяются для анализа электромагнитных переходных процессов.



## 8.6. Уравнения Парка–Горева в операторной форме

Решение уравнений Парка–Горева обычно производят в операторной форме с применением преобразования Лапласа. При этом уравнения становятся алгебраическими и решаются стандартными методами. Для упрощения решения его производят при нулевых начальных условиях, то есть для приращений. По принципу наложения полученные решения для приращений суммируются с начальными условиями. С учетом основных соотношений преоб-

разований Лапласа:  $f(t) \equiv F(p)$  и  $\frac{df(t)}{dt} \equiv pF(p) - f(0)$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta U_d(p) = -p\Delta\Psi_d(p) - \Delta\Psi_q(p) - r\Delta i_d(p); \\ \Delta U_q(p) = -p\Delta\Psi_q(p) + \Delta\Psi_d(p) - r\Delta i_q(p); \\ \Delta U_0(p) = -p\Delta\Psi_0(p) - r\Delta i_0(p); \\ \Delta U_f(p) = p\Delta\Psi_f(p) + r_f\Delta i_f(p); \\ \Delta\Psi_d(p) = x_d\Delta i_d(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) \\ \Delta\Psi_q(p) = x_q\Delta i_q(p); \\ \Delta\Psi_0(p) = x_o\Delta i_o(p); \\ \Delta\Psi_f(p) = x_f\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_d(p). \end{array} \right. \quad (8.7)$$

Из выражений (8.7) могут быть определены операторные реактивности синхронной машины:

$$x_q(p) = x_q; \quad x_0(p) = x_0; \quad x_d(p) = x_d \frac{1 + T_d' p}{1 + T_{d0} p}.$$

Здесь:  $T_{d0} = \frac{x_f}{r_f} = T_{f0}$  — постоянная времени обмотки возбуж-

дения при разомкнутом статоре;  $T_d' = T_{d0} \frac{x_d'}{x_x}$  — постоянная времени обмотки возбуждения при короткозамкнутом статоре. В начальный момент времени —  $x_d(p) = x_d'$ ; в установившемся режиме —  $x_d(p) = x_d$ .

### 8.7. Переходный процесс при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение

Простейшим случаем решения уравнений Парка–Горева является исследование переходного процесса при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение. Решение этой задачи имеет большое значение при анализе систем регулирования и форсировки возбуждения, так как выявляет факторы, влияющие на скорость изменения тока возбуждения и скорость изменения ЭДС статора.

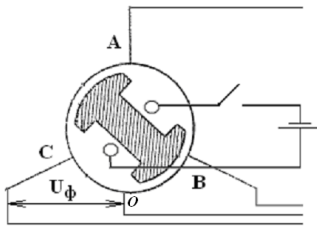


Рис. 8.6. Расчетная модель

Допущения:

- 1) все начальные условия нулевые  $\Delta F(p) = F(p)$ ;
- 2) режим симметричный  $U_0 = \Psi_0 = 0$ ;
- 3) постоянное напряжение возбуждения, т.е. нет АРВ  $U_f = \text{const}$ ;
- 4) статор разомкнут, т.е. токов статора не будет.  $i_d = i_q = 0$ .

С учетом начальных условий уравнения (8.7) принимают вид:

$$\begin{cases} U_d(p) = -p\Psi_d \quad p \\ U_q(p) = \Psi_d \quad p \\ U_f(p) = p\Psi_f \quad p + r_f i_f \quad p . \\ \Psi_d \quad p = x_{ad} i_f \quad p \\ \Psi_f \quad p = x_f i_f \quad p \end{cases} \quad (8.8)$$

С подстановкой потокосцеплений

$$U_d(p) = px_{ad} i_f \quad p ; U_q(p) = -x_{ad} i_f \quad p ;$$

$$\frac{U_f}{p} = px_f i_f \quad p + r_f i_f \quad p ; \text{ и } i_f(p) = \frac{U_f}{p(px_f + r_f)} = \frac{U_f}{x_f p(p + \frac{r_f}{x_f})}.$$

Решение уравнения с учетом табличного соотношения перехода к временной функции  $\frac{1}{p(p+\alpha)} = \frac{1}{\alpha}(1-e^{-\alpha t})$ :

$$i_f(t) = \frac{U_f x_f}{x_f r_f} (1 - e^{-\frac{t}{T_f}}) = i_{f0} (1 - e^{-\frac{t}{T_f}}) \text{ — закон изменения тока возбуждения.}$$

$U_d(t) = -\frac{d}{dt} i_f t x_{ad} = -\frac{1}{T_{f0}} i_{f0} e^{-\frac{t}{T_{f0}}} x_{ad} = -\frac{E_q}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{f0}}}$  — огибающая ЭДС трансформации;

$U_q(t) = i_{f0} (1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}}) x_{ad} = E_q (1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}})$  — огибающая ЭДС вращения.

С учетом (8.3),  $U_A = U_d \cos \gamma + U_q \sin \gamma$  — при переходе к трехфазной машине:

$$U_A = -\frac{E_q}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \cos(\omega t + \gamma_0) + E_q (1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}}) \sin(\omega t + \gamma_0). \quad (8.9)$$

Здесь:  $\frac{E_q}{T_{f0}} e^{-\frac{t}{T_{f0}}} \cos(\omega t + \gamma_0)$  — ЭДС трансформации;

$E_q (1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}}) \sin(\omega t + \gamma_0)$  — ЭДС вращения.

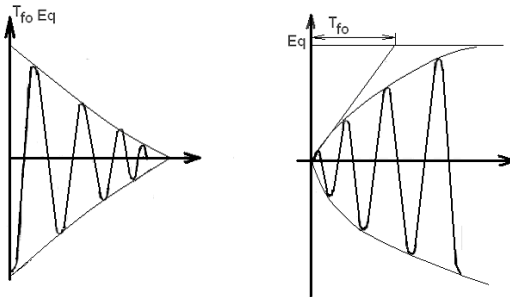


Рис. 8.7. Характер изменения составляющих ЭДС статора

При реальных значениях постоянных времени генераторов  $T_{f0} \approx 5 \dots 10$  с, или в относительных единицах  $T_{f0} = 1500 \dots 3000$  о.е ЭДС трансформации в тысячи раз меньше ЭДС вращения, и поэтому в практике расчетов может не учитываться. В этом случае

$$U_A = E_q \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{f0}}}\right) \sin(\omega t + \gamma_0) \text{ для фазы А.}$$

Для машины с демпферными обмотками вводят:  $T_{d0} = T_{f0} + T_{1d0}$ , при этом скорость нарастания ЭДС статора уменьшается.

### 8.8. Внезапное КЗ синхронной машины без демпферных обмоток

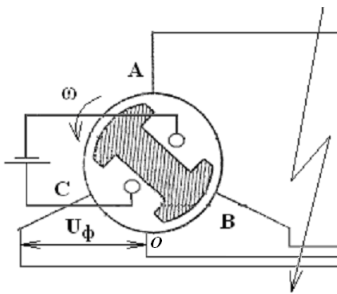


Рис. 8.8. Расчетная модель

Ранее были рассмотрены вопросы определения периодической и аperiodической составляющих тока КЗ в первый период и установившемся режиме короткого замыкания исходя из физических соображений. Представляется важным строго исследовать переходный процесс для любого момента времени и уточнить полученные ранее расчетные выражения на основе решения уравнений Парка–Горева для внезапного трехфазного КЗ на шинах синхронной машины без демпферных обмоток.

Допущения:

- 1) режим симметричный  $U_0 = \Psi_0 = 0$  ;
- 2) КЗ металлическое, т.е. напряжение на выводах при КЗ равно нулю;  $\Delta U_d(p) = -U_{d0} / p$ ;  $\Delta U_q(p) = -U_{q0} / p$  ;
- 3) отсутствует АРВ и приращение  $\Delta U_f(p) = 0$  ;
- 4) индуктивные сопротивления цепи статора намного больше активных. Уравнения (8.7) с учетом допущений принимают вид:

$$\begin{cases} -\frac{U_{d0}}{p} = -p\Delta\Psi_d \text{ } p - \Delta\Psi_q \text{ } p - r\Delta i_d \text{ } p ; & \Delta\Psi_d \text{ } p = x_d\Delta i_d \text{ } p + x_{ad}\Delta i_f \text{ } p \\ -\frac{U_{q0}}{p} = -p\Delta\Psi_q \text{ } p + \Delta\Psi_d \text{ } p - r\Delta i_q \text{ } p ; & \Delta\Psi_q \text{ } p = x_q\Delta i_q \text{ } p ; \\ 0 = p\Delta\Psi_f \text{ } p + r_f i_f \text{ } p ; \cdot & \Delta\Psi_f \text{ } p = x_f\Delta i_f \text{ } p + x_{ad}\Delta i_d \text{ } p \end{cases} \quad (8.10)$$

Решение системы (8.10) [9, 15] с переходом к трехфазной машине:

$$\begin{aligned} i_A = & -\left(\frac{E_{q0m}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0m}}{x_d} - \frac{E_{q0m}}{x_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d}}\right)\cos(\omega t + \gamma_0) - \\ & -(u_{q0}\cos\gamma_0 + u_{d0}\sin\gamma_0)\frac{x_q + x'_d}{2x'_d x_q}e^{-\frac{t}{T_a}} - \\ & -(u_{q0}\cos(2\omega t + \gamma_0) - u_{d0}\sin(2\omega t + \gamma_0))\frac{x_q - x'_d}{2x'_d x_q}e^{-\frac{t}{T_a}}. \end{aligned}$$

Характер тока статора при трехфазном КЗ приведен на рисунке 8.9.

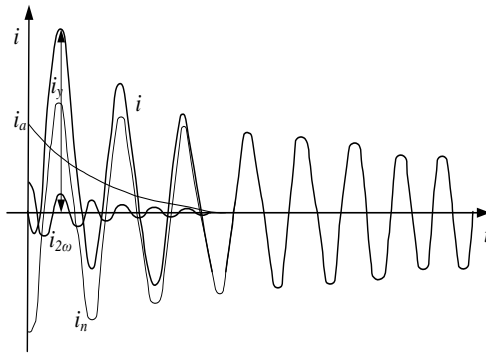


Рис. 8.9. Характер тока статора при трехфазном КЗ

На рисунке 8.9.  $-\left(\frac{E_{q0m}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q0m}}{x_d} - \frac{E_{q0m}}{x_d}\right)e^{-\frac{t}{T_d}}\right)\cos(\omega t + \gamma_0) = i_n$  — периодическая составляющая тока;

$$-(u_{q0} \cos \gamma_0 + u_{d0} \sin \gamma_0) \frac{x_q + x_d'}{2x_d' x_q} e^{-\frac{t}{T_a}} = i_a$$
 — аperiodическая составляющая тока;

$$-(u_{q0} \cos(2\omega t + \gamma_0) - u_{d0} \sin(2\omega t + \gamma_0)) \frac{x_q - x_d'}{2x_d' x_q} e^{-\frac{t}{T_a}} = i_{2\omega}$$
 — вторая гармоника.

Ток в обмотке возбуждения:

$$i_f = i_{f0} + \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \cdot \frac{u_{q0}}{x_d'} e^{-\frac{t}{T_d}} - \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \cdot \frac{u_{q0}}{x_d'} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \omega t. \quad (8.12)$$

## 9. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

### 9.1. *Применимость метода симметричных составляющих в расчетах несимметричных КЗ*

Из курса ТОЭ известно, что в электрических устройствах, выполненных несимметрично, применение метода симметричных составляющих в значительной мере упрощает анализ несимметричных режимов, поскольку при этом симметричные составляющие токов связаны законом Ома с симметричными составляющими напряжений только одноименной последовательности. Другими словами, если какой-либо элемент цепи несимметричен и обладает по отношению к симметричным составляющим токов прямой ( $I_1$ ), обратной ( $I_2$ ) и нулевой ( $I_0$ ) последовательностей сопротивлениями  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_0$  соответственно, то симметричные составляющие напряжений в этом элементе будут определяться как

$$U_1 = I_1 Z_1; \quad (9.1)$$

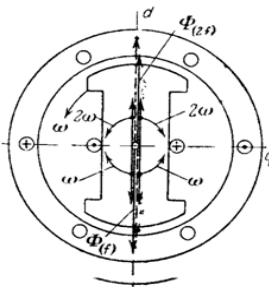
$$\dot{U}_2 = I_2 Z_2; \quad (9.2)$$

$$U_0 = I_0 Z_0. \quad (9.3)$$

Все величины в уравнениях 9.1—9.3 и последующих комплексные. Для упрощения записи индекс комплексной записи, кроме необходимых случаев, будет опускаться. Сопротивления  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_0$  называют сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. Комплексная форма записи уравнений справедлива не только для установившегося режима, но и для переходного процесса, так как токи и напряжения при переходном процессе можно представить в виде проекций на соответствующую ось вращающихся и неподвижных векторов. Вместе с тем при переходном процессе в системах с вращающимися электрическими машинами строго метод не применим. Это связано с нелинейностью процесса и его нелинейностью, а метод

симметричных составляющих базируется на синусоидальном изменении составляющих и принципе наложения.

Пульсирующее поле статора вызывает вторую гармонику тока в обмотке возбуждения, и та в свою очередь вызывает третью гармонику тока статора. Третья гармоника тока статора приводит к образованию четвертой гармоники в роторе, и процесс повторяется. Аperiodическая составляющая тока статора приводит к образованию пульсирующего тока ротора и второй гармоники тока статора. Далее процесс образования высших гармоник повторяется, и в итоге при переходном процессе в статоре и роторе представлен весь ряд гармоник. При отсутствии емкости в цепи, амплитуды гармоник с ростом их порядкового номера уменьшаются. При любом несимметричном режиме синхронной машины возникают высшие гармоники, причем они проявляются при прочих равных условиях тем интенсивнее, чем больше несимметрия ротора.



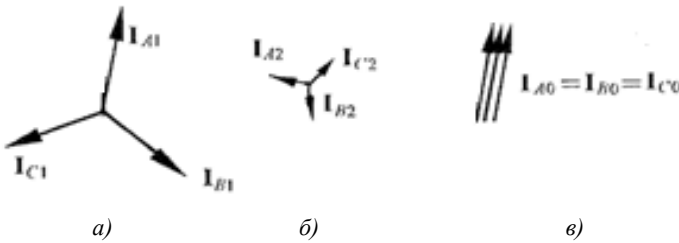
*Рис. 9.1. Образование высших гармоник при несимметричном режиме синхронной машины без демпферных обмоток*

Метод симметричных составляющих относится к искусственным методам расчета трехфазных цепей и широко применяется для анализа несимметричных режимов их работы. Основным положением метода симметричных составляющих является тезис о том, что любую несимметричную систему токов и других режимных параметров трехфазной системы можно разложить на три симметричные, называемые системами прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые различаются порядком чередования фаз, и рассматривать их независимо одну от другой (рис. 9.2).



Симметричные системы токов прямой и обратной последовательностей представляют собой три одинаковых по величине вектора, расположенных под углом  $120^\circ$ , вращающихся против часовой стрелки. Для прямой последовательности соблюдается нормальное чередование фаз А–В–С, а для обратной — обратное чередование фаз А–С–В. Соотношения между фазными значениями устанавливаются с помощью операторов поворота фазы:

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{и} \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$



**Рис. 9.2. Системы последовательностей:**  
 а) прямой; б) обратной; в) нулевой

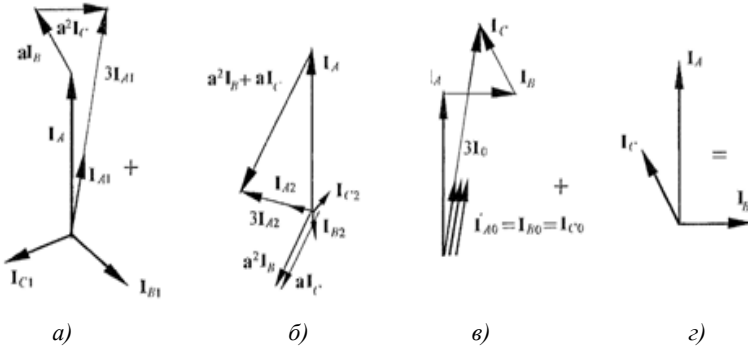
Симметричная система токов нулевой последовательности (рис. 9.2 в) отличается от прямой и обратной. Она представляет собой систему трех переменных токов, совпадающих по фазе и имеющих одинаковую амплитуду. Эти токи являются, по существу, разветвлением однофазного тока, для которого три провода трехфазной цепи составляют один прямой провод, а обратным служит земля или четвертый (нулевой) провод. Появление токов нулевой последовательности в сети означает возникновение в ней несимметричного замыкания на землю. Предположение о наличии трех последовательностей требует отдельного определения параметров элементов, определения путей протекания токов каждой последовательности и составления схем замещения для них.

После нахождения симметричных составляющих может быть синтезированы полные величины параметров режима каждой фазы через его симметричные составляющие:

$$\begin{aligned}
I_{\kappa A}^{(n)} &= I_{\kappa 1}^{(n)} + I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\
I_{\kappa B}^{(n)} &= a^2 I_{\kappa 1}^{(n)} + a I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\
I_{\kappa C}^{(n)} &= a I_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 I_{\kappa 2}^{(n)} + I_{\kappa 0}^{(n)} \\
U_{\kappa A}^{(n)} &= U_{\kappa 1}^{(n)} + U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \\
U_{\kappa B}^{(n)} &= a^2 U_{\kappa 1}^{(n)} + a U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)} \\
U_{\kappa C}^{(n)} &= a U_{\kappa 1}^{(n)} + a^2 U_{\kappa 2}^{(n)} + U_{\kappa 0}^{(n)}
\end{aligned}
\tag{9.4}$$

При известных полных величинах анализом могут быть найдены отдельные симметричные составляющие, например (см. рис. 9.3):

$$\begin{aligned}
I_{A1} &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \\
I_{A2} &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C); \\
I_{A0} &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)
\end{aligned}
\tag{9.5}$$



**Рис. 9.3. Разложение несимметричной системы токов на симметричные составляющие:**  
**а** — ток прямой последовательности, **б** — ток обратной последовательности, **в** — ток нулевой последовательности, **г** — несимметричная система токов

Протекающие по обмоткам статора токи прямой, обратной и нулевой последовательностей создают магнитные потоки тех же последовательностей, а последние наводят в статоре соответствующие ЭДС. Поэтому в расчет вводятся только те ЭДС,

которые или известны, или не зависят от внешних условий цепи статора, причем в силу симметричного выполнения статорной обмотки эти ЭДС являются ЭДС только прямой последовательности.

