



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы в
электроэнергетике»

Учебно-методическое пособие по дисциплине

Переходные электромагнитные процессы в энергетических системах

Авторы
Цыгулев Н.И.,
Шелест В.А.

Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для подготовки бакалавров всех форм обучения по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и по профилям «Электроэнергетические системы и сети», «Автоматизированные распределительные электрические сети».

Авторы

д.т.н., профессор кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»
Цыгулев Н.И.

к.т.н., доцент, кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике»
Шелест В.А.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ	7
1.1. Система относительных единиц.....	7
1.2. Математические модели элементов энергосистем.....	8
1.3. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в именованных единицах.....	15
1.3.1 Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации.....	16
1.3.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации.....	16
1.4. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в относительных единицах.....	17
1.4.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации.....	17
1.4.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации...Пример 1.1,.....	18
1.5. Мощность короткого замыкания.....	31
Контрольные вопросы к главе 1.....	31
Задача 1.1.....	32
2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ (ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ).....	34
2.1. Метод симметричных составляющих.....	34
2.1.1 Основные понятия метода симметричных составляющих.....	34
2.1.2 Схемы замещения отдельных последовательностей.....	35
2.2. Сопротивления машин и аппаратов токам обратной и нулевой последовательностей.....	36
2.3. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последовательности ...Пример 2.1	39
2.4. Определение токов при несимметричных коротких замыканиях.....	42
2.4.1 Двухфазное короткое замыкание.....	42
2.4.2 Однофазное короткое замыкание.....	44
2.4.3 Двухфазное короткое замыкание на землю.....	45
2.4.4 Правило эквивалентности прямой последовательности. Пример 2.2	47
2.4.5. Учет активных сопротивлений в месте КЗ.....	52
2.5. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.....	53
2.6. Сравнение токов при различных видах короткого замыкания	55
2.7. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземленной нейтралью	56
Контрольные вопросы к главе 2.....	58
Задача 2.1.....	58
3. ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ.....	60

3.1. Однократная продольная несимметрия	60
3.2. Разрыв в одной фазе.....	61
3.3. Разрыв в двух фазах.....Пример 3.1	62
Контрольные вопросы к главе 3.....	64
4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС.....	65
4.1. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи.....	65
4.2. Ударный ток короткого замыкания.....	66
4.3. Действующее значение тока короткого замыканияПример 4.1	68
Контрольные вопросы к главе 4.....	78
Задача 4.1.....	78
5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ	79
5.1. Уравнения синхронной машины в фазных координатах.....	79
5.2. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных синхронной машины.....	81
5.3. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины.....	82
5.4. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины.....	83
5.4.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток при отключенном регуляторе возбуждения.....	83
5.4.2. Влияние демпферных обмоток на ток короткого замыкания.....	84
5.4.3. Учет и влияние автоматического регулятора возбуждения.....	85
5.4.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых.....Пример 5.1	86
5.5. Переходные процессы в электрических двигателях.....	97
Задача 5.1.....	97
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	98
П1. Справочные данные по синхронным генераторам.....	98
П2. Краткие сведения о трансформаторах с расщепленными обмотками.....	99
П3. Справочные данные по силовым трансформаторам.....	100
П4. Пропускная способность одной цепи ЛЭП и предельное расстояние передачи.....	102
П5. Индуктивные сопротивления воздушных линий с алюминиевыми и сталеалюминиевыми проводами.....	102
П6. Характеристики алюминиевых и сталеалюминиевых проводов.....	103
П7. Активные и индуктивные сопротивления трехжильных кабелей.....	103
П8. Краткие сведения о сдвоенных реакторах.....	104
П9. Справочные данные по реакторам.....	106
П10. Справочные данные по синхронным двигателям серий СД и СДН.....	106
П11. Преобразование двух параллельно включенных ветвей.....	107
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	108

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Переходные электромагнитные процессы в энергосистемах» предназначена для развития у студентов навыков самостоятельного расчета длительных нормальных и кратковременных аварийных режимов в электрических системах. Наиболее важным является определение критических параметров, необходимых для проектирования электрических станций, подстанций и сетей.

В настоящее время электрические станции и потребители электрической энергии объединены в энергосистемы. Повреждения в энергосистемах приводят к разрушению основного оборудования, к перерыву электроснабжения потребителей и т.п. Наиболее тяжелыми повреждениями являются короткие замыкания (КЗ). КЗ - непредусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами или в сетях с заземленной нейтралью, в том числе, между фазой и землей.