Установленные у синхронных машин устройства автоматического регулирования возбуждения независимо от их конструкции реагируют только на отклонения напряжения прямой последовательности и стремятся поддержать это напряжение на постоянном уровне, которое принимается равным номинальному для каждой машины.

В соответствии с этим для несимметричного КЗ основные уравнения второго закона Кирхгофа для отдельных последовательностей будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_{K1} &= E_{\Sigma} - I_{K1} Z_{1\Sigma}; \\ U_{K2} &= 0 - I_{K2} Z_{2\Sigma}; \\ U_{K0} &= 0 - I_{K0} Z_{0\Sigma}. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Подготовленные для анализа несимметричных коротких замыканий вида (n) при учете только индуктивных сопротивлений отдельных последовательностей уравнения (9.7) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa 1}^{(n)} &= E_{0\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{n\kappa 1}^{(n)} \\ U_{\kappa 2}^{(n)} &= 0 - jx_{2\Sigma} I_{n\kappa 2}^{(n)} \\ U_{\kappa 0}^{(n)} &= 0 - jx_{0\Sigma} I_{n\kappa 0}^{(n)} \end{aligned} \right\}, \quad (9.8)$$

где:  $U_{\kappa 1}^{(n)}, U_{\kappa 2}^{(n)}, U_{\kappa 0}^{(n)}, I_{n\kappa 1}^{(n)}, I_{n\kappa 2}^{(n)}, I_{n\kappa 0}^{(n)}$  — симметричные составляющие напряжения и тока в месте КЗ;  $E_{0\Sigma}$  — результирующая ЭДС прямой последовательности;  $x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$  — результирующие сопротивления схем соответствующих последовательностей относительно точки КЗ.

В подавляющем числе практических расчетов несимметричных переходных процессов обычно довольствуются учетом лишь основной гармоники токов и напряжений. Именно при таком ограничении представляется возможным применять метод симметричных составляющих в его обычной форме. Задача нахождения

токов и напряжений при рассматриваемом несимметричном переходном процессе по существу сводится к вычислению симметричных составляющих этих величин.

### ***9.2. Параметры элементов для прямой и обратной последовательностей***

Все сопротивления, которыми характеризуются отдельные элементы в нормальном симметричном режиме, а также в симметричном переходном процессе, по сути, являются сопротивлениями прямой последовательности (исключение составляет реактивность, используемая при определении постоянной времени  $T_d$ ). Такими элементами можно практически считать не связанные магнитно реакторы.

Система токов нулевой последовательности резко отличается от систем токов прямой и обратной последовательностей, вследствие чего сопротивления нулевой последовательности в общем случае весьма существенно отличаются от соответствующих сопротивлений двух других последовательностей.

*Синхронные машины.* Магнитный поток, созданный токами обратной последовательности синхронной частоты, вращаясь относительно ротора с двойной синхронной скоростью, встречает на своем пути непрерывно изменяющееся магнитное сопротивление. Это обусловлено магнитной несимметрией ротора и тем, что наведенные в продольных и поперечных контурах ротора токи создают различные реакции. Таким образом, поток обратной последовательности гармонически изменяется с двойной синхронной скоростью в пределах между наибольшим и наименьшим значениями. Как величина этого потока, так и сопротивление обратной последовательности зависит от удаленности КЗ и является переменным параметром.

Для синхронной машины без демпферных обмоток выражение реактивности при КЗ на шинах имеет вид:

$$x_2 = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q}. \quad (9.9)$$

Оно представляет собой реактивность обратной последовательности и определяется как отношение подведенного синусоидального напряжения обратной последовательности синхронной частоты к основной гармонике тока обратной последовательности.

Если напряжение обратной последовательности приложено непосредственно к статору машины, а через произвольную реактивность  $x$ , общая реактивность обратной последовательности всей цепи будет

$$x_{2\Sigma} = \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x}. \quad (9.10)$$

и на долю самой машины приходится величина

$$x_2 = \frac{2(x'_d + x)(x_q + x)}{x'_d + x_q + 2x} - x = \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)x}{x'_d + x_q + 2x}. \quad (9.11)$$

Как видно из (9.11), реактивность  $x_2$  зависит от внешней реактивности  $x$ . С увеличением внешней реактивности реактивность обратной последовательности машины стремится в пределе к

$$x_2 = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x'_d x_q + (x'_d + x_q)x}{x'_d + x_q + 2x} = \frac{x'_d + x_q}{2}. \quad (9.12)$$

При несимметричном режиме машины поле обратной последовательности основной частоты вызывает в статоре весь спектр нечетных гармоник. В этом случае схема замещения может быть развита в бесконечную цепную схему замещения, результирующая реактивность которой составляет

$$x_2 = \sqrt{x'_d x_q}. \quad (9.13)$$

Для машины с демпферными обмотками реактивность  $x_2$  может быть определена по тем же выражениям, если заменить в них  $x'_d$  и  $x_q$  на  $x''_d$  и  $x''_q$ . Величины реактивностей  $x''_d$  и  $x''_q$  обычно ближе друг к другу, чем  $x'_d$  и  $x_q$ . Поэтому у машин с полным демпфированием разница в значениях  $x_2$  очень мала.

В практических расчетах для синхронных машин целесообразно принимать реактивность  $x_2$  по выражению (9.9), что соответствует паспортным данным. Однако если необходимо учитывать высшие гармоники, то надлежит использовать более точное выражение (9.13).

В качестве приближенных принимают соотношения, указанные в таблице 9.1.

Таблица 9.1

*Соотношения реактивностей*

Машины без демпферных обмоток	$x_2 \approx 1,45x'_d$
Турбогенераторы и машины с продольно-поперечными демпферными обмотками	$x_2 \approx 1,22x''_d$

При практических расчетах используют дополнительное упрощение и принимают для турбогенераторов и машин с продольно-поперечными демпферными обмотками

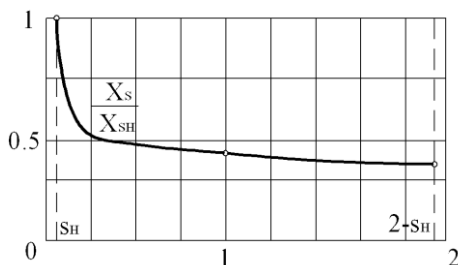
$$x_2 \approx x''_d. \tag{9.14}$$

Токи нулевой последовательности синхронных машин создают практически только магнитные потоки рассеяния статорной обмотки, которые меньше потоков прямой и обратной последовательности. Поэтому величину  $x_0$  принимают

$$x_0 = (0,15 \div 0,6)x''_d. \tag{9.15}$$

*Асинхронные двигатели.* В нормальном режиме работы асинхронный двигатель работает со скольжением  $s$ . Однако по отношению к магнитному потоку обратной последовательности синхронной частоты ротор двигателя имеет скольжение  $(2 - s)$ . Поэтому сопротивление обратной последовательности АД представляет собой его сопротивление при скольжении  $(2 - s)$  и, как видно из рисунка 9.5, близко к сверхпереходному, или пусковому сопротивлению

$$x_2 \approx x'' = \frac{1}{I_{\text{пуск}^*}} = (0,125 - 0,35).$$



**Рис. 9.5. Относительное изменение индуктивного сопротивления АД в зависимости от скольжения**

Реактивность нулевой последовательности АД определяется только рассеянием статорной обмотки и сильно зависит от ее типа и конструкции, в расчетах принимается  $x_0 = (0,15 \div 0,6)x''$ .

*Обобщенная нагрузка.* Реактивность обратной последовательности обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемой нагрузке. Для средней типовой промышленной нагрузки можно считать, что основная часть состоит из асинхронных двигателей. Поэтому для реактивности обратной последовательности обобщенной нагрузки в практических расчетах можно принимать величину  $x_2 = 0,35$ , считая ее отнесенной к полной рабочей мощности данной нагрузки и среднему номинальному напряжению той ступени, где она присоединена.

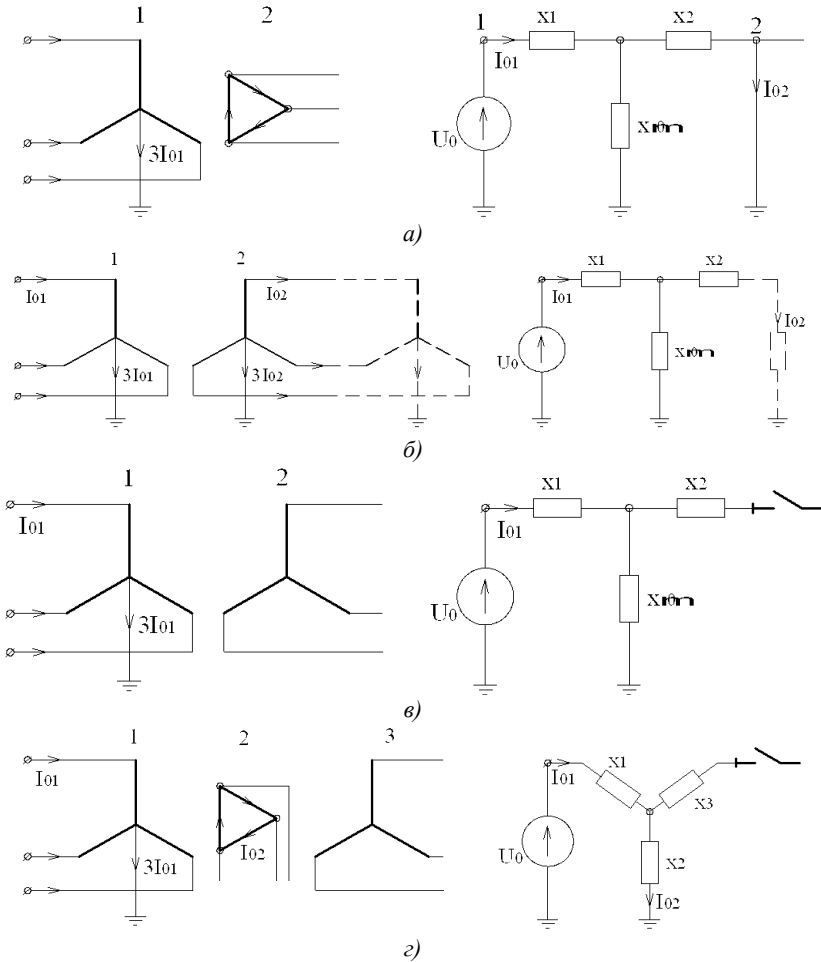
Так как обобщенная нагрузка включает в себя сеть и понижающие трансформаторы, ее сопротивление нулевой последовательности обычно определяется именно этими элементами.

### **9.3. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов**

*Трансформаторы.* Реактивность нулевой последовательности трансформатора в значительной мере определяется его конструкцией и соединением обмоток.

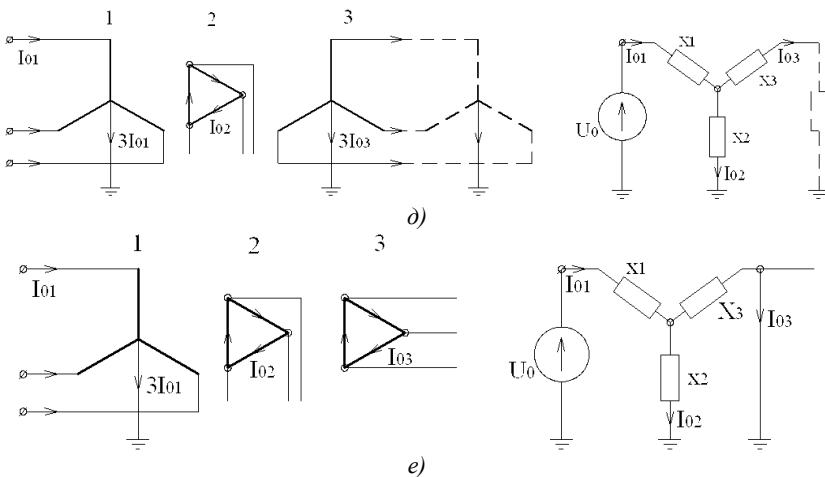
Со стороны обмотки, соединенной в треугольник или звезду без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, реактивность нулевой последовательности

трансформатора, очевидно, бесконечно велика ( $x_0 = \infty$ ), так как при этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе. Следовательно, конечная реактивность нулевой последовательности трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.



**Рис. 9.6.** Соединение обмоток трансформатора и схемы замещения нулевой последовательности (начало)





**Рис. 9.6. Соединение обмоток трансформатора и схемы замещения нулевой последовательности (окончание)**

На рисунке 9.6 а, б, в приведены основные варианты соединения обмоток двухобмоточного трансформатора, при которых приложенное к обмотке 1 напряжение нулевой последовательности вызывает в одной или в обеих обмотках ток той же последовательности. Справа показаны схемы замещения трансформатора (без учета активных сопротивлений) для токов нулевой последовательности.

При соединении обмоток  $Y_0/\Delta$  (рис. 9.6 а) ЭДС целиком расходуется на проведение тока той же последовательности только через реактивность рассеяния обмотки, соединенной в треугольник.

При соединении обмоток  $Y_0/Y_0$  (рис. 9.6 б) схема замещения предполагает, что на стороне обмотки 2 обеспечен путь для тока нулевой последовательности, т.е. в цепи этой обмотки имеется заземленная нейтраль. Если этого нет, то схема замещения будет  $Y_0/Y$  (рис. 9.6 в), что соответствует режиму ХХ трансформатора.

Теперь оценим величину реактивности намагничивания нулевой последовательности трансформатора  $x_{\mu 0}$ .

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также для трехфазных четырех и пятистержневых (броневого) трансформаторов ток намагничивания нулевой последовательности очень

мал, так как в этом случае условия для магнитного потока практически те же, что и при питании трансформатора от источника напряжения прямой (или обратной) последовательности. Поэтому можно считать  $x_{\mu 0} = \infty$ .

В трехфазных трехстержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности вынуждены замыкаться через изолирующую среду или кожух трансформатора. Для прохождения магнитного потока через столь высокое магнитное сопротивление необходим достаточно большой ток намагничивания. Следовательно, реактивность  $x_{\mu 0}$  у трансформатора такого типа значительно меньше, чем  $x_{\mu 1}$ . В зависимости от конструкции трансформатора она составляет  $x_{\mu 0} = 0,3 \div 1,0$ . При этом, поскольку величина  $x_2 \ll x_{\mu 0}$ , то можно считать для трехстержневого трансформатора с соединением  $Y_0 / \Delta$  что  $x_{\mu 0} \approx \infty$ .

В таблице 9.2 приведем указания по оценке реактивности нулевой последовательности двухобмоточного трансформатора.

Таблица 9.2

### Оценка реактивностей двухобмоточного трансформатора

Тип трансформатора и соединение его обмоток	$x_0$
Трансформатор любого типа с соединением обмоток $Y_0 / \Delta$	$x_1$
Трехфазная группа из однофазных трансформаторов, трехфазный четырех- или пятистержневой трансформатор: — с соединением обмоток $Y_0 / Y$ — с соединением $Y_0 / Y_0$	$\infty$ Вводится схемой замещения
Трехфазный трехстержневой трансформатор: — с соединением $Y_0 / Y$ — с соединением $Y_0 / Y_0$	$x_1 + x_{\mu 0}$ По рисунку 9.6 б

Сопротивления на пути протекания общего тока (сопротивления в нейтрали, сопротивление нулевого провода и земли) *вводятся в*

схему замещения нулевой последовательности одной фазы утренной величиной.

У трехобмоточных трансформаторов одна из обмоток, как правило, соединена в треугольник. Поэтому для них всегда можно принимать  $x_{\mu 0} = \infty$ .

Основные варианты соединения обмоток трехобмоточного трансформатора и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности (считая  $U_0$  приложенным со стороны обмотки 1) приведены на рисунке 9.6 *г, д, е*.

В варианте рисунка 9.6 *г* ток нулевой последовательности в обмотке 3 отсутствует. Следовательно, в этом случае

$$x_0 = x_1 + x_2 = x_{1-2}. \quad (9.17)$$

На рисунке 9.6 *д* предполагается, что путь для тока нулевой последовательности на стороне обмотки 3 обеспечен. В этом случае в схему нулевой последовательности трансформатор должен быть введен своей схемой замещения.

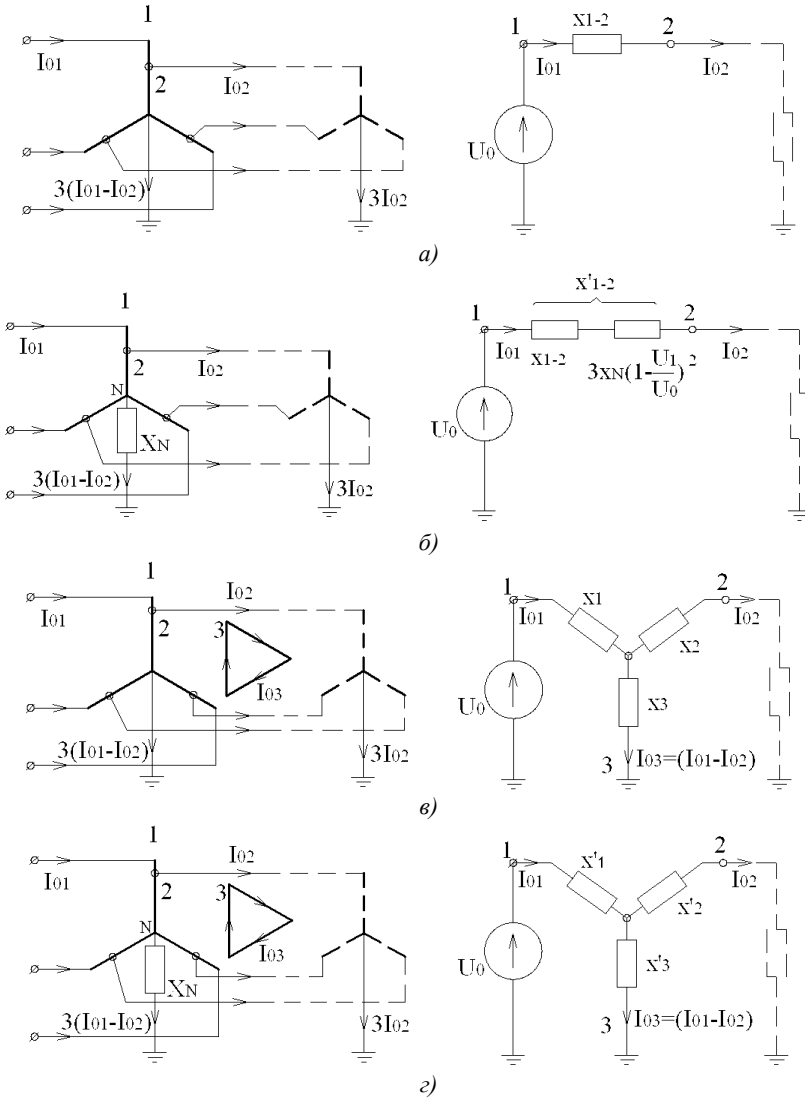
На рисунке 9.6 *е* компенсация тока нулевой последовательности обмотки 1 осуществляется токами, наведенными в обмотках 2 и 3. В этом случае

$$x_0 = x_1 + \frac{x_2 x_3}{x_2 + x_3}. \quad (9.18)$$

*Автотрансформаторы.* Обмотки автотрансформатора связаны между собой не только магнитно, но и электрически. Поэтому имеют место иные условия для протекания токов нулевой последовательности, которые должны быть отражены в схеме замещения нулевой последовательности автотрансформатора.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформатора его схема замещения нулевой последовательности аналогична схеме соответствующего трансформатора. Если у автотрансформатора нет третьей обмотки и во вторичной цепи обеспечен путь для тока нулевой последовательности, его схема замещения (при пренебрежении намагничивающим током и активными сопротивлениями) представляется суммарной реактивностью рассеяния (рис. 9.7 *а*). При наличии третьей обмотки, соединенной треугольником,

схема замещения имеет вид, показанный на рисунке 9.7 в, т.е. такой же, как и у трехобмоточного трансформатора при соответствующем соединении его обмоток.



**Рис. 9.7. Соединения обмоток автотрансформатора и их схемы замещения для токов нулевой последовательности (окончание)**

Непосредственно из схемы замещения нулевой последовательности автотрансформатора нельзя получить ток, протекающий в нейтрали. При указанных на рисунке 9.7 б направлениях токов искомым ток в нейтрали равен утроенной разности токов нулевой последовательности первичной и вторичной цепей, т.е.

$$I_N = 3(I_{01} - I_{02}). \quad (9.19)$$

При этом каждый из них должен быть отнесен к своей ступени напряжения.

Допустим, что нейтраль автотрансформатора заземлена через реактивность  $x_N$  (рис. 9.7 б). Если напряжение на нейтрали  $U_N$  и напряжение выводов ступеней 1 и 2 относительно нейтрали составляют соответственно  $U_{N1}$  и  $U_{N2}$ , то результирующая реактивность будет иметь вид:

$$x_{12} = \frac{(U_{N1} + U_N) - (U_{N2} + U_N) \frac{U_1}{U_2}}{I_{01}} = \frac{U_{N1} - U_{N2}}{I_{01}} + \frac{U_N}{I_{01}} \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right). \quad (9.20)$$

Поскольку  $\frac{U_{N1} - U_{N2}}{I_{01}} = x_{1-2}$ , где  $x_{1-2}$  — реактивность рассеяния автотрансформатора, отнесенная к ступени  $I$ , и

$$\frac{U_N}{I_{01}} = \frac{3x_N(I_{01} - I_{02})}{I_{01}} = 3x_N \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right),$$

то окончательно

$$x'_{1-2} = x_{1-2} + 3x_N \left(1 - \frac{U_1}{U_2}\right)^2. \quad (9.21)$$

Аналогичным образом для автотрансформатора, имеющего третью обмотку, соединенную треугольником (рис. 9.7 з) получим

$$x'_{1-3} = x_{1-3} + 3x_N; \quad (9.22)$$

$$x'_{2-3} = x_{2-3} + 3x_N \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2. \quad (9.23)$$

Используя (9.22) — (9.23), получим реактивности трехлучевой схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= x_1 + 3x_N \left( 1 - \frac{U_1}{U_2} \right); \\ x'_2 &= x_2 + 3x_N \frac{(U_1 - U_2)U_1}{U_2^2}; \\ x'_3 &= x_3 + 3x_N \frac{U_1}{U_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9.24)$$

У автотрансформатора без третьей обмотки разземление нейтрали приводит к тому, что в схеме нулевой последовательности такой автотрансформатор оказывается в режиме XX. Ток намагничивания такого автотрансформатора достаточно мал, и им можно пренебречь. Поэтому для него справедливо  $x_{\mu 0} = \infty$ .

#### **9.4. Сопротивления нулевой последовательности воздушных и кабельных линий**

Ток нулевой последовательности ВЛЭП возвращается через землю и по заземленным цепям, расположенным параллельно линии (защитные тросы, рельсовые пути вдоль линии и др.). Главная трудность точного определения сопротивления нулевой последовательности ВЛЭП связана с учетом распределения тока в земле. Достаточно полное и строгое решение в предположении постоянства электрической проводимости земли выполнено Карсоном. Установленные им формулы позволяют вычислить отдельные составляющие и полное сопротивление нулевой последовательности ВЛЭП при токах промышленной частоты и обычно встречающихся значениях проводимости земли.

Представим себе однопроводную линию переменного тока, обратным проводом которой служит земля (рис 9.8). Плотность тока в земле распределена по мере удаления от линии. Наибольшая плотность тока имеет место на поверхности земли непосредственно под проводником. Индуктивность такой линии может быть определена как индуктивность эквивалентной двухпроводной линии с расстоянием между проводами  $D_3$ , которое называется эквивалентной глубиной возврата тока через землю и может быть определено как

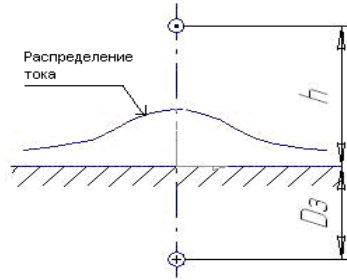


Рис. 9.8. Распределение тока однопроводной линии «провод-земля»

$$D_3 = \frac{2,085}{\sqrt{f \lambda 10^{-9}}} \cdot 10^{-3}, \text{ м}, \quad (9.25)$$

где  $f$  — частота тока, Гц;  $\lambda$  — удельная проводимость земли,  $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ .

При частоте 50 Гц и среднем значении  $\lambda = 10^{-4}$  величина  $D_3 = 935 \text{ м}$ . При отсутствии данных о проводимости земли обычно принимают  $D_3 = 1000 \text{ м}$ .

Таким образом, индуктивное сопротивление линии находится как

$$x_L = 0,1451 \lg \frac{D_3}{R_3}. \quad (9.26)$$

Здесь  $R_3$  — эквивалентный радиус провода. Для линии с расщепленными проводами вместо  $R_3$  следует вводить средний геометрический радиус  $R_{cp} = \sqrt[n]{R_3 a_{cp}^{n-1}}$  системы проводов одной фазы, где  $n$  — число проводов в фазе,  $a_{cp}$  — среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Активное сопротивление линии складывается из активного сопротивления провода  $r_n$  и дополнительного сопротивления  $r_3$ , учитывающего потерю активной мощности в земле от протекающего в ней тока. Сопротивление  $r_3 = \pi^2 f 10^{-4}$  практически не зависит от проводимости земли.

Сопротивление, обусловленное взаимойиндукцией между параллельными линиями с расстоянием  $d$  между осями их проводов, определяются как

$$Z_M = 0,05 + j0,1451g \frac{D_3}{d}. \quad (9.27)$$

Для трехфазной одноцепной линии сопротивление взаимойиндукции между фазами при возврате тока через землю определяется как

$$Z_{Mcp} = 0,05 + j0,1451g \frac{D_3}{D_{cp}}, \quad (9.28)$$

где  $D_{cp} = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ca}}$  — среднее расстояние между проводами.

Зная  $Z_L$  и  $Z_{Mcp}$ , можно найти сопротивление нулевой последовательности одноцепной трехфазной линии. Оно численно равно эффективному значению напряжения, которое должно быть приложено к каждому проводу данной линии, чтобы покрыть падение напряжения при протекании в фазах токов нулевой последовательности, т.е.

$$Z_0 = Z_L + Z_{Mcp} + Z_{Mcp} = Z_L + 2Z_{Mcp}. \quad (9.29)$$

После несложных преобразований получим:

$$Z_0 = r_n + 0,15 + j0,4351g \frac{D_3}{R_{cp}}. \quad (9.30)$$

Если по линии протекает ток прямой последовательности, то:

$$Z_1 = Z_L + a^2 Z_{Mcp} + a Z_{Mcp} = Z_L - Z_{Mcp}. \quad (9.31)$$



После подстановки и преобразования получим:

$$Z_1 = r_n + 0,1451g \frac{D_3}{r_0}. \quad (9.32)$$

В то время как при токе прямой (или обратной) последовательности взаимная индукция с другими фазами уменьшает сопротивление фазы, при токе нулевой последовательности она, напротив, увеличивает его. Поскольку  $Z_L$  и  $Z_{Mcp}$  у линии соизмеримы, величины  $Z_1$  и  $Z_0$  резко различаются между собой.

Сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии дополнительно увеличивается благодаря взаимной индукции с проводами параллельной цепи. Сопротивление взаимной индукции между проводом одной цепи и тремя проводами другой цепи можно определить по (9.28), где обе составляющие должны быть увеличены в 3 раза. Вместо  $D_{cp}$  введено среднее геометрическое расстояние  $D_{I-II}$  между цепями, определяемое через расстояние от каждого провода ( $a, b, c$ ) цепи  $I$  до каждого провода ( $a', b', c'$ ) цепи  $II$ :

$$D_{I-II} = \sqrt[3]{d_{aa'} d_{ab'} d_{ac'} d_{ba'} d_{bb'} d_{bc'} d_{ca'} d_{cb'} d_{cc'}}. \quad (9.33)$$

Тогда искомое сопротивление:

$$Z_{I-II} = 0,15 + j0,4351g \frac{D_3}{D_{I-II}}. \quad (9.34)$$

В случае, если параллельные цепи одинаковые, т.е.  $Z_{I0} = Z_{II0} = Z_0$ , то сопротивление нулевой последовательности каждой из них будет:

$$Z_0' = Z_0 + Z_{I-II0} \frac{1}{2}. \quad (9.35)$$

Сопротивление на фазу двухцепной линии будет определяться как

$$Z_0'' = 0,5Z_0' = 0,5(Z_0 + Z_{I-II0}). \quad (9.36)$$

Увеличение сопротивления нулевой последовательности вследствие влияния взаимной индукции параллельной цепи не превышает 10% при расстояниях между цепями порядка 400—500 м. При расположении обеих цепей на одной опоре взаимная индукция проявляется особенно сильно.

Теперь оценим влияния тросов на величину сопротивления нулевой последовательности линии. Тросы используют в качестве средства грозозащиты линии, располагая их в верхней точке опоры. До последнего времени тросы заземляли практически на каждой опоре (рис. 9.4 а).

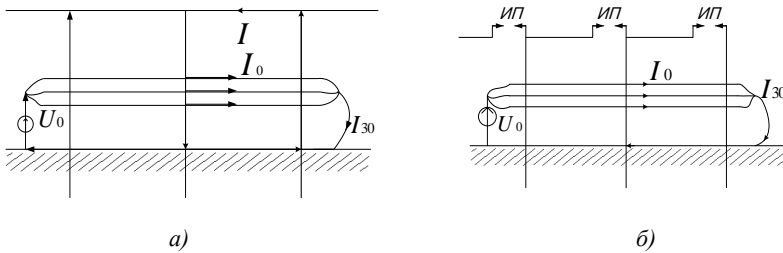


Рис. 9.4. Влияние тросов

При этом в образующихся короткозамкнутых контурах возможно протекание наведенных токов. Они малы при протекании по линии симметричной системы токов, следовательно,  $Z_1$  и  $Z_2$  практически не зависят от наличия заземленных тросов и могут быть значительными при протекании по линии тока нулевой последовательности. При этом ответная реакция от наведенных токов в тросе может существенно уменьшить сопротивление нулевой последовательности линии.

В последнее время для линий большой протяженности стали применять другую систему заземления защитных тросов. Тросы подвешивают на изоляторах и разрезают на ряд участков (рис. 9.4 б). С одного конца каждого участка тросы заземляют, а с другого между тросом и землей оставляют искровой промежуток, пробой которого наступает при возникновении перенапряжения определенной величины. При такой системе заземления тросов они практически не сказываются на сопротивлении нулевой последовательности линии.

При нескольких заземленных тросах их влияние на сопротивление нулевой последовательности сказывается сильнее.

В приближенных расчетах в качестве средних соотношений между индуктивными сопротивлениями  $x_0$  и  $x_1$  для воздушных линий можно принимать значения, приведенные в таблице 9.4.

Таблица 9.4

**Средние значения соотношений между  $x_0$  и  $x_1$   
для воздушных линий передачи**

Характеристика линии	отношение $x_0/x_1$
Одноцепная линия без тросов	3,5
Одноцепная линия со стальными тросами	3,0
Одноцепная линия с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная линия без тросов	5,5
Двухцепная линия со стальными тросами	4,7
Двухцепная линия с хорошо проводящими тросами	3,0

Реактивное емкостное сопротивление воздушной линии (на 1 км) определяется по следующим выражениям:

— для прямой (обратной) последовательности без учета влияния земли оно оказывается незначительным

$$x_{c1} = 1321 \lg \frac{D_{cp}}{r} 10^3, \quad (9.37)$$

где  $r$  — радиус провода;

$D_{cp}$  — среднее геометрическое расстояние между проводами фаз;

— для нулевой последовательности

$$x_{c0} = 3961 \lg \frac{D'_i}{R'_{cp}} 10^3, \quad (9.38)$$

где  $R'_{cp}$  — средний геометрический радиус систем трех проводов линии;

$D'_i = 2 \frac{h_a + h_b + h_c}{3}$  — среднее расстояние проводов фаз до их зеркальных отражений относительно поверхности земли ( $h_a$ ,  $h_b$

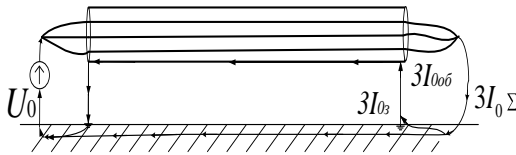
и  $h_c$  — высоты подвеса проводов фаз относительно земли). Заземленный трос несколько снижает емкостное сопротивление и заметно это лишь в нулевой последовательности.

*Кабельные линии.* Активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабеля можно определить так же, как и для ВЛЭП, используя (9.30). Прокладку кабеля производят на относительно малой глубине. Поэтому распределение тока практически не отличается от ВЛЭП. Это позволяет при определении сопротивления нулевой последовательности кабеля исходить из тех же принципов, что и для ВЛЭП.

Если бы трехжильный кабель не обладал проводящей оболочкой, то его сопротивление  $Z_0$  можно определить по (9.30), вводя в выражение среднегеометрический радиус трех жил

$$R_{cp} = \sqrt[3]{R_3 d^2}.$$

Оболочка кабеля, как правило, заземлена на концах и в промежуточных точках (муфтах), поэтому она образует путь для токов нулевой последовательности, параллельный земле (рис. 9.12). В этом отношении оболочка кабеля аналогична заземленным тросам у ВЛЭП. На распределение тока между оболочкой и землей существенное влияние оказывает не только собственное сопротивление оболочки, но и сопротивление ее заземлений, величины которых зависят от характера прокладки кабеля (траншея, блоки, эстакады и т.д.) и ряда других факторов, что очень затрудняет



**Рис. 9.12. Пути тока нулевой последовательности**  
 *$I_{0об}$  — ток, протекающий по оболочке кабеля;*  
 *$I_{0з}$  — ток, протекающий по земле*

расчет сопротивления нулевой последовательности кабеля.

В приближенных расчетах для трехжильного кабеля принимают:

$$r \approx 10r_1; x_0 \approx (3,5 \div 4,6)x_1. \quad (9.39)$$

Единственный путь получения надежных данных о  $Z_0$  кабеля состоит в проведении соответствующих замеров в реальных условиях.

Для трехжильного кабеля с круглыми жилами реактивное емкостное сопротивление нулевой последовательности можно найти по выражению:

$$x_{c0} = \frac{96,5}{1,85 + \frac{2R}{b+B}} \cdot 10^3, \quad (9.40)$$

где  $R$  — радиус жилы;

$b$  и  $B$  — толщина фазной и поясной изоляции.

Для кабеля с секторными жилами, имеющими ту же поверхность проводника и ту же толщину изоляции, как и у кабеля с круглыми жилами, емкостные сопротивления  $x_{c1}$  и  $x_{c0}$  несколько меньше.

### **9.5. Схемы замещения отдельных последовательностей**

При применении метода симметричных составляющих к расчету любого несимметричного режима основной задачей является составление схем замещения в общем случае всех трех последовательностей: прямой, обратной и нулевой.