Переход электрической системы из одного режима в другой сопровождается переходным процессом. Переходный процесс можно для упрощения анализа рассматривать состоящим из ряда отдельных процессов, каждый из которых отражает изменение определенной группы параметров режима. Рассматривать эти изменения необходимо одновременно во времени и пространстве, в инженерных задачах обычно учитываются только наиболее существенные в данной конкретной задаче факторы. Исходя из этого, переходный процесс в электрической системе по частоте колебаний и времени протекания его можно условно разделить на три составляющих: волновой, электромагнитный и электромеханический.

Волновые переходные процессы связаны с появлением внутренних (коммутационных) и грозowych перенапряжений. Система при этом характеризуется элементами с распределенными параметрами. Диапазон частот 50 Гц – 10 кГц, время протекания процесса до 1 мс. Возможен электрический пробой изоляции.

За волновым следует электромагнитный переходный процесс, который обусловлен наличием запасенной энергии магнитного поля в индуктивностях элементов. Диапазон частот 50 – 600 Гц, время протекания процесса несколько периодов промышленной частоты. Роторы генераторов не успевают изменить свои скорости и относительные положения. Выключатели под действием релейной защиты осуществляют отключение поврежденных элементов. Возможные последствия аварии - механическое и термическое разрушения оборудования.

Затем начинается электромеханический переходный процесс. Он характеризуется тем, что на электромагнитный процесс накладывается механический, возникающий вследствие изменения скоростей вращения роторов генераторов, их относительных положений. Диапазон частот 1- 50 Гц, длительность десятки периодов. Наиболее опасные последствия: нарушение устойчивости и синхронной работы генераторов.

Виды КЗ зависят от уровня напряжения электрической сети:

- в сетях с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110-1150 кВ) и четырех проводных сетях (0,4 кВ) могут быть трехфазные КЗ ($K^{(3)}$), двухфазные ($K^{(2)}$), однофазные ($K^{(1)}$) и двухфазные на землю ($K^{(1,1)}$);
- в сетях с изолированной нейтралью (напряжением 3-35 кВ) такие же виды замыканий за исключением замыканий на землю.

Несимметричные КЗ представляют собой поперечный несимметричный режим.

В сетях с изолированной нейтралью замыкание на землю называется простым замыканием.

Основные причины возникновения КЗ:

- неправильное проектирование, монтаж и эксплуатация электроустановок,
- механические повреждения и перекрытие токоведущих частей,
- удары молнии.

Последствия КЗ:

- нарушение параллельной работы энергосистем,
- динамическое и термическое разрушение оборудования,
- снижение уровня напряжения у потребителей.

В месте КЗ, как правило, возникает электрическая дуга. Однако расчеты производятся для наиболее тяжелого случая без учета переходного сопротивления в месте повреждения, так называемого металлического КЗ.

Назначение расчетов токов короткого замыкания (ТКЗ):

- выбор наиболее рациональных схем электрических соединений,
- выбор оборудования устойчивого к ТКЗ,
- выбор уставок срабатывания устройств релейной защиты,
- проектирование защитных заземлений.

Требования к погрешности расчетов ТКЗ определяются целью расчетов. Так, расчеты ТКЗ для целей релейной защиты должны выполняться с меньшей погрешностью по сравнению с расчетами для выбора электрических аппаратов.

Основная цель курса – овладение инженерными методами расчета токов КЗ и электромагнитных переходных процессов в электрических системах, которые подробно изложены в работах С. А. Ульянова [1, 2] и А.Д. Дроздова [3,4].

Для решения задач можно применить компьютерную программу MathCad [5]. Это позволит получить навыки применения этой программы, которые будут полезны при решении различных задач в процессе дальнейшего обучения и на производстве. В учебном пособии примеры выполнены для программы MathCad.

Полезной будет литература по теоретической части курса [6,7,8] и по справочной информации [9,10].

1. СИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ

1.1. Система относительных единиц

Все физические величины выражаются в именованных единицах. Однако представление их в относительных (безразмерных) единицах позволяет упростить теоретические выкладки и практические расчеты, поэтому в дальнейшем наряду с именованными единицами будем использовать также относительные. Система относительных единиц используется и в курсе электрических машин, поэтому в данном разделе напомним только ее основные положения и покажем возможности применения для магнитно связанных цепей.

Под относительным значением некоторой величины понимают ее отношение к другой одноименной физической величине, выбранной за единицу измерения, например, базисную величину (базу). Таким образом, относительные единицы получают с помощью выражения:

$$\text{относительная величина}_* = \frac{\text{фактическая физическая величина}}{(\text{базисная величина}) \text{ база}}$$

и отмечают звездочкой «*».