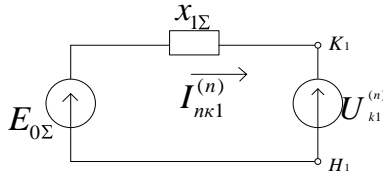
При аналитическом решении поставленной задачи по этим схемам находят результирующие сопротивления отдельных последовательностей рассматриваемой системы относительно места, где возникла несимметрия. Из схемы замещения прямой последовательности также находят результирующую ЭДС относительно той же точки.

Схемы замещения отдельных последовательностей составляют в соответствии с указанием [2]. В частности, элементы схем замещения выражают в именованных или относительных единицах, приведенных к базисным условиям.

*Схемы прямой и обратной последовательностей.*

Схема *прямой последовательности* является обычной схемой, составленной для расчета симметричного трехфазного режима. В нее вводят генераторы и нагрузки с соответствующими

реактивностями и ЭДС в зависимости от момента времени. Все остальные элементы вводятся в схему неизменными во времени сопротивлением.

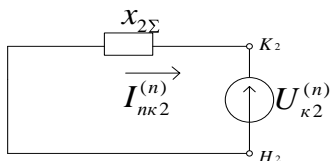


$$U_{k1}^{(n)} = E_{0\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{nk1}^{(n)}$$

**Рис. 9.13. Результирующая схема замещения прямой последовательности**

Поскольку пути циркуляции токов обратной последовательности те же, что и для токов прямой последовательности, *схема обратной последовательности* по структуре аналогична схеме прямой последовательности. Различие между ними состоит в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей условно принимают равными нулю. Кроме того, реактивности обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от вида и условий возникшей несимметрии, а также от времени.

Началом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей. Это точка нулевого потенциала схемы соответствующей последовательности. Концом схемы прямой или обратной последовательности считают точку, где возникла рассматриваемая несимметрия. При продольной несимметрии каждая из схем имеет два конца — точки, между которыми расположена данная несимметрия. К концу или между концами схем отдельных последовательностей приложены напряжения соответствующих последовательностей, возникшие в месте несимметрии. В результате преобразований схемы прямой и обратной последовательностей сводятся к виду, показанному на рис. 9.14. Там же даны основные уравнения.



$$U_{\kappa 2}^{(n)} = 0 - jx_{2\Sigma} I_{\text{нк}2}^{(n)}$$

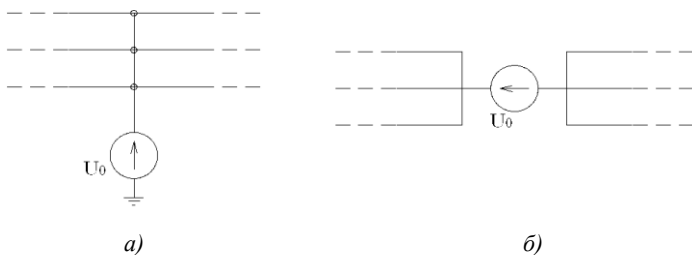
**Рис. 9.14. Результирующая схема замещения обратной последовательности**

*Схема нулевой последовательности.*

Токи нулевой последовательности по существу являются однофазным током, разветвленным между тремя фазами и возвращающимся через землю. Путь циркуляции токов резко отличается от пути, по которому проходят токи прямой или обратной последовательности.

Схема нулевой последовательности в значительной степени определяется соединением обмоток трансформаторов и автотрансформаторов.

Составление схемы нулевой последовательности начинается от точки, где возникла несимметрия, считая, что в этой точке все фазы замкнуты накоротко и к ней приложено напряжение нулевой последовательности.



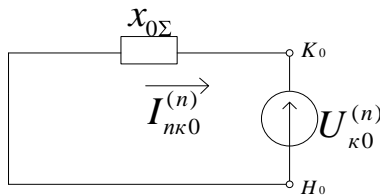
**Рис. 9.15. Напряжение нулевой последовательности а) при поперечной несимметрии; б) при продольной несимметрии**

В зависимости от вида несимметрии это напряжение прикладывается или относительно земли (поперечная несимметрия, рис. 9.15 а) или последовательно, в рассечку фазных проводов

(продольная несимметрия, рис. 9.15 б). Параметры схемы нулевой последовательности не зависят от времени. Схема имеет начало — точку нулевого потенциала и конец — точку, где возникла несимметрия.

Когда напряжение нулевой последовательности приложено относительно земли, то при отсутствии емкостной проводимости для циркуляции токов нулевой последовательности необходима, по меньшей мере, одна заземленная нейтраль в той же электрически связанной цепи, где приложено напряжение. При нескольких заземленных нейтралях в этой цепи образуется несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности. При продольной несимметрии циркуляция токов нулевой последовательности возможна даже при отсутствии заземленных нейтралей, если при этом имеется замкнутый контур через обходные пути той же электрически связанной цепи.

Сопротивление, через которое заземлена нейтраль трансформатора либо нагрузки, должно быть введено в схему нулевой последовательности утроенной величиной. Это обусловлено тем, что схема составляется для одной фазы, а через сопротивление протекает сумма трех токов всех фаз. В результате преобразований схема нулевой последовательности сводится к виду, показанному на рисунке 9.16. Там же дано основное уравнение.



$$U_{\kappa 0}^{(n)} = 0 - jx_{0\Sigma} I_{n\kappa 0}^{(n)}$$

**Рис. 9.16. Результирующая схема замещения нулевой последовательности**

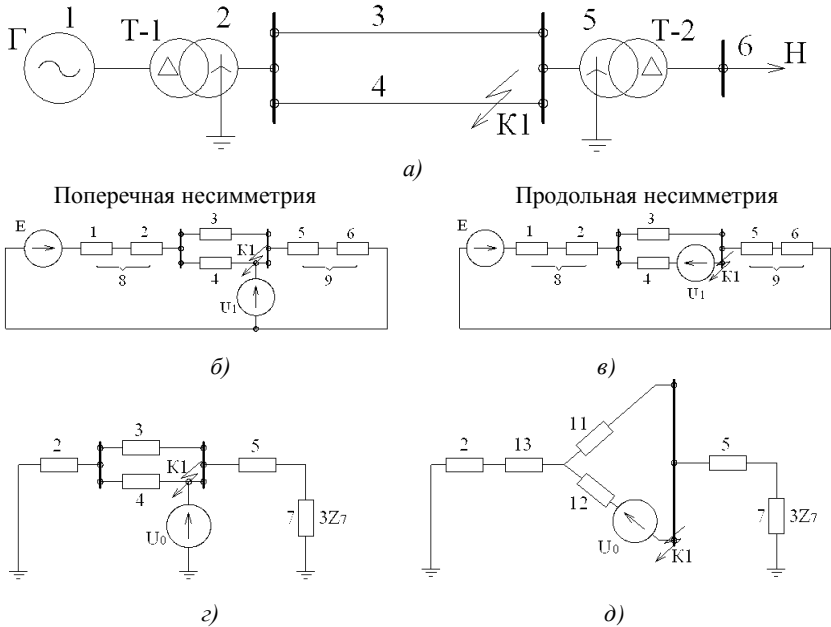
*Результирующие ЭДС и сопротивления.*

Этапом аналитического расчета несимметричного режима является определение результирующих сопротивлений и ЭДС схем отдельных последовательностей, относительно места несимметрии.



При этом преобразования схем при продольной и поперечной несимметрии существенно различаются [16].

Рассмотрим схему на рисунке 9.17 а.



**Рис. 9.17. Пример составления схем отдельных последовательностей**  
**а) исходная схема; б), в) прямая последовательность;**  
**г), д) нулевая последовательность**

Соотношения между величинами результирующих сопротивлений одноименной последовательности при поперечной и продольной несимметриях в одной и той же точке могут быть разными в зависимости от схемы, места несимметрии и других факторов.

## 10. ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

### 10.1. Общие положения

Поперечная несимметрия в произвольной точке трехфазной системы в общем виде может быть представлена присоединением в этой точке неодинаковых сопротивлений (рис. 10.1).

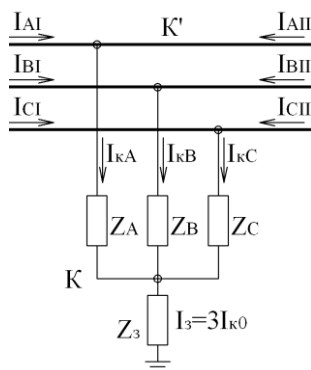


Рис. 10.1. Общий вид поперечной несимметрии в трехфазной системе

В настоящем разделе рассмотрены три вида несимметричных коротких замыкания (двухфазное, однофазное и двухфазное на землю); при этом предполагается, что эти замыкания металлические. Приводимые выкладки предполагают, что рассматриваются только основные гармоники тока и напряжения, причем схемы отдельных последовательностей состоят лишь из реактивностей и приведены к элементарному виду относительно короткого замыкания, т.е. найдены результирующая ЭДС  $E_{\Sigma}$  и результирующие реактивности  $x_{1\Sigma}$ ,  $x_{2\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$ .

При записи характерных для конкретного вида КЗ условий (граничных условий) примем, что фаза А находится в условиях, отличных от условий для двух других фаз и является «особой фазой». За положительное направление токов будем считать направление к месту КЗ.

## 10.2. Двухфазное КЗ. Определение токов и напряжений

Для дополнения исходной системы уравнений (9.8), записанной для  $K^{(2)}$

$$\left. \begin{aligned} U_{\kappa 1}^{(2)} &= E_{0\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{\kappa 1}^{(2)} \\ U_{\kappa 2}^{(2)} &= 0 - jx_{2\Sigma} I_{\kappa 2}^{(2)} \\ U_{\kappa 0}^{(2)} &= 0 - jx_{0\Sigma} I_{\kappa 0}^{(2)} \end{aligned} \right\}$$

Запишем граничные условия для двухфазного КЗ (рис. 10.2):

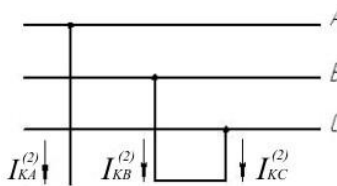


Рис. 10.2. Двухфазное КЗ  $K^{(2)}$

$$I_{KA}^{(2)} = 0; \text{ или } I_{KA}^{(2)} = I_{KA1}^{(2)} + I_{KA2}^{(2)} + I_{KA0}^{(2)} = 0 \quad (10.1)$$

$$I_{KB}^{(2)} = -I_{KC}^{(2)}; \text{ или } a^2 I_{KA1}^{(2)} + a I_{KA2}^{(2)} + I_{KA0}^{(2)} = -(a I_{KA1}^{(2)} + a^2 I_{KA2}^{(2)} + I_{KA0}^{(2)}); \quad (10.2)$$

$$\begin{aligned} U_{KB}^{(2)} - U_{KC}^{(2)} &= 0, \text{ или} \\ a^2 U_{KA1}^{(2)} + a U_{KA2}^{(2)} + U_{KA0}^{(2)} - a U_{KA1}^{(2)} - a^2 U_{KA2}^{(2)} - U_{KA0}^{(2)} &= 0 \end{aligned} \quad (10.3)$$

Поскольку система токов уравновешенная, т.е.  $I_{KA}^{(2)} + I_{KB}^{(2)} + I_{KC}^{(2)} = 0$ , то  $I_{K0}^{(2)} = 0$ , следовательно, (10.1) можно записать в виде

$$I_{KA}^{(2)} = I_{KA1}^{(2)} + I_{KA2}^{(2)} = 0, \text{ откуда } I_{KA1}^{(2)} = -I_{KA2}^{(2)}. \quad (10.4)$$

Из (10.3) следует:

$$\begin{aligned} a^2 U_{KA1}^{(2)} + a U_{KA2}^{(2)} + U_{KA0}^{(2)} - a U_{KA1}^{(2)} - a^2 U_{KA2}^{(2)} - U_{KA0}^{(2)} &= \\ = a^2 - a U_{KA1}^{(2)} - U_{KA2}^{(2)} &= 0 \end{aligned} ,$$

$$\text{откуда } U_{KA2}^{(2)} = U_{KA1}^{(2)}. \quad (10.5)$$

Соотношение (10.5) позволяет принять:

$$E_{A\Sigma} - jx_{1\Sigma}I_{KA1}^{(2)} = -jx_{2\Sigma}I_{KA2}^{(2)},$$

откуда после простых преобразований

$$I_{KA1}^{(2)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (10.6)$$

Токи поврежденных фаз в месте КЗ легко выразить через  $I_{KA1}^{(2)}$ , т.е.

$$I_{KB}^{(2)} = a^2 I_{KA1}^{(2)} + a I_{KA2}^{(2)} = (a^2 - a) I_{KA1}^{(2)} = -j\sqrt{3} I_{KA1}^{(2)}, \quad (10.7)$$

$$\text{и согласно (10.2) } I_{KC}^{(2)} = j\sqrt{3} I_{KA1}^{(2)}. \quad (10.8)$$

Напряжение прямой и обратной последовательности фазы А в месте КЗ будут:

$$U_{KA1}^{(2)} = U_{KA2}^{(2)} = jx_{2\Sigma} I_{KA1}^{(2)}. \quad (10.9)$$

Что касается напряжения нулевой последовательности, то оно может иметь произвольное значение, так как при рассмотрении данного вида КЗ смещение нейтрали системы относительно земли не влияет на величины токов. Поскольку в данном случае для токов путь через землю отсутствует ( $x_{0\Sigma} = \infty$ ), то:

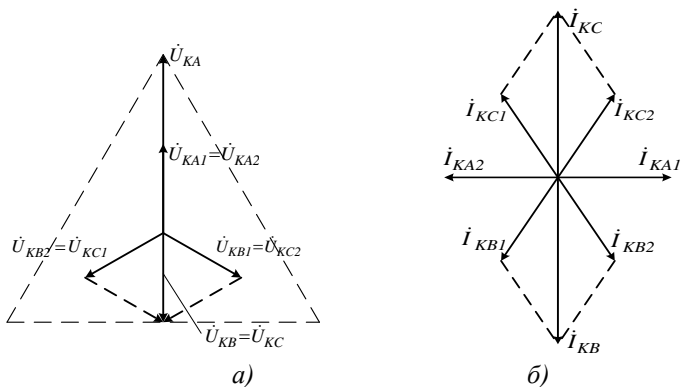
$$U_{KA}^{(2)} = -jx_{0\Sigma} I_{K0}^{(2)} = -\infty \cdot 0, \text{ что есть неопределенность.}$$

Фазные напряжения в месте КЗ составляют:

$$U_{KA}^{(2)} = U_{KA1}^{(2)} + U_{KA2}^{(2)} = 2U_{KA1}^{(2)} = 2jX_{2\Sigma} I_{KA1}^{(2)}; \quad (10.10)$$

$$U_{KB}^{(2)} = U_{KC}^{(2)} = a^2 U_{KA1}^{(2)} + a U_{KA2}^{(2)} = -U_{KA1}^{(2)} = -\frac{U_{KA}^{(2)}}{2}. \quad (10.11)$$

Построенные по полученным выражениям векторные диаграммы напряжений и токов в месте КЗ показаны на рисунке 10.3 а, б.



**Рис. 10.3. Двухфазное КЗ:**  
 а) векторная диаграмма напряжений в месте КЗ;  
 б) векторная диаграмма токов в месте КЗ

### 10.3. Однофазное КЗ. Определение токов и напряжений

При однофазном коротком замыкании на землю фазы А ( $K^{(1)}$ ) граничные условия будут:

$$I_{KB}^{(1)} = 0; \text{ или } a^2 I_{KA1}^{(1)} + a I_{KA2}^{(1)} + I_{KA0}^{(1)} = 0; \quad (10.12)$$

$$I_{KC}^{(1)} = 0; \text{ или } a I_{KA1}^{(1)} + a^2 I_{KA2}^{(1)} + I_{KA0}^{(1)} = 0; \quad (10.13)$$

$$U_{KA}^{(1)} = 0. \text{ или } U_{KA1}^{(1)} + U_{KA2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0. \quad (10.14)$$

Уравнения (10.12...10.14) совместно с уравнениями (9.8) можно записать в матричной форме:

1	0	0	$jx_{1\Sigma}$	0	0
0	1	0	0	$jx_{2\Sigma}$	0
0	0	1	0	0	$Jx0_\Sigma$
0	0	0	$a^2$	$a$	1
0	0	0	$a$	$a^2$	1
1	1	1	0	0	0

 $\times$ 

$U_{K1}$
$U_{K2}$
$U_{K0}$
$I_{K1}$
$I_{K2}$
$I_{K0}$

 $=$ 

$E_\Sigma$
0
0
0
0
0

Или  $Z \times X = E$  и решить используя стандартные методы решения систем алгебраических уравнений [13].

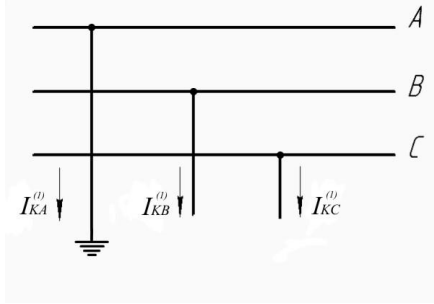


Рис. 10.4. Однофазное КЗ

Нетрудно убедиться, что при однофазном КЗ  $I_{KB}^{(1)} = 0$  и  $I_{KC}^{(1)} = 0$  и симметричные составляющие токов в месте КЗ связаны простыми соотношениями:

$$I_{KA1}^{(1)} = I_{KA2}^{(1)} = I_{K0}^{(1)} = \frac{1}{3} I_{KA}^{(1)}. \quad (10.15)$$

Для заземленной фазы в соответствии с (10.14) имеем:  
 $U_{KA}^{(1)} = U_{KA1}^{(1)} + U_{KA2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = 0$ , или  $E_{A\Sigma} - jI_{KA1}^{(1)}(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) = 0$ ,  
откуда получим  $I_{KA1}^{(1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}$ . (10.16)

Ток в поврежденной фазе в месте КЗ  $I_{KA}^{(1)} = 3I_{KA1}^{(1)}$ . (10.17)

Этот же ток в соответствии с (10.15) является током, в земле.

Симметричные составляющие напряжений в месте КЗ:

$$U_{K0}^{(1)} = -jx_{0\Sigma} I_{K0}^{(1)} = -jx_{0\Sigma} I_{KA1}^{(1)}; \quad (10.18)$$

$$U_{KA2}^{(1)} = -jx_{2\Sigma} I_{KA2}^{(1)} = -jx_{2\Sigma} I_{KA1}^{(1)}; \quad (10.19)$$

$$U_{KA1}^{(1)} = -(U_{KA2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)}) = j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) I_{KA1}^{(1)}. \quad (10.20)$$

Фазные напряжения относительно земли в месте КЗ:

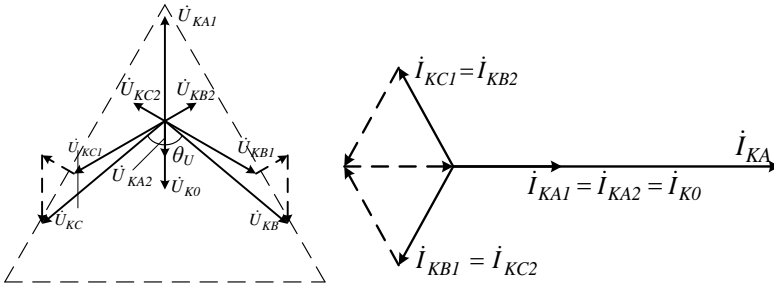
$$U_{KB}^{(1)} = a^2 U_{KA1}^{(1)} + a U_{KA2}^{(1)} + U_{K0}^{(1)} = j[a^2 - a x_{2\Sigma} + (a^2 - 1)x_{0\Sigma}] I_{KA1}^{(1)}; \quad (10.21)$$

$$U_{KC}^{(1)} = j[(a - a^2)x_{2\Sigma} + (a - 1)x_{0\Sigma}]I_{KA1}^{(1)}. \quad (10.22)$$

На рисунке 10.5 *a, б* приведены векторные диаграммы напряжений и токов в месте однофазного КЗ. Угол  $\theta_U$  между напряжениями неповрежденных фаз зависит от соотношения между  $x_{2\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$ . Он изменяется в широких пределах:

$$60^\circ \leq \theta_U < 180^\circ.$$

Нижний предел соответствует условию  $x_{0\Sigma} \rightarrow \infty$ , а верхний предел при  $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$ . При  $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$  угол  $\theta_U = 120^\circ$ .



**Рис. 10.5. Векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при однофазном коротком замыкании**

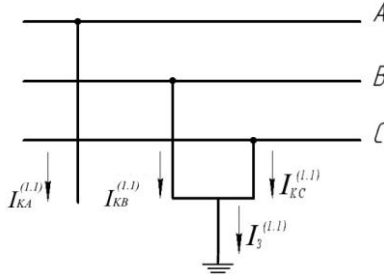
#### **10.4. Двухфазное КЗ на землю. Определение токов и напряжений**

При одновременном коротком замыкании фаз В и С на землю в одной точке (рис. 10.6) граничные условия будут:

$$I_{KA}^{(1,1)} = 0 \quad \text{или} \quad I_{KA1}^{(1,1)} + I_{KA2}^{(1,1)} + I_{K0}^{(1,1)} = 0; \quad (10.23)$$

$$U_{KB}^{(1,1)} = 0 \quad \text{или} \quad a^2U_{KA1}^{(1,1)} + aU_{KA2}^{(1,1)} + U_{KA0}^{(1,1)} = 0; \quad (10.24)$$

$$U_{KC}^{(1,1)} = 0 \quad \text{или} \quad aU_{KA1}^{(1,1)} + a^2U_{KA2}^{(1,1)} + U_{KA0}^{(1,1)} = 0. \quad (10.25)$$



**Рис. 10.6. Двухфазное КЗ на землю**

В записи через симметричные составляющие эти граничные условия с учетом основных соотношений метода дают

$$U_{KA1}^{(1,1)} = U_{KA2}^{(1,1)} = U_{K0}^{(1,1)} = \frac{U_{KA}^{(1,1)}}{3}. \quad (10.26)$$

С учетом уравнений (9.8) можно записать:

$$I_{KA2}^{(1,1)} jx_{2\Sigma} = I_{K0}^{(1,1)} jx_{0\Sigma}; \quad (10.27)$$

$$I_{K0}^{(1,1)} = -I_{KA1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (10.28)$$

Аналогично:  $I_{KA2}^{(1,1)} = -I_{KA1}^{(1,1)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}.$  (10.29)

$$U_{KA1}^{(1,1)} = E_{A\Sigma} - jx_{1\Sigma} I_{KA1}^{(1,1)} = U_{K0}^{(1,1)} = jI_{KA1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}, \quad (10.30)$$

откуда  $I_{KA1}^{(1,1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}})}.$  (10.31)

Токи поврежденных фаз в месте КЗ:

$$I_{KB}^{(1,1)} = \left( a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) I_{KA1}^{(1,1)}; \quad (10.32)$$



$$I_{KC}^{(1.1)} = \left( a - \frac{x_{2\Sigma} + a^2 x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right) I_{KA1}^{(1.1)}. \quad (10.33)$$

Ток в земле

$$I_{K3}^{(1.1)} = 3I_{K0}^{(1.1)}. \quad (10.34)$$

Модули выражений в скобках, входящих в (10.32) и (10.33), одинаковы. Они составляют:

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}. \quad (10.35)$$

В зависимости от соотношения между  $x_{2\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$  значение  $m^{(1.1)}$  находится в пределах  $1,5 \leq m^{(1.1)} \leq \sqrt{3}$ . Нижний предел наступает при  $x_{2\Sigma} = x_{0\Sigma}$ , а верхний — при  $\frac{x_{2\Sigma}}{x_{0\Sigma}}$ , равном 0 или  $\infty$ .

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте двухфазного короткого замыкания на землю приведены на рисунке 10.7. Угол  $\theta_I$  между токами поврежденных фаз может изменяться в пределах  $60^\circ < \theta_I \leq 180^\circ$ , стремясь к нижнему пределу при  $x_{0\Sigma} \rightarrow 0$  и к верхнему — при  $x_{0\Sigma} = \infty$ , что соответствует двухфазному короткому замыканию без соединения с землей. Напряжение неповрежденной фазы относительно земли в месте КЗ составляет

$$U_{KA}^{(1.1)} = 3U_{KA1}^{(1.1)}; \quad (10.36)$$

напряжения двух других фаз равны 0.

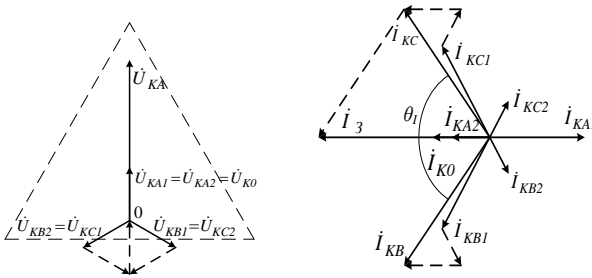


Рис. 10.7. Векторные диаграммы токов и напряжений в точке КЗ при двухфазном коротком замыкании на землю

### 10.5. Правило эквивалентности прямой последовательности

Выражения для токов и напряжений в месте несимметричного короткого замыкания приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1

Токи и напряжения при различных видах КЗ

	$K^{(3)}$	$K^{(2)}$	$K^{(1)}$	$K^{(1.1)}$
$I_{KA1}^{(n)}$	$\frac{E_{\Sigma}}{jx_{1\Sigma}}$	$\frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}$	$\frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}$	$\frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma})}$
$I_{KA2}^{(n)}$	0	$-I_{KA1}^{(2)}$	$I_{KA1}^{(1)}$	$-\frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} I_{KA1}^{(1.1)}$
$I_{K0}^{(n)}$	0	0	$I_{KA1}^{(1)}$	$-\frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} I_{KA1}^{(1.1)}$
$U_{KA1}^{(n)}$	0	$jx_{2\Sigma} I_{KA1}^{(2)}$	$j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) I_{KA1}^{(1)}$	$\frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} I_{KA1}^{(1.1)}$
$U_{KA2}^{(n)}$	0	$U_{KA1}^{(2)}$	$-jx_{2\Sigma} I_{KA1}^{(1)}$	$U_{KA1}^{(1.1)}$
$U_{K0}^{(n)}$	0	—	$-jx_{0\Sigma} I_{KA1}^{(1)}$	$U_{KA1}^{(1.1)}$

Таким образом, обобщая данные таблицы 10.1, можно получить формулы:

$$I_{K1}^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + \Delta x^{(n)})}; \quad (10.37)$$

$$U_{K1}^{(n)} = j\Delta x^{(n)} I_{K1}^{(n)}. \quad (10.38)$$

На основании анализа таблицы 10.1 и выражения 10.37 можно сформулировать *правило эквивалентности прямой последовательности*: Ток прямой последовательности любого несимметричного КЗ может быть определен как ток симметричного трехфазного КЗ, удаленного от точки действительного КЗ на дополнительное сопротивление, не зависящее от параметров схемы замещения прямой последовательности и определяемое результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательности относительно точки КЗ.

При расчетах всех видов несимметричных коротких замыканий, в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности, достаточно определить лишь прямую последовательность тока  $I_{K!}^{(n)}$ . Все остальные расчетные величины выражаются через  $I_{K!}^{(n)}$  и даны в таблице 10.1.

Для определения тока прямой последовательности требуется предварительно найти результирующие реактивности схем обратной и нулевой последовательностей и дополнительные реактивности, зависящие от вида КЗ ( $\Delta x^{(n)}$ ), которые определяются по таблице 10.2.

Модуль полного тока в месте КЗ определяется как

$$I_K^{(n)} = m^{(n)} I_{K!}^{(n)}, \quad (10.39)$$

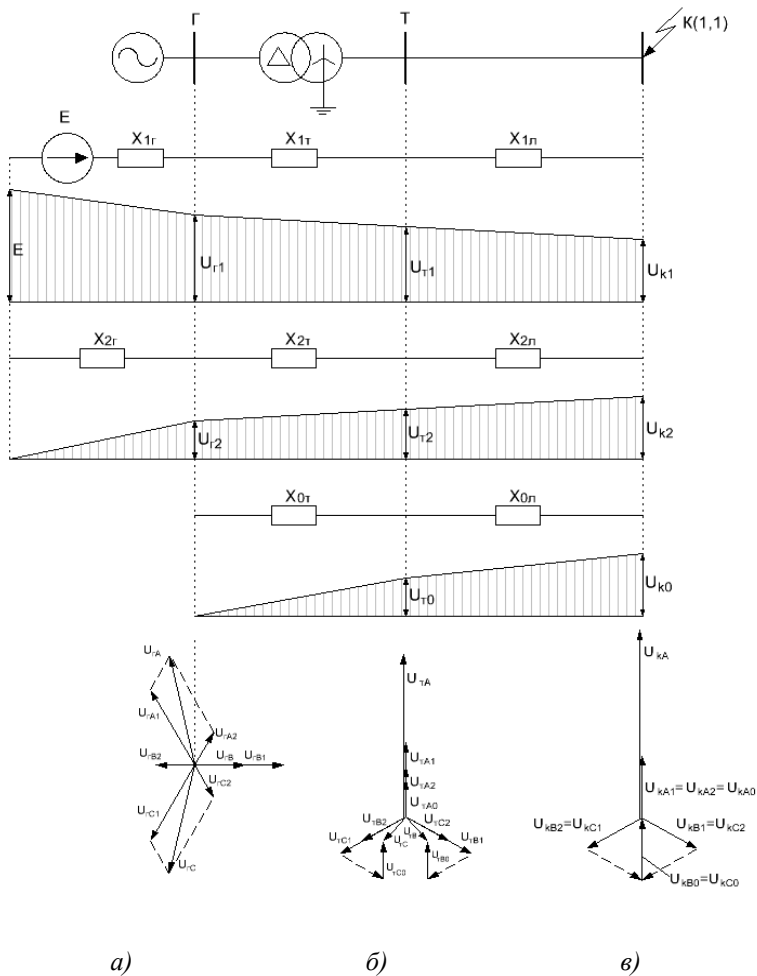
где  $m^{(n)}$  — коэффициент, зависящий от вида КЗ (табл. 10.2).

Таблица 10.2

**Расчетные соотношения дополнительной реактивности  $\Delta x^{(n)}$  и коэффициента  $m^{(n)}$ , зависящих от вида КЗ**

	$\kappa^{(3)}$	$\kappa^{(2)}$	$\kappa^{(1)}$	$\kappa^{(1.1)}$
$x_{\Delta}^{(n)}$	0	$x_{2\Sigma}$	$x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$	$\frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$m^{(n)}$	1	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}$

Полученные соотношения справедливы для точки КЗ. По мере удаления от точки КЗ напряжение прямой последовательности увеличивается, а напряжения обратной и нулевой последовательностей уменьшаются. Это иллюстрируется эпюрами распределения напряжений отдельных последовательностей для простейшей схемы при  $K^{(1.1)}$  (рис. 10.8). Там же даны векторные диаграммы напряжений. Видно, что по мере удаления от точки КЗ симметрия трехфазной системы восстанавливается.

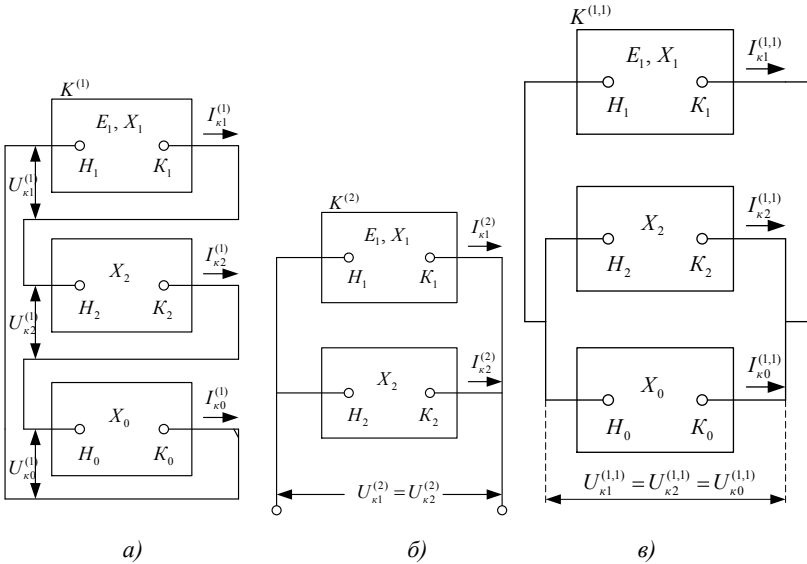


**Рис. 10.8.** Распределение напряжений в сети при  $K^{(1,1)}$  и векторные диаграммы напряжений:  
 а — на шинах генератора; б — на стороне ВН трансформатора;  
 в — в месте КЗ

### 10.6. Комплексные схемы замещения

Установленные в предыдущих параграфах соотношения между симметричными составляющими напряжений в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида несимметричного КЗ соединить схемы отдельных последовательностей и образовать комплексную схему замещения для соответствующего вида КЗ.

Такие схемы приведены на рисунке 10.9



**Рис. 10.9. Комплексные схемы замещения**  
 а — для однофазного КЗ на землю; б — для двухфазного КЗ;  
 в — для двухфазного КЗ на землю

Применение комплексных схем замещения удобно при физическом и математическом моделировании. Они позволяют моделирование КЗ любого вида и в любой точке расчетной схемы. При этом могут быть определены симметричные составляющие токов в любой ветви схемы и симметричные составляющие напряжений в любом узле. По полученным значениям симметричных составляющих могут быть синтезированы полные величины токов и напряжений.

Пример составления комплексной схемы замещения при однофазном КЗ для схемы рисунка 10.10 приведен на рисунке 10.11.

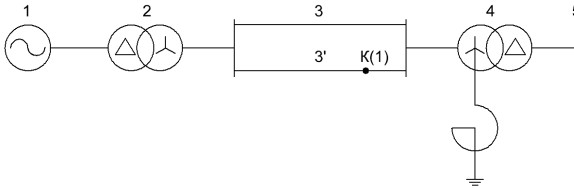


Рис. 10.10. Схема электропередачи

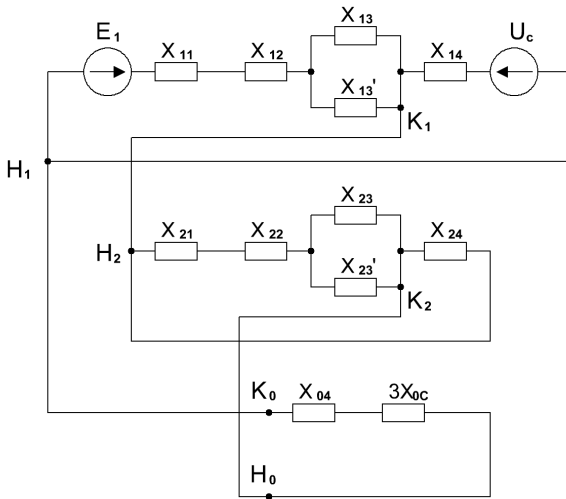


Рис. 10.11. Комплексная схема замещения при  $K^{(1)}$

### 10.7. Соотношения между токами при различных видах КЗ

Правило эквивалентности прямой последовательности позволяют достаточно просто произвести сравнение различных видов КЗ.