В качестве базисных единиц или базы в расчетах принимают базисные мощность (S_6), напряжения (U_{6i}), токи (I_{6i}) и сопротивление (Z_6) и др. Базисные величины обозначают нижним индексом "6". В этом случае относительные единицы называют относительными базисными, например, ЭДС E_{*6} , ток I_{*6} и т.п. Таким образом, относительные базисные величины определяются следующими выражениями:

$$Z_{*6} = \frac{Z}{Z_6}, \quad E_{*6} = \frac{E}{E_6}, \quad X_{*6} = \frac{X}{X_6}, \quad I_{*6} = \frac{I}{I_6}, \quad S_{*6} = \frac{S}{S_6} \text{ и т.п.}$$

Из этих выражений можно получить, что численно равны: относительные фазные и линейные величины; мощность одной фазы и мощность трех фаз; ток возбуждения, поток и ЭДС генератора.

Базисные мощность и напряжение принимаются независимыми, через которые можно выразить базисные сопротивление и ток. Из уравнения мощности для трехфазной цепи

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}, \quad (1.1)$$

а на основании закона Ома для трехфазной цепи

$$Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3}I_6} = \frac{U_6^2}{S_6}. \quad (1.2)$$

Поскольку выбор базисных условий произволен, то одна и та же физическая величина может иметь разные численные значения при выражении ее в относительных единицах. Обычно относительные сопротивления элементов энергосистем (генераторов, трансформаторов, реакторов, двигателей) задаются в относительных единицах при номинальных параметрах: S_H и U_H (номинальные величины обозначают индексом "H"). При этом относительные номинальные величины записываются в виде

$$Z_{*H} = \frac{Z}{Z_H}, \quad E_{*H} = \frac{E}{E_H}, \quad X_{*H} = \frac{X}{X_H}, \quad I_{*H} = \frac{I}{I_H}, \quad S_{*H} = \frac{S}{S_H}.$$

Номинальные ток I_H и сопротивление Z_H можно найти с помощью выражений, аналогичных (1.1) и (1.2)

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_H}, \quad (1.3)$$

$$Z_H = \frac{U_H^2}{S_H}. \quad (1.4)$$

Установим связь между именованными и относительными единицами. По определению относительной базисной величины

$$Z_{*б} = \frac{Z}{Z_б}.$$

Подставив в последнее выражение формулу (1.2), получим

$$Z_{*б} = Z \frac{S_б}{U_б^2} \quad (1.5)$$

С помощью выражения (1.5) осуществляют перевод именованных единиц в относительные базисные.

Аналогично для относительных номинальных единиц с учетом (1.4), получим

$$Z_{*н} = Z \frac{S_н}{U_н^2}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) наиболее часто используется для вычисления сопротивлений в именованных единицах, при известных относительных номинальных, в следующем виде

$$Z = Z_{*н} \frac{U_н^2}{S_н}. \quad (1.7)$$

Подставив в (1.5) значение Z из выражения (1.7), получим выражение, которое устанавливает связь между относительными номинальными и относительными базисными единицами

$$Z_{*б} = Z_{*н} \frac{S_б}{S_н} \left(\frac{U_н}{U_б} \right)^2. \quad (1.8)$$

Выражение (1.8) используется для перевода относительных номинальных единиц в относительные базисные.

Для ограничения ТКЗ в энергосистемах используются токоограничивающие реакторы, представляющие линейные индуктивности. Для таких реакторов задаются номинальные ток и напряжение (а не мощность). Учитывая, что $S = \sqrt{3} UI$ выражения (1.6) и (1.8) преобразуются соответственно

$$Z = Z_{*н} \frac{U_н}{\sqrt{3} I_н} \quad (1.9)$$

и

$$Z_{*б} = Z_{*н} \frac{I_б}{I_н} \frac{U_н}{U_б}. \quad (1.10)$$

Относительные величины выражают также в процентах, например, сопротивление $Z_{\%} = 100 \cdot Z_{*}$

1.2. Математические модели элементов энергосистем

Математической моделью любого технического объекта является система уравнений, описывающая процессы в нем, или (для электроэнергетического объекта) - электрическая схема замещения. Математическая модель электрической сети, представляет собой совокупность математических моделей отдельных элементов, соединенных в определенной последовательности.

Универсальных математических моделей не существует. Математическая модель зависит от назначения расчетов. В модели выделяют те свойства объекта, которые доминируют в рассматриваемом процессе и пренебрегают свойствами, мало влияющими на результаты расчетов. В этом разделе рассматриваются математические модели элементов системы, используемые для расчета токов КЗ.

При построении моделей вводится ряд допущений, основными из которых являются: линейность параметров элементов, что позволяет широко использовать удобные линейные преобразования, и пренебрежение активным сопротивлением элементов (активное сопротивление всех элементов энергосистем значительно меньше индуктивного сопротивления на промышленной частоте, и, кроме того, между индуктивным и активным сопротивлениями угол 90° в треугольнике сопротивлений,

поэтому, как правило, если это специально не оговаривается, то активным сопротивлением элементов энергосистем пренебрегают), вследствие чего значение тока КЗ получают несколько завышенным, т.е. с запасом.

Синхронный генератор. Условное изображение трехфазного синхронного генератора и схема замещения его представлены на рис.1.1.

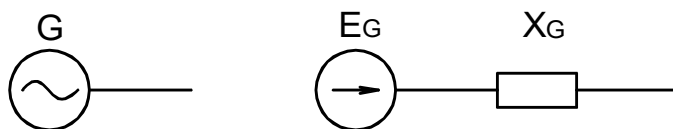


Рис. 1.1. Условное изображение и схема замещения синхронного генератора

В течение переходного режима ЭДС генератора и его внутреннее сопротивление изменяются.

В начальный момент времени генератор характеризуется сверхпереходными: ЭДС по поперечной оси сопротивления E''_q и сопротивлением по продольной оси x''_d . Термин "сверхпереходный" означает, что учтены все свободные токи статора и ротора (в обмотке возбуждения (ОВ) и демпферной обмотке (ДО)), и обозначается верхним индексом - два штриха " (рис.1.2). Напомним, что переходный процесс имеет место либо после затухания свободных токов в ДО, либо при отсутствии ДО в гидрогенераторе; в турбогенераторе роль ДО играет массивный ротор.

В справочной литературе для расчетов токов КЗ в сверхпереходном режиме для генераторов задаются: активная мощность P_H (иногда полная S_H), номинальное напряжение на выводах генератора U_H , сверхпереходные относительные номинальные ЭДС E''_q и сопротивление x''_d , коэффициент мощности $\cos\varphi_H$.

Типовые турбогенераторы, выпускаемые в нашей стране, имеют следующие номинальные мощности (P_H):

2,5; 4,0; 6,0; 12, 32, 50, 63, 100, 160, 200, 300, 500, 800, 1000, 1200 МВт;

и номинальные напряжения (линейные):

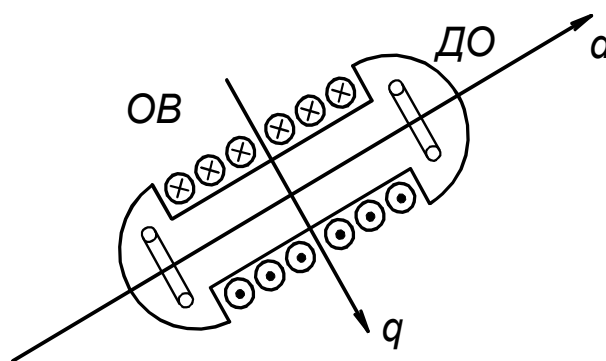


Рис.1.2. Ротор синхронного генератора с демпферными обмотками

3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24 кВ.

В результате модернизации в некоторых генераторах мощность увеличена по сравнению с выше приведенной.

При отсутствии в справочной литературе ЭДС генератора в сверхпереходном (переходном) режиме ее можно определить из предшествующего режима работы. ЭДС превышает напряжение на зажимах генератора на величину падения напряжения на

его внутреннем сопротивлении. В частности, относительная номинальная ЭДС для расчета сверхпереходного тока (I''_k) может быть определена из выражения

$$E''_{G*H} = \sqrt{(U_{*H} \cos \varphi_H)^2 + (U_{*H} \sin \varphi_H + I_{*H} x''_d)^2}, \quad (1.11)$$

где U_{*H} , I_{*H} - относительные номинальные напряжение на выводах и ток генератора в режиме, предшествующем КЗ. ЭДС генератора в именованных единицах

$$E''_{GH} = E''_{G*H} U_H \quad (1.12)$$

(иногда для упрощения записи штрихи у сверхпереходной ЭДС опускают).

Относительное номинальное сопротивление при расчете сверхпереходного тока представляет собой сверхпереходное сопротивление по продольной оси x''_d и для генераторов лежит в диапазоне 0,11-0,25. Коэффициент мощности составляет 0,8-0,9. С увеличением номинальной мощности генераторов U_H , x''_d и $\cos \varphi_H$ увеличиваются. Параметры синхронных генераторов приведены в приложении 1.

Силовой трансформатор. Условное изображение двухобмоточного трансформатора и его схема замещения приведены на рис.1.3. При вычислении токов КЗ намагничивающими токами трансформаторов (автотрансформаторов) пренебрегают. При расчете токов при трехфазных КЗ и в симметричных режимах соединение обмоток трансформаторов допускается не указывать.