Имея ввиду, что короткие замыкания разных видов происходят поочередно в одной и той же точке системы и при одних и тех же

условиях, можно записать соотношения между величинами дополнительных реактивностей  $\Delta x^{(n)}$  при различных видах КЗ:

$$0 = \Delta x^{(3)} < \Delta x^{(1,1)} < \Delta x^{(2)} < \Delta x^{(1)}; \quad (10.40)$$

$$I_{\kappa 1}^{(3)} > I_{\kappa 1}^{(1,1)} > I_{\kappa 1}^{(2)} > I_{\kappa 1}^{(1)}; \quad (10.41)$$

$$U_{\kappa 1}^{(1)} > U_{\kappa 1}^{(2)} > U_{\kappa 1}^{(1,1)} > U_{\kappa 1}^{(3)} = 0. \quad (10.42)$$

Постоянные времени затухания свободной составляющей тока при разных видах КЗ связаны неравенством:

$$T_d^{(1)} > T_d^{(2)} > T_d^{(1,1)} > T_d^{(3)}. \quad (10.43)$$

Представляют интерес пределы, в которых могут находиться величины токов при несимметричных коротких замыканиях по сравнению с величинами токов трехфазного короткого замыкания.

Абсолютную величину отношения тока любого несимметричного КЗ к току трехфазного КЗ можно представить как

$$K_{(n-3)} = \frac{I_k^{(n)}}{I_k^{(3)}} = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \frac{1}{1 + \left( \frac{\Delta x_k^{(n)}}{x_{1\Sigma}^{(3)}} \right)}. \quad (10.44)$$

Это выражение справедливо для произвольного момента времени. Для приближенной оценки пределов изменения  $K_{(n-3)}$  можно пренебречь различием величин ЭДС в начальный момент времени  $x_{1\Sigma} \approx x_{2\Sigma}$ , а при установившемся режиме КЗ  $x_{1\Sigma} \gg x_{2\Sigma}$ .

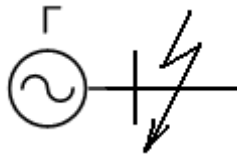


Рис. 10.12. КЗ на шинах генератора

При сравнении *двухфазного и трехфазного* КЗ в начальный момент времени  $K_{(2-3)} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{x_{2\Sigma}}{x_{1\Sigma}}} \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87$ .

В установившемся режиме  $K_{(2-3)} \rightarrow \sqrt{3}$  и такой режим недопустим. Недопустимость установившегося режима обеспечивается резервной защитой генератора. При наличии внешнего сопротивления ( $x_{\text{вн}} > x_d''$ )

$$x_{1\Sigma} = x_d + x_{\text{вн}} \approx x_{2\Sigma} = x_2 + x_{\text{вн}} \text{ и } K_{(2-3)} \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87.$$

Следовательно, соотношение  $K_{(2-3)}$  находится в пределах

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leq K_{(2-3)} < \sqrt{3}. \quad (10.45)$$

Токи КЗ для удаленного короткого замыкания в любой момент времени (для проверки релейной защиты на чувствительность) составляют

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\kappa}^{(3)} = 0,87 I_{\kappa}^{(3)}. \quad (10.46)$$

Для сравнения величин *однофазного и трехфазного* коротких замыканий пользуются соотношением

$$K_{(1-3)} = \frac{3}{1 + \frac{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}{x_{1\Sigma}}}. \quad (10.47)$$

В начальный момент КЗ  $x_{1\Sigma} = x_d''$ ,  $x_{2\Sigma} = x_2 \approx x_d''$ , а  $x_{0\Sigma} = (0,15 \div 0,6) \cdot x_d'' \rightarrow 0$  соотношение  $K_{(1-3)} \rightarrow 1,5$ , что недопустимо, так как начальный момент не подлежит управлению. В установившемся режиме ток однофазного КЗ может в 3 раза превышать ток трехфазного. Вследствие этого нейтрали генераторов не заземляются.



При коротком замыкании на шинах за трансформатором с заземленной нейтралью:

Для  $t = 0$

$$\begin{cases} x_{1\Sigma} = x_d'' + x_T \\ x_{2\Sigma} = x_2 + x_T \end{cases}$$

$$x_{0\Sigma} = x_{0T}$$

$$K_{(1-3)} \approx 1,25$$

Для  $t = \infty$

$$\begin{cases} x_{1\Sigma} = x_d + x_T \\ x_{2\Sigma} = x_2 + x_T \end{cases}$$

$$x_{0\Sigma} = x_{0T}$$

$$K_{(1-3)} \rightarrow 1,5$$

Для понижения  $K_{(1-3)}$  используют РЗН — расщепленное заземление нейтралей, т.е. частичное разземление нейтралей трансформаторов. Это увеличивает сопротивление нулевой последовательности без изменения режима работы нейтрали. При удаленных коротких замыканиях  $K_{(1-3)} \rightarrow 0$ .

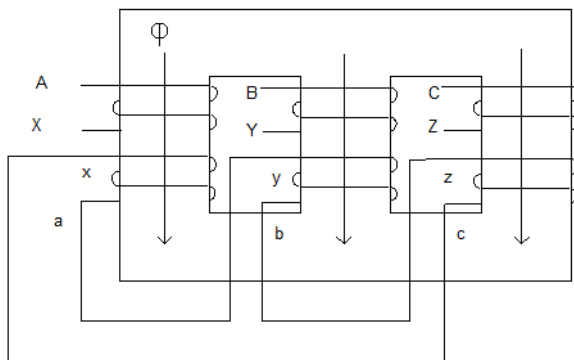
Пределы отношения  $K_{(1,1-3)}$  получаются те же, что и для  $K_{(2-3)}$ . Для удаленных КЗ нужно проверять чувствительность релейной защиты при двухфазном коротком замыкании в сетях высокого напряжения и при однофазном в сетях низкого напряжения.

### ***10.8. Трансформация симметричных составляющих***

При трансформации симметричных составляющих следует учитывать группу соединения трансформатора. Рассмотрим трансформацию симметричных составляющих на примере 0 (12) и 11 групп соединения.

У трансформаторов с четной группой соединения схемы соединения первичной и вторичной обмоток одинаковы —  $Y/Y$  либо  $\Delta/\Delta$ .

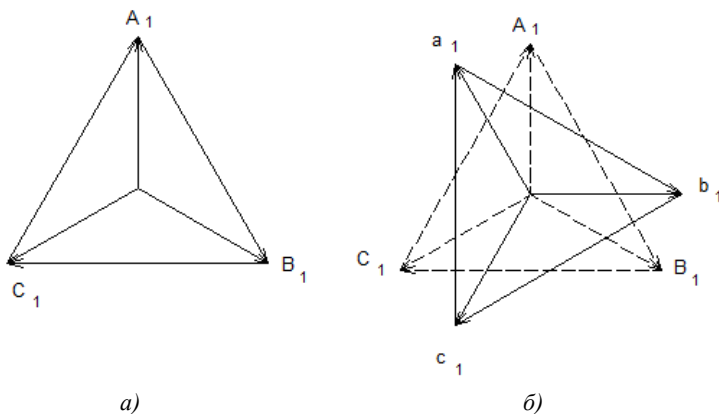
Трансформаторы с одиннадцатой группой соединения (как и все нечетные) отличаются от трансформаторов с четной группой тем, что обмотки соединяются не одинаково ( $Y/\Delta$ ).



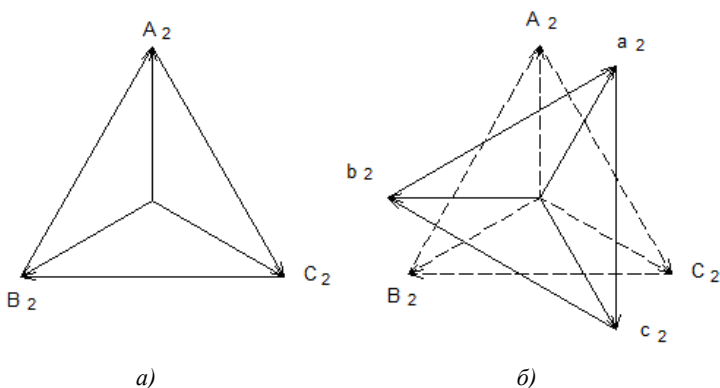
**Рис. 10.13.** Соединение обмоток трансформатора

Нулевая или двенадцатая группа соединения — при преобразовании симметричных составляющих не приводит к повороту векторов отдельных последовательностей (рис. 10.14 а, 10.15 а).

При преобразовании трансформатором с 11-й группой соединения  $Y/\Delta$ -11 векторы составляющих прямой последовательности на векторной диаграмме смещаются на  $30^\circ$  против часовой стрелки (рис. 10.14 б), а векторы составляющих обратной последовательности смещаются на  $30^\circ$  по часовой стрелке (рис. 10.15 б).



**Рис. 10.14.** Симметричные составляющие прямой последовательности



**Рис. 10.15. Симметричные составляющие обратной последовательности**

Для других групп соединения получены формулы, при помощи которых рассчитывают угол, на который сместятся векторы составляющих.

Для прямой последовательности этот угол определяется по формуле:

$$360 + 30 \cdot N \quad (10.48)$$

Для обратной последовательности используется формула с противоположным знаком:

$$360 - 30 \cdot N \quad (10.49)$$

где  $N$  — номер группы соединения трансформатора.

### **10.9. Использование практических методов при расчетах несимметричных КЗ**

Все изложенные ранее практические методы и приемы расчета переходного процесса при трехфазном (симметричном) коротком замыкании согласно правилу эквивалентности прямой последовательности могут быть применены для расчета прямой последовательности переходного процесса при любом несимметричном коротком замыкании так как прямая последовательность симметрична.

Практические методы расчета обычно позволяют с относительно большей точностью оценить величину тока в месте КЗ. Поскольку токи обратной и нулевой последовательности пропорциональны току прямой последовательности в месте несимметричного КЗ, то распределение токов и напряжений обратной и нулевой последовательности также получается с относительно большей точностью, чем прямой последовательности. Это обстоятельство важно для практики так как позволяет принять более простые методы расчета в тех случаях, когда требуется знать токи и напряжения только обратной или нулевой последовательности (например, при определении токов, влияющих на провода связи, токов, необходимых для расчета защитного заземления, при проектировании и настройке устройств РЗА и т.д.).

Использование *метода типовых кривых* для расчета несимметричных КЗ производится по следующему алгоритму:

определяется аналитически начальный ток прямой последовательности отдельного источника  $I_{\kappa li}^{n(n)}$  по формуле  $I_{\kappa li}^{n(n)} = \frac{E_i}{x_{li} + x_{\Delta i}^{(n)}}$ ,

затем определяется удаленность КЗ нахождением расчетного ко-

эффициента  $\alpha_i = \frac{I_{\kappa li}}{I_{ni}}$ . Для полученного значения  $\alpha_i$  по типовым

кривым определяется изменение начального значения тока прямой последовательности генератора и тока КЗ к заданному мо-

менту времени  $\gamma_i = \frac{I_{\kappa lit}^{(n)}}{I_{\kappa li}^{n(n)}}$  и находится необходимая величина пе-

риодической слагающей тока КЗ в момент времени  $t$  источника

$$I_{\kappa lit}^{(n)} = m^{(n)} I_{\kappa li}^{n(n)} \gamma_i.$$

*Метод расчетных кривых* при расчете по общему изменению требует нахождения расчетного сопротивления с учетом удаления точки КЗ на дополнительное сопротивление  $x_{\Delta}^{(n)}$ ,

$$x_{расч} = \frac{(x_{1\Sigma*\sigma} + x_{\Delta}^{(n)}) S_{ном\Sigma}}{S_{\sigma}}; \quad (10.50)$$

где  $x_{\Delta}^{(n)}$  — дополнительное сопротивление при расчете схемы в относительных единицах.

Используя кривые метода отдельно для турбогенератора с АРВ и без АРВ находят значение тока прямой последовательности в относительных единицах  $I_{*nkt1}$  и полный ток несимметричного КЗ, как

$$I_{nkt}^{(n)} = m^{(n)} I_{*nkt1} I_{ном\Sigma} . \quad (10.51)$$

В *методе спрямленных характеристик* составляется расчетная схема замещения для интересующего момента времени, в которую генераторы с АРВ вводятся следующим образом:

- если  $x_{BH}^{(n)} > x_{KPt}$ , то, следовательно  $E_t = U_{ном}$ ,  $x_{\Gamma} = 0$ ;
- если  $x_{BH}^{(n)} < x_{KPt}$ , то  $E_t$  и  $x_t$  находятся по кривым,

где  $x_{BH}^{(n)} = x_{BH} + x_{\Delta}^{(n)}$ ,  $x_{KPt} = x_t \frac{U_{ном}}{E_t - U_{ном}}$ .

Методом эквивалентных преобразований либо другим и известным методом производится расчет схемы и находится ток несимметричного КЗ.

$$I_{kt}^{(n)} = \frac{m^{(n)} E_t}{x_t + x_{BH} + x_{\Delta}^{(n)}} . \quad (10.52)$$

## **11. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### ***11.1. Особенности расчета токов КЗ в сетях напряжением до 1000 В***

В электроустановках напряжением до 1 кВ токи КЗ достигают больших значений (десятки килоампер), поэтому при выборе электрических аппаратов и проводников таких установок их электродинамическая и термическая стойкость часто является определяющим фактором. Весьма актуальной, поэтому стала проблема разработки уточненных методов расчета токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ и создания соответствующих нормативных документов.

В настоящее время существуют 2 методики расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ: метод, разработанный техническим комитетом № 73 «Токи короткого замыкания» Международной электротехнической комиссии (МЭК) и отечественный стандарт ГОСТ Р 28249–93 [5]. Методы МЭК и ГОСТ имеют в основе схожие математические модели и поэтому принципиально идентичны. Для строгих расчетов токов КЗ в сетях до 1 кВ целесообразно рекомендовать использование метода ГОСТ, при приближенных расчетах можно использовать также метод МЭК.

Рассмотрим особенности расчета методом ГОСТа:

1. Электрические установки напряжением до 1 кВ, питаемые от распределительной сети ЭС через понижающие трансформаторы, характеризуются большой электрической удаленностью от источников питания. Это часто позволяет считать, что при КЗ за понижающим трансформатором напряжение в точке сети, где он присоединен, остается практически постоянным и равным своему номинальному значению. Так для типовой схемы с силовым трансформатором ГПП мощностью 25 МВ·А и цеховым трансформатором мощностью 1 МВ·А, сопротивление трансформатора на ГПП приблизительно в 25 раз меньше чем в ЦТ (при одних напряжениях).

При расчете токов КЗ в электроустановках, получающих питание от сети энергосистемы, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление системы. Значение этого сопротивления ( $x_c$ ) в миллиомах, приведенное к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формуле:

$$x_c = \frac{U_{cpHH}^2}{\sqrt{3}I_{BH}'' U_{cpHH}} = \frac{U_{cpHH}^2}{S''_к} 10^3, \quad (11.1)$$

где  $U_{cpHH}$  — среднее номинальное напряжение сети, приведенное к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;

$U_{cpBH}$  — среднее номинальное напряжение сети, приведенное к обмотке высшего напряжения трансформатора, В;

$I_{BH}'' = I_{noBH}$  — действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;

$S''_к$  — условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВ·А.

Величина  $x_c$  в основном лежит в пределе 0,1—1 мОм

Примечание. В случаях, когда понижающий трансформатор подключен к сети энергосистемы через реактор, воздушную или кабельную линию, (длиной более 1 км), необходимо учитывать не только индуктивные, но и активные сопротивления этих элементов.

2. Достоверность расчета токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В зависит главным образом от того, насколько правильно оценены и полно учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи. Необходим учет всех активных и реактивных сопротивлений. Заметное влияние оказывают сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, сборных шин, активных сопротивлений, сопротивления различных контактных соединений — болтовых соединений шин, зажимов и разъемных контактов аппаратов и др., а также контакта непосредственно в месте происшедшего замыкания.

Точная оценка сопротивлений контактных соединений представляет собой очень трудную и в известной мере неопределенную

задачу, так как эти сопротивления зависят от многих факторов (состояния контактных поверхностей, степени затяжки болтов, силы сжатия пружин и проч.). С дугой стороны, отказ от учета этих сопротивлений приводит к излишнему преувеличению токов короткого замыкания и, как следствие, к применению более мощной и дорогостоящей аппаратуры, к неоправданным затратам. Рекомендуется при отсутствии достоверных данных о переходных сопротивлениях учитывать их совокупно (включая контакт в месте замыкания), вводя в короткозамкнутую цепь активное сопротивление, величина которого находится в пределах 15—30 мОм. Нижний предел соответствует короткому замыканию около распределительного щита подстанции, а верхний — при коротком замыкании непосредственно у электроприемников, получающих питание от вторичных распределительных пунктов.

Также необходим учет дуги при учете минимального тока ( $r_{\text{дуги}} \approx 10 \text{ мОм}$ , 1 но необходим расчет), тепловой спад тока вследствие нагрева проводников [14].

Пример величины сопротивлений трансформатора тока и автоматического выключателя:

Таблица 11.1

### Сопротивления элементов

Трансформаторы тока			Автом. выключатели		
$I_n$ , А	$x$ , мОм	$r$ , мОм	$I_n$ , А	$x$ , мОм	$r$ , мОм
20/5	67	42	50	4,5	4,7
100/5	1,7	2,7	100	1,2	2,5
500/5	0,07	0,05	400	0,17	0,65

3. Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах. При составлении эквивалентных схем замещения параметры элементов исходной расчетной схемы следует приводить к ступени напряжения сети, на которой находится точка КЗ, а активные и индуктивные сопротивления всех элементов схемы замещения выражать в миллиомах.

Начальное значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ:



$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{н.В}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}} \text{ мОм} \text{ кА} , \quad (11.2)$$

где  $U_{ср.нн}$  — среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание, В;

$r_{1\Sigma}$ ,  $x_{1\Sigma}$  — соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм.

4. Расчет токов несимметричных КЗ выполняют с использованием метода симметричных составляющих. При этом предварительно необходимо составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В схему замещения прямой последовательности должны быть введены все элементы расчетной схемы, причем при расчете начального значения тока несимметричного КЗ автономные источники, синхронные и асинхронные электродвигатели, а также комплексная нагрузка должны быть введены сверхпереходными ЭДС и сверхпереходными сопротивлениями.