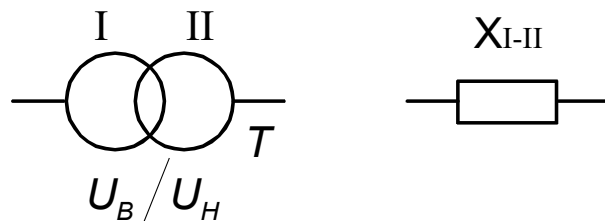


Рис.1.3. Условное изображение и схема замещения двухобмоточного трансформатора

В справочной литературе для двухобмоточных трансформаторов задаются: полная мощность S_H , напряжения обмоток высокого (U_B) и низкого (U_H) напряжений (или первичной (U_I) и вторичной (U_{II}) обмоток, напряжение короткого замыкания в процентах $U_{k\%}$, или относительных единицах $U_{k*H} = U_{k\%}/100\%$.

Напряжение короткого замыкания трансформатора определяется из опыта КЗ при пониженном напряжении и номинальном токе. Оно связано с относительным номинальным сопротивлением трансформатора (T) выражением:

$$U_{k*H} = \frac{U_k}{U_H} = \frac{\sqrt{3} I_H Z_T}{U_H} = \frac{Z_T}{Z_H} = Z_{T*H}. \quad (1.13)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора определяется потоками рассеяния. С увеличением номинального напряжения, увеличиваются расстояние между обмотками, потоки рассеяния, и, следовательно, индуктивное сопротивление.

Трехфазные трансформаторы, выпускаемые в нашей стране, мощностью более 10 МВА имеют следующие номинальные мощности (S_H):

16, 25, 32, 40, 63, 100, 125, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000 МВА.

Условное изображение трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, а также их схема замещения, представляющая трехлучевую звезду, приведены на рис.1.4.

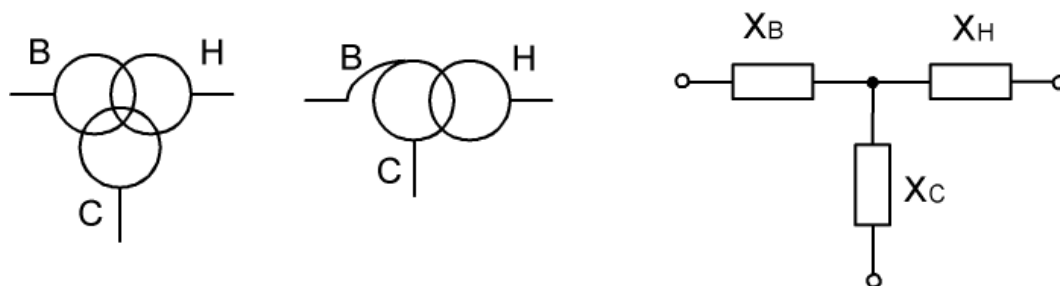


Рис.1.4. Условное изображение и схема замещения автотрансформатора и трехобмоточного трансформатора

Для трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов задаются следующие параметры: номинальная мощность S_H , напряжения обмоток высокого $U_B(U_I)$, среднего $U_C(U_{II})$ и низкого $U_H(U_{III})$ напряжений, три напряжения короткого замыкания для каждой пары обмоток: U_{k*BH} , U_{k*BC} , U_{k*CH} . Для автотрансформаторов в каталогах приводятся напряжения КЗ, приведенные к проходной мощности $S_{прох} = \sqrt{3}U_B I_B$. При замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжение неповрежденных фаз относительно земли увеличивается в $\sqrt{3}$ раза. Это называется перекосом напряжений. Через автотрансформатор перекося фаз может перейти с обмотки высокого напряжения на обмотку низкого напряжения если его нейтраль не заземлена. Поэтому автотрансформаторы применяются только в сетях с глухо заземленной нейтралью (110 кВ и выше).

Для нахождения напряжений короткого замыкания (или сопротивлений) отдельных обмоток, используются выражения, известные из курса электрических машин. Например, для обмотки высокого напряжения:

$$U_{k*B} = (U_{k*BC} + U_{k*BH} - U_{k*CH})/2.$$

Аналогичные выражения используются и для остальных обмоток (С и Н).

Если напряжение короткого замыкания (или сопротивление) одной из обмоток уже определено, например, для обмотки высокого напряжения, то остальные могут быть определены, используя более простые выражения, например: $U_{k*B} = U_{k*BH} - U_{k*H}$, $U_{k*C} = U_{k*BC} - U_{k*B}$, $U_{k*H} = U_{k*BH} - U_{k*B}$.

Обмотка среднего напряжения располагается, как правило, между обмотками высокого и низкого напряжений. Это приводит к снижению ее потоков рассеяния и, следовательно, индуктивного сопротивления. В некоторых случаях оно может принимать даже отрицательные значения, в этом случае им можно пренебречь.

Трансформаторы и автотрансформаторы (устанавливаемые в электрических сетях) имеют специальные устройства (типа ПБВ и РПН) для регулировки напряжения путем изменения коэффициентов трансформации с помощью специальных регулировочных ответвлений; при этом изменяется и напряжение короткого замыкания. Для повышения точности расчетов токов КЗ (в частности, для целей релейной защиты) необходимо учитывать реальный коэффициент трансформации и напряжение КЗ.

Краткие сведения о трансформаторах с расщепленными обмотками приведены в приложении 2. Параметры силовых трансформаторов и автотрансформаторов приведены в приложении 3.

Линии электропередачи. Воздушные линии (ВЛ) обладают практически равномерными по длине удельными параметрами. В практических расчетах токов КЗ для сравнительно небольших длин ВЛ до 150-300 км и кабельных линий до 30-50 км равномерно распределенные параметры можно заменить сосредоточенными. Данные о пропускной способности ВЛ и предельных расстояниях передачи приведены в

приложении № 4. Необходимо обратить внимание, что большей мощности соответствует меньшее расстояние передачи и наоборот. Предельные длины линий напряжением ниже 35 кВ ориентировочно могут быть определены по правилу: "киловольт на километр", т.е. для напряжения 10 кВ – 10 км, 6 кВ – 6 км и т.п.

Погонные индуктивные сопротивления фаз ВЛ зависят от взаимного расположения токоведущих проводников и их геометрических размеров. При расчетах токов КЗ пользуются средними погонными значениями индуктивного сопротивления $x_{\text{пог}}$. Если известны расстояния между проводами и тип проводов, то параметры удельных индуктивных сопротивлений можно найти в приложении 5.

Одноцепная линия. Условное изображение одноцепной ВЛ и схема замещения приведены на рис. 1.5.

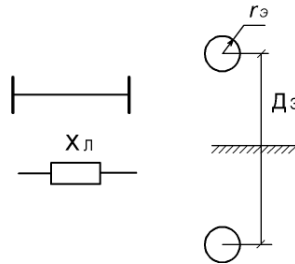


Рис. 1.5. Схема замещения и условное изображение линии электропередачи

Для одиночного провода, расположенного параллельно поверхности земли Джон Р. Карсон получил формулу для вычисления погонного сопротивления на частоте $f=50$ Гц на основе эквивалентного расстояния возврата тока в земле:

$$x_{\text{пог}} = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_3},$$

где D_3 - эквивалентная глубина возврата тока в земле, зависящая от сопротивления земли, которая при отсутствии данных о грунте принимается равной 1000 м;

$r_3 = r e^{-0,25} = 0,779 r$ - эквивалентный радиус провода ($r = D/2$ - здесь D измеренный диаметр проводника). Уменьшение эквивалентного радиуса проводника обусловлено поверхностным эффектом.

Провода линий выполняются многожильными, свитыми из отдельных круглых проволок, поэтому для многожильных проводов эквивалентный радиус еще меньше $r_3 \approx (0,726 - 0,776) r$.

Для выравнивания электрического поля проводов и ослабления явления ионизации воздуха в сетях напряжением 330 кВ и выше ВЛ выполняются с расщепленными проводами, при этом эквивалентный радиус системы проводов одной фазы

$$r_3' = \sqrt[n_p]{r_3 d_{cp}^{n_p-1}},$$

где d_{cp} - среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы, n_p - число проводов в фазе.

В ПУЭ установлены наименьшие значения допустимых диаметров проводов из условий короны: 110 кВ – АС-70; 220 кВ – АС-240; 330 кВ – АСО-600 или 2×АСО-240 (два провода в фазе); 500 кВ – 2×АСО-700 или 3×АСО-400 (два и три провода в фазе соответственно); 750 кВ – 4×АСО-500 (четыре провода в фазе).

В трехфазных ВЛ индуктивное сопротивление складывается из собственного сопротивления фазы $x_{\text{пог.с}}$ и двух взаимных сопротивлений (фаз) $x_{\text{пог.вз1}}$ и $x_{\text{пог.вз2}}$

$$x_{\text{пог.л}} = x_{\text{пог.с}} + x_{\text{пог.вз1}} + x_{\text{пог.вз2}}.$$

Считая, что выполнен полный цикл транспозиции проводов, и учитывая, что векторы токов (и потоков) фаз расположены под углом 120°

$$x_{\text{пог. л}} = x_{\text{пог. с}} - x_{\text{пог. в3}} = 0,145 \left(\lg \frac{D_3}{r_3} - \lg \frac{D_3}{D_{\text{ср}}} \right),$$

где $D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{d_{AB}d_{AC}d_{BC}}$ - среднее геометрическое расстояние между фазными проводами, здесь d_{ij} - расстояние между проводниками фаз A, B и C . Расстояние между проводами фаз составляет: до 1 кВ – 0,5 м; 6-10 кВ – 1 м; 35 кВ – 2,5 м; 110 кВ – 4 м; 220 кВ – 7 м; 330 кВ – 8,5 м; 500 кВ – 12 м; 750 кВ – 15 м; 1150 кВ – 22 м.