Схема замещения обратной последовательности также должна включать все элементы расчетной схемы. При этом ЭДС обратной последовательности синхронных и асинхронных машин, а также комплексной нагрузки, следует принимать равными нулю. Сопротивление обратной последовательности синхронных машин следует принимать по данным каталога, асинхронных машин — равным сверхпереходному сопротивлению.

Сопротивление обратной последовательности трансформаторов, реакторов, воздушных и кабельных линий следует принимать равным сопротивлению прямой последовательности.

При однофазном КЗ:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{3U_{н.ф.}}{\sqrt{(2r_{1\Sigma} + r_{0\Sigma})^2 + (2x_{1\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}} ; \quad (11.3)$$

$r_{0\Sigma}$  и  $x_{0\Sigma}$  — суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности расчетной схемы относительно точки КЗ, мОм.

При двухфазном КЗ:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}U_{н.ф.}}{2\sqrt{r_{1\Sigma}^2 + x_{1\Sigma}^2}}. \text{ На практике } I_K^{(2)} = 0,87I_K^{(3)}.$$

5. Ударный ток трехфазного КЗ ( $i_{y\delta}$ ) в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле:

$$i_{y\delta} = \sqrt{2}I_K k_{y\delta}, \text{ где } k_{y\delta} = 1 + e^{-t_{y\delta}/T_a} \text{ — ударный коэффициент тока КЗ;}$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_k \Sigma}{r_k \Sigma}; t_{y\delta} = 0,01 \frac{\pi / 2 + \phi_k}{\pi}; T_a = \frac{x_k \Sigma}{\omega r_k \Sigma}.$$

6. Активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающих трансформаторов ( $r_m, x_m$ ) в миллиомах, приведенные к ступени низшего напряжения сети, рассчитывают по формулам:

$$r_T = \frac{P_{к.ном} U_{ННном}^2}{S_{Т.ном}^2} 10^6; x_T = \sqrt{u_k^2 - \left( \frac{100P_{к.ном}}{S_{Т.ном}} \right)^2} \frac{U_{ННном}^2}{S_{Т.ном}} 10^4, \quad (11.4)$$

где  $S_{Т.ном}$  — номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $P_{к.ном}$  — потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;  $U_{ННном}$  — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;  $u_k$  — напряжение короткого замыкания трансформатора — %;

Активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности понижающих трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме  $\Delta/Y_0$ , при расчете КЗ в сети низшего напряжения следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности. При других схемах соединения обмоток трансформаторов активные и индуктивные сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей. Например для трансформатора 1000 кВА  $Y/Y_0$  сопротивления:  $r_1 = 1,79$  мОм,  $x_1 = 8,62$  мОм,  $r_0 = 19,1$  мОм,  $x_0 = 60,6$  мОм.

*Рассмотрим пример расчета по методу ГОСТа:*

Для схемы, приведенной на рисунке 11.2 определить токи при трех-, двух- и однофазном КЗ в точке К1. Для трехфазного КЗ определить максимальные и минимальные значения тока КЗ.

Исходные данные:

Система С  $S_k = 200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{\text{ср.ВН}} = 6,0 \text{ кВ}$ .

Трансформатор Т:  $TС = 1000/6$ ;  $S_{\text{Т.НОМ}} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{\text{ВН}} = 6,3 \text{ кВ}$ ;

$U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ}$ ;  $\Delta P_{\text{к.НОМ}} = 11,2 \text{ кВт}$ ;  $u_k = 5,5\%$ .

Расчетная схема к примеру и ее преобразование:

Автоматический выключатель «Электрон» QF:  $r_{\text{кВ}} = 0,14 \text{ мОм}$ ;  
 $x_{\text{кВ}} = 0,08 \text{ мОм}$ .

Шинопровод ШМА-4-1600Ш:  $r_{\text{Ш}} = 0,030 \text{ мОм/м}$ ;  $x_{\text{Ш}} = 0,014 \text{ мОм/м}$ ;

$r_{\text{НП}} = 0,037 \text{ мОм/м}$ ;

$x_{\text{НП}} = 0,042 \text{ мОм/м}$ ;  $l_{\text{Ш}} = 10 \text{ м}$ .

Болтовые контактные соединения:  $r_k = 0,003 \text{ мОм}$ ;  $n = 4$ .

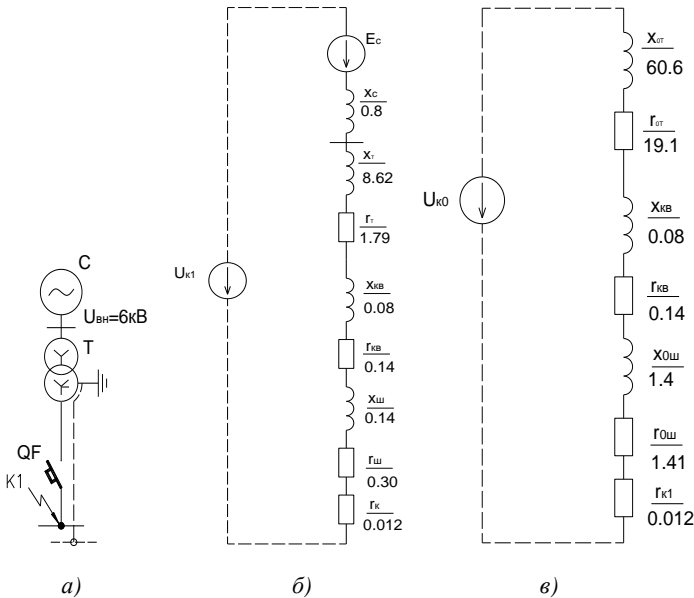


Рис. 11.1: а — расчетная схема, б — схема замещения, в — схема замещения для нулевой последовательности

Расчет параметров схемы замещения.

Параметры схемы замещения прямой последовательности

Сопrotивление системы ( $x_c$ ) составит:  $x_c = \frac{(400)^2}{200} \cdot 10^{-3} = 0,8 \text{ мОм}$ .

Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов ( $r_T$ ) и ( $x_T$ ), составят:

$$r_T = \frac{11,2 \cdot 0,4^2}{(1000)^2} \cdot 10^6 = 1,79 \text{ мОм};$$

$$x_T = \sqrt{5,5^2 - \left(\frac{100 \cdot 11,2}{1000}\right)^2} \cdot \frac{0,4^2}{1000} \cdot 10^4 = 8,62 \text{ мОм}.$$

Активное и индуктивное сопротивления шинпровода:

$$r_{ш} = 0,030410 = 0,30 \text{ мОм}; \quad x_{ш} = 0,014410 = 0,14 \text{ мОм}.$$

Активное сопротивление болтовых контактных соединений:

$$r_k = 0,00374 = 0,012 \text{ мОм}. \quad \text{Активное сопротивление дуги:}$$

$$r_d = 5,6 \text{ мОм}.$$

*Параметры схемы замещения нулевой последовательности.*

$$r_{om} = 19,1 \text{ мОм}; \quad x_{om} = 60,6 \text{ мОм}.$$

$$r_{nn} = 0,037410 = 0,37 \text{ мОм}; \quad x_{nn} = 0,042410 = 0,42 \text{ мОм}.$$

*Расчет токов трехфазного КЗ*

$$x_{1\Sigma} = r_T + r_{ш} + r_{KB} + r_k = 1,79 + 0,30 + 0,14 + 0,013 = 2,24 \text{ мОм};$$

$$r_{1\Sigma} = x_c + x_T + x_{ш} + x_{KB} = 0,80 + 8,62 + 0,14 + 0,08 = 9,64 \text{ мОм};$$

$$r_{i\Sigma} = r_{1\Sigma} + r_d = 2,24 + 5,6 = 7,84 \text{ мОм}.$$

$$I_{II0\max} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{2,24^2 + 9,64^2}} = 23,33 \text{ кА};$$

$$I_{II0\min} = \frac{400}{\sqrt{3} \sqrt{7,84^2 + 9,64^2}} = 18,6 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial.\max} = \sqrt{2} I_{II0\max} K_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 23,33 \cdot 1,45 = 47,84 \text{ кА};$$

$i_{y\partial.\min} = \sqrt{2} I_{II0\min} K_{y\partial} = \sqrt{2} \cdot 18,6 \cdot 1,08 = 28,32 \text{ кА}$ , где  $K_{y\partial}$  определяют по кривой [5];

$$i_{a0\max} = \sqrt{2}I_{\text{по}\max} = 32,9 \text{ кА};$$

$$i_{a0\min} = \sqrt{2}I_{\text{по}\min} = 26,23 \text{ кА}.$$

Расчет токов однофазного КЗ

$$r_{0\Sigma} = r_{0T} + r_{0Ш} + r_{KB} + r_K = 19,1 + 0,3 + 3 \cdot 0,37 + 0,14 + 0,012 = 20,66 \text{ МОм};$$

$$r_{0Ш} = r_{1Ш} + 3r_{\text{шт}};$$

$$x_{0\Sigma} = x_{0T} + x_{0Ш} + x_{KB} = 60,6 + 0,14 + 3 \cdot 0,42 + 0,08 = 62,08 \text{ МОм};$$

$$r_{0\Sigma} = r_{0\Sigma} + r_{0д} = 20,66 + 8,6 = 29,26 \text{ МОм};$$

$$I_{\text{по}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 2,24 + 20,66)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 8,13 \text{ кА}.$$

Ток однофазного КЗ с учетом активного сопротивления дуги

$$I_{\text{по}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 7,84 + 29,26)^2 + (2 \cdot 9,64 + 62,08)^2}} = 7,46 \text{ кА}.$$

Расчет токов двухфазного КЗ

$$I_{\text{по}}^{(2)} = \frac{400}{2\sqrt{2,24^2 + 9,64^2}} = 20,21 \text{ кА}.$$

Ток двухфазного КЗ с учетом активного сопротивления дуги:

$$I_{\text{по}}^{(2)} = \frac{400}{2\sqrt{(2,24 + 2,8)^2 + 9,64^2}} = 18,39 \text{ кА}.$$

Результаты расчета токов КЗ сведены в таблице 11.2.

Таблица 11.2

### Результаты расчета токов КЗ к примеру

Точка КЗ	Вид КЗ	Максимальное значение тока КЗ, кА			Минимальное значение тока КЗ, кА		
		$I_{\text{по}}$	$i_{\text{ао}}$	$i_{\text{вд}}$	$I_{\text{по}}$	$i_{\text{ао}}$	$i_{\text{вд}}$
К1	К <sup>(3)</sup>	23,33	32,9	47,84	18,6	26,23	28,32
К1	К <sup>(1)</sup>	8,13	—	—	7,46	—	—
К1	К <sup>(2)</sup>	20,21	—	—	18,39	—	—

## 11.2. Особенности расчета тока КЗ в цепях постоянного тока

На промышленных предприятиях устройства постоянного тока существуют в виде сетей электроснабжения внутриводского электрического транспорта и сетей электроустановок. Сети городского транспорта — 500 В, сети ж/д транспорта — 3 кВ. Процессы КЗ в сетях постоянного тока различного назначения на промышленных предприятиях принципиально одинаковы. Ограничимся рассмотрением явлений при КЗ и расчета токов КЗ в сетях внутриводского электрического транспорта [20].

Токи КЗ в тяговых устройствах возникают так же, как и в установках переменного тока. Особенностью цепей постоянного тока является то, что ток КЗ, в отличие от цепей переменного тока, плавно возрастает, стремясь к установившемуся значению.

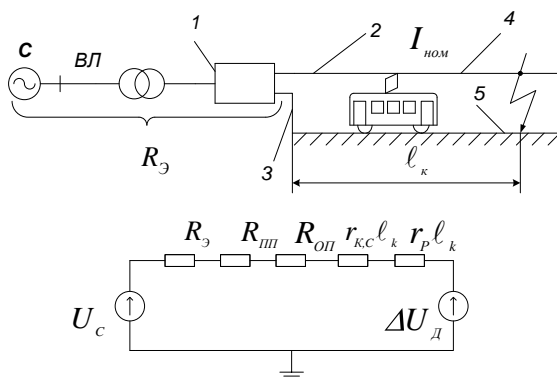


Рис. 11.2. Принципиальная схема питания внутриводского электрического транспорта и схема замещения для расчета тока КЗ:

- 1 — преобразовательная подстанция; 2 — питающий провод;  
3 — отсасывающий провод; 4 — контактный провод; 5 — рельсы

### Определение тока короткого замыкания

Ток КЗ, действующий в цепи между источником тока и местом, где возникло КЗ, по закону Ома:

$$I_K = \frac{U}{R_k}. \quad (11.5)$$

Напряжение на шинах подстанции снижается с увеличением ее нагрузки, что вызывает снижение тока КЗ, для учета этого введем в схему замещения эквивалентное сопротивление  $R_{\Sigma}$ , представляющее собой сумму сопротивлений питающих линий переменного тока  $R_{Л}$  и преобразовательных агрегатов  $R_{П}$  (рис. 1):

$$R_{\Sigma} = R_{Л} + R_{П},$$

где  $R_{П}$  — сопротивление преобразовательных агрегатов,

$R_{Л}$  — сопротивление питающих линий переменного тока

Если считать, что характеристика преобразовательных агрегатов прямолинейна, то:

$$R_{П} = \frac{k_{П} U_{ном}}{I_{ном} N_1},$$

где  $k_{П}$  — отношение потерь напряжения в преобразовательном агрегате при номинальной нагрузке  $I_{ном}$ , к номинальному выпрямленному напряжению  $U_{ном}$ ;

$N_1$  — число находящихся в работе преобразовательных агрегатов.

При повышении нагрузки увеличиваются потери напряжения в линиях переменного тока, вследствие чего снижается напряжение на шинах постоянного тока. Если обозначить через  $k_{Л}$  отношение потерь напряжения в линиях переменного тока при номинальной нагрузке к номинальному напряжению, то потери напряжений в питающей линии, приведенные к выпрямленному напряжению подстанции, будут равны  $k_{Л} U_{ном}$ . Заметим, что обычно  $k_{Л} < k_{н}$ .

При работе подстанции часть питающих линий переменного тока может быть отключена, тогда потери напряжения на стороне выпрямленного тока определяются выражением  $dk_{Л} U_{ном}$ , где  $d$  — отношение сопротивления оставшегося числа линий, к сопротивлению линий, нормально находящихся в работе.

С учетом этого: 
$$R_{Л} = \frac{dk_{Л} U_{ном}}{I_{ном} N_2},$$

где  $N_2$  — число рабочих агрегатов подстанции.

$$\text{Тогда подставив в } R_3, \text{ получим: } R_3 = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \left( \frac{k_{II}}{N_1} + \frac{dk_{II}}{N_2} \right), \quad (11.6)$$

Напряжение XX подстанции:

$$U_K = U_{ном} (1 + k_{II} + k_{II}) (1 - p), \quad (11.7)$$

где  $p$  — коэффициент, учитывающий наибольшее допустимое в нормальных условиях работы снижение напряжения в питающей сети переменного тока относительно номинального. Снижение напряжения не должно превышать 5%.

Из опыта эксплуатации известно, что короткое замыкание в цепях постоянного тока, если оно не подготовлено специально, является дуговым.

Параметры электрической дуги, возникающей при КЗ, зависят от конкретных условий появления и развития дугового КЗ. Характерной особенностью системы постоянного тока электростанций и подстанций является питание их от источников малой мощности, наличие довольно сложной конфигурации кабельных сетей и высокой насыщенности коммутационными и защитными аппаратами. Токи КЗ в этих установках не превышают значений 5—6 кА. [21].

В месте КЗ возникает дуга, сопротивление которой обуславливает потери напряжения  $\Delta U_D$ , тогда напряжение, действующее в цепи КЗ:

$$U_K = U_{ном} (1 + k_{II} + k_{II}) (1 - p) - \Delta U_D - I_T R_3. \quad (11.8)$$

Полное сопротивление цепи КЗ:

$$R_K = R_3 + R_{O,II} + R_{II,II} + (\rho_{K,C} + \rho_P) \ell_k,$$

где  $R_{II,II}$  — сопротивление питающего провода, Ом;

$R_{O,II}$  — сопротивление отсасывающего провода, Ом;

$\rho_{K,C}$  — удельное сопротивление контактной сети, Ом/км;

$\rho_P$  — удельное сопротивление рельсов, Ом/км;

$\ell_k$  — расстояние от подстанции до места КЗ, км;



Ток КЗ определяют по формуле:

$$I_K = \frac{U_{ном}(1 + k_{II} + k_{LI})(1 - p) - \Delta U_D - I_n R_n}{R_{\Sigma} + R_{O,II} + R_{II,II} + (\rho_{K,C} + \rho_P)\ell_k}. \quad (11.9)$$

Примечания:

1. При определении максимального тока КЗ допустимо не учитывать предварительную нагрузку подстанции и падения напряжения в дуге и на вентилях, а также принимать  $(\rho_{K,C} + \rho_P)\ell_k = 0$ .

2. При определении минимального тока КЗ предварительно следует сопротивления токоведущих частей привести к нормированной предельно допустимой температуре продолжительного режима.

При определении минимального значения тока КЗ необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током КЗ. Достоверные экспериментальные данные по эффекту увеличения сопротивления жил кабелей при КЗ показали, что активное сопротивление может увеличиться к моменту отключения КЗ в 2—3 раза в зависимости от условий КЗ [21].

В настоящее время для расчета токов КЗ и выбора аппаратов защиты в системе постоянного тока используется ГОСТ 29176–91 [6].

## **12. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Для ограничения токов КЗ на электростанциях и в сетях энергосистем используются следующие методы:

- 1) метод оптимизации структуры и параметров сети (схемные решения);
- 2) деление сети;
- 3) использование токоограничивающих устройств;
- 4) оптимизация режима заземления нейтралей элементов электрической сети.

Методы и средства ограничения токов КЗ выбираются в зависимости от:

- 1) местных условий;
- 2) требуемой степени ограничения токов при различных видах КЗ;
- 3) технико-экономических показателей.