Для линии электропередачи (ЛЭП) с номинальным напряжением до 220 кВ включительно $x_{\text{пог. с}} \approx 0,7$ Ом/км, $x_{\text{пог. в3}} \approx 0,3$ Ом/км, поэтому при отсутствии данных о параметрах линии можно приближенно считать, что $x_{\text{пог. л}} \approx 0,7 - 0,3 = 0,4$ Ом/км.

С увеличением номинального напряжения линии, диаметр проводов увеличивается и, несмотря на то, что расстояние между проводниками фаз также увеличивается, емкости проводов (междуфазные и относительно земли) все же возрастают, а индуктивное сопротивление линии уменьшается, так как $\varepsilon \cdot \mu = \text{const}$. При отсутствии данных о ВЛ можно принять: для линий с номинальным напряжением 330 кВ и двумя проводами в фазе $x_{\text{пог. л}} \approx 0,32$ Ом/км, а с номинальным 500 кВ и тремя проводами в фазе $-x_{\text{пог. л}} \approx 0,29$ Ом/км.

Магнитные потоки, создаваемые токами, протекающими в проводах фаз, в грозозащитном тросе взаимно компенсируются, поэтому тросы не оказывают влияние на магнитное состояние линии, (даже в старых конструкциях ВЛ, когда тросы заземлялись на каждой опоре) и, следовательно, на ее индуктивное сопротивление при трехфазных КЗ влияния не оказывают.

При необходимости учета активного сопротивления ВЛ, например, при расчете переходного режима, погонное активное сопротивление может быть найдено из приложения №6 или по формулам:

$$\text{для медных проводов } R_{\text{пог}} = \frac{18,8}{F} \text{ Ом/км,}$$

$$\text{для алюминиевых проводов } R_{\text{пог}} = \frac{31,5}{F} \text{ Ом/км,}$$

где F - сечение провода, мм² (активное сопротивление проводов из цветных металлов обычно применяемых сечений при частоте 50 Гц практически равно активному сопротивлению на постоянном токе, т.е. явление поверхностного эффекта можно не учитывать).

Двухцепная линия. Магнитные потоки второй цепи двухцепной линии взаимно компенсируются в каждой фазе первой цепи, поэтому не оказывают на нее магнитного влияния. Электрическое влияние второй цепи характеризуется только ее параллельным подключением. Если сопротивления обеих цепей одинаковы, результирующее сопротивление двухцепной линии

$$x_{\text{пог. дц}} = \frac{1}{2} x_{\text{пог. л}}.$$

Кабели. Так как расстояния между проводниками фаз в кабеле меньше, чем в ВЛ, то индуктивные сопротивления трехжильных кабелей значительно меньше, чем для проводов ВЛ, в среднем они равны: для кабелей напряжением 35 кВ – 0,12 Ом/км; 3-10 кВ – 0,07-0,08 Ом/км; до 1 кВ – 0,06-0,07 Ом/км.

Активное сопротивления кабелей обычно применяемых сечений при частоте 50 Гц практически равно активному сопротивлению для постоянного тока и может быть определено по ранее приведенным формулам для ВЛ. В отличие от других элементов энергосистем активное сопротивление кабеля соизмеримо с его индуктивным сопротивлением на частоте 50 Гц и часто учитывается при расчетах токов КЗ. Длины кабелей напряжением 6-10 кВ в среднем равны 5-7 км, в сельской местности достигают

до 10 км. Более точно значения индуктивного $x_{\text{пог.к}}$ и активного $r_{\text{пог.к}}$ сопротивлений кабеля обычно находятся по заводским данным, приводимым в справочной литературе (приложение 7).

Реакторы. Условное изображение реактора и схема его замещения приведены на рис. 1.6. Для токоограничивающих реакторов задаются номинальное напряжение $U_{\text{н}}$, ток $I_{\text{н}}$ и сопротивление в процентах $x_p\%$. Сопротивление реактора определяется, главным образом, собственной индуктивностью катушки каждой фазы и взаимной индуктивностью между обмотками фаз пренебрегают.

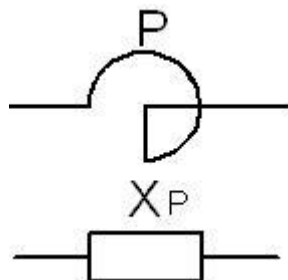


Рис.1.6. Условное изображение и схема замещения одинарного реактора

Электрические двигатели. Электрические двигатели (ЭД) и синхронные компенсаторы (СК), расположенные вблизи места КЗ являются дополнительными источниками тока КЗ, поэтому их необходимо учитывать при расчете сверхпереходных токов КЗ. Условное изображение и схема замещения ЭД такие же, как и синхронного генератора. ЭДС ЭД вычисляется по формуле

$$E'' = U_0 \pm I_0 x'' \sin \varphi_0, \quad (1.14)$$

где U_0 , I_0 , φ_0 - напряжение, ток и фазовый угол двигателя в нагрузочном режиме, предшествующем КЗ; знак плюс соответствует синхронному двигателю (СД) и СК, знак минус - асинхронному двигателю (АД) и недовозбужденному СД.

При отсутствии паспортных данных можно пользоваться их средними номинальными значениями:

для СД и СК $E''_{*СД} = 1,1$ и $x''_{*СД} = 0,2$;

для АД $E''_{*АД} = 0,9$ и $x''_{*АД} = 1/k_{\text{пуск}}$,

где $k_{\text{пуск}}$ - кратность пускового тока.

Технические характеристики электрических двигателей и синхронных компенсаторов приведены в приложении 10.

Обобщенная (промышленная) нагрузка. Под обобщенной нагрузкой принято понимать совокупность АД, каждый из которых имеет небольшую мощность. Таким образом, обобщенная нагрузка это эквивалентный АД, поэтому и ведет себя подобно АД. Схема замещения обобщенной нагрузки, подключенной в месте КЗ, такая же, как и синхронного генератора. Реактивность обобщенной нагрузки зависит от характера приемников электроэнергии и относительного участия каждого из них в рассматриваемом процессе. Для средней статистической нагрузки принято считать $E''_{*\text{нагр}} = 0,85$, $x''_{*\text{нагр}} = 0,35$.

Система (электрическая). Совокупность электрических станций, электроподстанций, трансформаторов связи, ЛЭП можно заменить одним эквивалентным генератором, который принято называть (электрической) системой. Для системы задаются ее полная мощность S_c (мощность всех входящих в систему генераторов) и номинальное напряжение U_c . На схеме замещения система изображается так же, как и генератор. При этом необходимо иметь в виду, что

номинальное напряжение генератора, как правило, не превышает 24 кВ (очень редко 150 кВ), поэтому подключаемые к нему обмотки трансформаторов соединены в треугольник. Напряжения системы, в принципе, могут иметь различные значения из стандартного ряда напряжений, как правило, более высокие, чем напряжения генераторов, поэтому подключаемые обмотки трансформаторов, обычно соединены в звезду. Напомним, что обмотки высокого напряжения (выше 35 кВ) соединяются в звезду, обмотки низкого напряжения (менее 35 кВ) – в треугольник.

Часто для системы задаются полная мощность $S_k^{(3)}$ при трехфазном КЗ и напряжение той ступени U_c , где известна мощность, в этом случае сопротивление системы: в именованных единицах

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_k^{(3)}}, \quad (1.15)$$

в относительных единицах

$$x_{c*} = \frac{S_6}{S_k^{(3)}}. \quad (1.16)$$

1.3. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в именованных единицах

Под начальным сверхпереходным током понимают действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент КЗ при $t = 0$. В расчетах применяют укрупненные именованные величины: кВ, кА, МВА и т.п.

Расчет ТКЗ начинается с составления схемы замещения, используя схемы замещения отдельных элементов, приведенные в п.1.2. Схему замещения изображают однолинейной, изображая одну из фаз. В отличие от принятого изображения электрических схем в них не показан замкнутый путь тока. На схеме замещения изображаются только те элементы, по которым протекает ток КЗ, используя симметрию схемы. Ток КЗ протекает от генераторов к месту повреждения. Элементы схемы замещения обозначают в виде обыкновенной дроби, в числителе которой находится порядковый номер, а в знаменателе – величина сопротивления.

Выбирается основная ступень напряжения, к которой затем приводятся сопротивления всех элементов и ЭДС генераторов. В качестве основной ступени напряжения рекомендуется принять ступень, где произошло КЗ.

Для исключения влияния соединения обмоток трансформаторов (автотрансформаторов) коэффициент трансформации определяется как отношение линейных напряжений при холостом ходе, при этом коэффициент трансформации определяется как отношение: напряжения обмотки, обращенной к основной ступени к напряжению обмотки, обращенной к приводимому элементу. При наличии между основной ступенью и приводимым элементом нескольких трансформаторов (автотрансформаторов) результирующий (эквивалентный) коэффициент трансформации равен произведению всех коэффициентов трансформации трансформаторов, расположенных между приводимым элементом и основной ступенью:

$$k_3 = k_1 k_2 \cdots k_n = \prod k_i.$$

Приведенные параметры обозначают, например, Z° . Для приведения используют следующие формулы:

$$E^\circ = E \cdot k_3, \quad (1.17)$$

$$U^\