Рассмотрим каждый метод ограничения токов КЗ более подробно.

### ***12.1. Схемные решения***

Схемные решения принимаются на стадии проектирования схем развития энергосистем, мощных электростанций и схем развития сетей повышенного напряжения. Схемные решения состоят в выборе оптимальных схем выдачи мощности электростанций, структуры и параметров элементов сетей энергосистем.


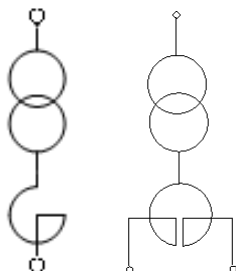
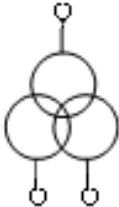
В главе 1 (рис. 1.1) приведены исторические изменения схемы питания для электростанций, связанные с повышением токов КЗ при развитии энергосистем.

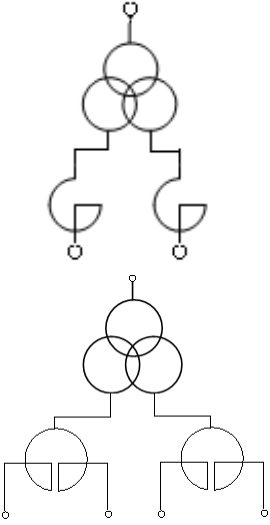
Изменение схемы выдачи мощности электростанций приводит к изменению темпа роста уровней токов КЗ в сетях различного напряжения энергосистем. В сетях более низкого напряжения могут быть образованы регионы со стабильным наибольшим уровнем токов КЗ. При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий выбор схемных решений в основном касается схем главных понизительных подстанций (ГПП).

Возможные технические решения определяются допустимыми токами КЗ. Величина допустимых токов определяется технико-экономическим расчетом. В таблице 12.1 приведены возможные схемы ГПП и максимальное значение периодической составляющей тока КЗ от системы. При допустимом токе 20 кА указаны приемлемые схемные решения.

Таблица 12.1

**Схемы ГПП и максимальное значение периодической составляющей тока КЗ**

Схема	Мощность, МВ·А	Периодическая составляющая тока КЗ, кА	
		При $U = 6\text{кВ}$	При $U = 10\text{кВ}$
	16	14	8,4
	25	21,8	13,1
	25	13,6	10,8
	40	17,8	15,6
	63	21,9	21,4
	80	23,9	24,8
	25	12,2	7,3
	40	19,6	11,7
	63	30,8	18,5
	80	39,1	23,5

	25	10,3	6,5
	40	12,7	9,8
	63	16,7	14,2
	80	18,8	16,9

Примечание: В расчетах приняты следующие величины —  $U_{\kappa} = 10,5\%$ ,  $(x_{mp} = 0,105)$  о.е.,  $k_{расц} = 3,5$   $x_p = 0,1$  Ом. Значения, выделенные заливкой, превышают значение допустимого тока КЗ равного 20 кА. При сопротивлениях реактора превышающих 0,1 Ом схемы с реактором могут использоваться при любых мощностях трансформаторов.

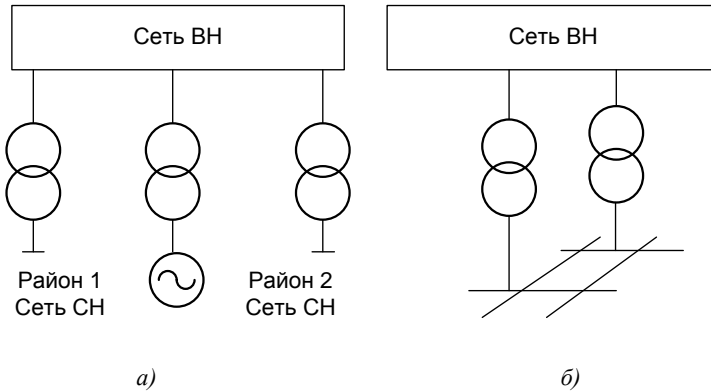
Схемные решения также могут предусматривать:

— выделение части территории (регионов) сетей одного напряжения, связанных между собой только через сеть повышенного напряжения — так называемое *периферийное или продольное разделение сетей* (рис. 12.1 а).

— наложение сетей одного и того же напряжения на площади данного региона со связью этих сетей через сеть повышенного напряжения — так называемое *местное или поперечное разделение сетей* (рис. 12.1 б). Данное схемное решение позволяет при значительном росте нагрузки иметь сети со стабильным наибольшим уровнем токов КЗ. В этих же целях используются двухтрансформаторные подстанции;

— разукрупнение электростанций по мощности;

- разукрупнение узлов сети по генерируемой мощности;
- использование схем удлинненных блоков генератор-трансформатор-линия.

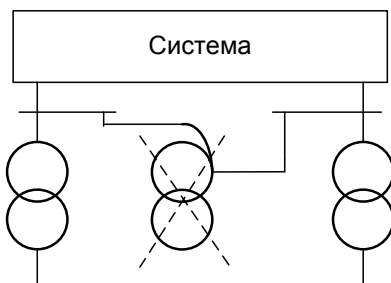


**Рис. 12.1. Разделение сети: а — продольное; б — поперечное**

## 12.2. Деление сети

Деление сети используют в процессе эксплуатации, когда требуется ограничить рост уровней токов КЗ при развитии энергосистем.

*Стационарное деление сети (СДС)* — это деление сети в нормальном режиме, осуществляемое с помощью секционных, шинно-соединительных или линейных выключателей мощных присоединений электроустановок. Стационарное деление производят тогда, когда наибольший уровень тока КЗ в сети или уровень тока КЗ в узле сети превышает допустимый с точки зрения параметров установленного оборудования. СДС оказывает существенное влияние на режимы, устойчивость, надежность работы станции, на потери мощности.



*Рис. 12.2. Стационарное деление сети*

*Автоматическое деление сети (АДС)* — это деление сети в аварийном режиме с целью обеспечения работы коммутационных аппаратов при отключении шин поврежденной цепи. Оно выполняется на секционных или шиносоединительных выключателях, реже — на выключателях мощных присоединений. При АДС отключается значительно меньший ток, чем КЗ в поврежденной цепи.

Недостатки АДС:

- требуется, чтобы выключатели присоединений были способны выдержать полный сквозной ток КЗ;
- в результате деления возможно появление в послеаварийном режиме небаланса мощностей источников и нагрузки в разделившихся частях сети, это влияет на устойчивость и надежность работы энергосистемы;
- время восстановления нормального режима весьма значительно (~5...10 с).

Достоинства АДС: дешевизна, простота, надежность.

### ***12.3. Использование токоограничивающих устройств***

Общие требования:

- ограничивать значение токов КЗ;
- поддерживать на более высоком уровне напряжение в узлах сети;
- уменьшить сброс активной нагрузки с генераторов электростанций;
- не оказывать существенного влияния на нормальный режим работы сети;

- обеспечить в аварийном режиме условия, необходимые для действия релейной защиты сети;
- иметь стабильные характеристики при изменении схемы сети.

Рассмотрим использование реакторов и трансформаторов для ограничения токов КЗ.

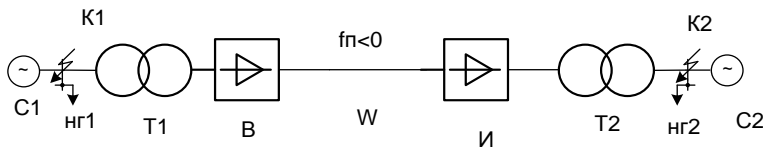
*Токоограничивающие реакторы.*

В настоящее время в энергосистемах для ограничения токов КЗ используются только нерегулируемые реакторы с линейной характеристикой. В сетях 6(10) кВ применяют одинарные и двойные бетонные реакторы, а в сетях 35—220 кВ — масляные реакторы.

*Трансформаторы и автотрансформаторы с расщепленной обмоткой.*

Для ограничения токов КЗ используются трансформаторы с расщепленной обмоткой НН, это позволяет снизить ток КЗ в сети низшего напряжения, автотрансформаторы.

*Вставка постоянного тока* содержит выпрямитель В, инвертор И, линию постоянного тока W, трансформаторы Т1 и Т2 соответственно выпрямителя и инвертора (рис. 12.3). Эти вставки выполняют функцию транспортных линий электрической передачи, развязывая в то же время объединенные подсистемы при возникновении в них переходных процессов. Ток КЗ в точке К1 определяется параметрами С1. Подпитка со стороны вставки отсутствует. При КЗ в точке К2 ток КЗ определяется параметрами С2. Подпитка со стороны вставки не превышает ее нагрузочного тока.



**Рис. 12.3. Вставка постоянного тока**

*Вставки переменного тока промышленной частоты* предназначены для связи узлов сетей промышленной частоты (рис. 12.4). Эти вставки содержат ферромагнитный преобразователь

(делитель) частоты П1, ЛЭП W, ферромагнитный преобразователь (умножитель) частоты П2. Частота передачи  $f_n = 25$  Гц.

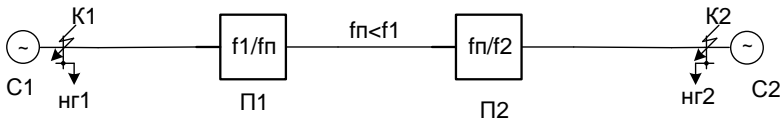


Рис. 12.4. Вставка переменного тока не промышленной частоты

Предложены и иные способы ограничения токов КЗ [22].

### 12.4. Оптимизация режима работы нейтрали

Изменение режима заземления нейтралей возможно при выполнении ряда условий:

1. Силовые трансформаторы 330 кВ и выше не могут работать с разземленной нейтралью.

2. Сети 110 кВ и выше должны быть эффективно заземлены, т.е. таким образом, чтобы напряжение на поврежденных фазах при КЗ на землю в любой точке не превышало 80% линейного напряжения сети ( $1,4 U_{ф.ном}$ ).

3. По условиям работы выключателей желательно, чтобы токи однофазного и двухфазного КЗ на землю в любой точке сети не превышали тока трехфазного КЗ в этой же точке. Следовательно, при выборе режима заземления сетей 110 кВ и выше, определяемого режимом заземления нейтралей трансформаторов, необходимо выполнить условия:

$$- I_k^{(1)} / I_k^{(3)} \leq 1, I_k^{(1.1)} / I_k^{(3)} \leq 1;$$

$$- K_з = U_{ф.з} / U_{ном} \leq 0,8, \text{ где } K_з \text{ — коэффициент замыкания сети.}$$

-  $U_n < U_{доп}$ , где  $U_{доп}$  — допустимое напряжение на нейтрали трансформатора.

-  $U_{имп} < U_{и,д}$ , где  $U_{и,д}$  — импульсное допустимое напряжение на нейтрали трансформатора при КЗ в сети.

При выполнении перечисленных условий ограничить токи КЗ на землю можно следующими способами:



— для ограничения токов КЗ в сетях напряжением 110—750 кВ можно увеличивать сопротивление нейтрали. В нейтраль включают активное, реактивное, полное сопротивление.

— использование расщепленного заземления нейтралей трансформаторов (РНЗ) (частичное).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. СПб., 2001.
2. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н.Неклепаева. М., 2001.
3. ГОСТ 26522-85. Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения. М., 1985.
4. ГОСТ 27514-87. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М., 1988.
5. ГОСТ Р 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. М., 1994.
6. ГОСТ 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. М., 1992.
7. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. М., 1993.
8. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М.Сирота, С.М.Кисленко, А.М.Михайлов. Киев, 1985.
9. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электрических и энергетических вузов и факультетов / С.А.Ульянов. М., 1970.
10. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. пособие / Ю.А.Куликов. Новосибирск; М., 2003.
11. Справочник по проектированию электроснабжения промышленных предприятий / Под ред. Ю.Г.Барыбина [и др.]. М., 1990.
12. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей: Учеб. пособие для студентов вузов / В.М.Блок [и др.]; Под ред. В.М.Блок. М., 1981.
13. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. / К.С.Демирчян [и др.]. 4-е изд. СПб., 2004. Т. 1.
14. Жуков В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ / В.В.Жуков. М., 2004.

15. Винославский В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения / В.Н.Винославский [и др.]. Киев, 1989.
16. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий / А.М.Авербух. Л., 1979.
17. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110—750 кВ. М., 1979.
18. Моделирование электромагнитных переходных процессов на ЭВМ: Метод. указания / Сост.: М.В.Шкаруба, А.Д.Эрнст. Омск, 2006.
19. Эрнст А.Д. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах: Учеб. пособие / А.Д.Эрнст. Омск, 2009.
20. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А.Федоров, В.В.Каменева. М., 1984.
21. Жуков В.В. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока / В.В.Жуков. М., 2005.
22. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: Учеб. пособие / И.П.Крючков [и др.]; Под ред. И.П.Крючкова и В.А.Старшинова. М., 2005.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>6</b>
1.1. Предмет изучения. Основные понятия. Возникновение и развитие проблем переходных процессов.....	6
1.2. Действие токов КЗ и последствия коротких замыканий .....	8
1.3. Задачи расчета электромагнитных переходных процессов.....	10
1.4. Координация и оптимизация токов короткого замыкания .....	12
<b>2. Режимы работы нейтрали электрических сетей .....</b>	<b>14</b>
2.1. Причины возникновения переходных процессов .....	15
2.2. Виды КЗ в системах электроснабжения.....	16
2.3. Трехфазные сети с изолированной нейтралью.....	18
2.3.1. Простое замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью .....	18
2.3.2. Достоинства и недостатки сетей с изолированной нейтралью .....	21
2.4. Трехфазные сети с компенсацией емкостного тока. Достоинства и недостатки.....	22
2.5. Трехфазные сети с заземленной нейтралью. Достоинства и недостатки.....	25
2.6. Требования к защите от поражения электрическим током в электрических сетях .....	26
<b>3. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....</b>	<b>29</b>
3.1. Переходный процесс в простейших трехфазных цепях.....	29
3.2. Определение ударного тока КЗ.....	33
3.3. Приближенное исследование переходных процессов.....	36
3.4. Эквивалентная постоянная времени.....	37

3.5. Действующие значения величин и их составляющих при переходном процессе.....	38
3.6. Переходный процесс при включении трансформатора на холостом ходу.....	44
<b>4. РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ.....</b>	<b>48</b>
4.1. Принципы составления схем замещения .....	48
4.2. Методы преобразования схем замещения .....	50
4.3. Система относительных единиц при расчетах КЗ .....	55
4.4. Определение сопротивления элементов электрических систем и их схемы замещения .....	59
<b>5. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ .....</b>	<b>69</b>
5.1. Основные характеристики и параметры .....	69
5.2. Учет нагрузки в установившемся режиме короткого замыкания .....	73
5.3. Расчет установившегося режима КЗ при отсутствии и наличии АРВ .....	74
<b>6. НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВНЕЗАПНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА.....</b>	<b>78</b>
6.1. Баланс магнитных потоков. Переходные параметры синхронной машины.....	78
6.2. Сверхпереходные параметры синхронной машины .....	82
6.3. Учет подпитки синхронных и асинхронных двигателей при расчете токов КЗ.....	84
<b>7. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ .....</b>	<b>88</b>
7.1. Учет системы при расчете токов короткого замыкания....	88
7.2. Метод расчетных кривых. Основные допущения и последовательность расчета.....	90
7.3. Метод спрямленных характеристик. Основные допущения и последовательность расчета .....	96
7.4. Метод типовых кривых. Основные допущения и последовательность расчета.....	103
7.5. Уточнение расчетов практическими методами. Нахождение коэффициентов распределения.....	106

<b>8. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....</b>	<b>111</b>
8.1. Постановка задачи и проблемы решения.....	111
8.2. Индуктивности обмоток синхронной машины .....	113
8.3. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных .....	115
8.4. Вывод уравнений Парка–Горева .....	118
8.5. Уравнения Парка–Горева в системе относительных единиц .....	120
8.6. Уравнения Парка–Горева в операторной форме.....	121
8.7. Переходный процесс при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение.....	122
8.8. Внезапное КЗ синхронной машины без демпферных обмоток .....	124
<b>9. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ .....</b>	<b>127</b>
9.1. Применимость метода симметричных составляющих в расчетах несимметричных КЗ.....	127
9.2. Параметры элементов для прямой и обратной последовательностей .....	132
9.3. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов и автотрансформаторов .....	135
9.4. Сопротивления нулевой последовательности воздушных и кабельных линий.....	142
9.5. Схемы замещения отдельных последовательностей .....	149
<b>10. ОДНОКРАТНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ ....</b>	<b>154</b>
10.1. Общие положения .....	154
10.2. Двухфазное КЗ. Определение токов и напряжений.....	155
10.3. Однофазное КЗ. Определение токов и напряжений .....	157
10.4. Двухфазное КЗ на землю. Определение токов и напряжений .....	159
10.5. Правило эквивалентности прямой последовательности.....	162
10.6. Комплексные схемы замещения .....	165
10.7. Соотношения между токами при различных видах КЗ .....	166

10.8. Трансформация симметричных составляющих .....	169
10.9. Использование практических методов при расчетах несимметричных КЗ .....	171
<b>11. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....</b>	<b>174</b>
11.1. Особенности расчета токов КЗ в сетях напряжением до 1000 В .....	174
11.2. Особенности расчета тока КЗ в цепях постоянного тока .....	182
<b>12. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....</b>	<b>186</b>
12.1. Схемные решения.....	186
12.2. Деление сети.....	189
12.3. Использование токоограничивающих устройств.....	190
12.4. Оптимизация режима работы нейтрали.....	192
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>194</b>

---

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 28.12.2012  
Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов  
Гарнитура Times. Усл. печ. листов 12,5  
Тираж 300 экз. Заказ 1388

*Отпечатано в Издательстве  
Нижевартковского государственного гуманитарного университета  
628615, Тюменская область, г.Нижевартовск, ул.Дзержинского, 11  
Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru*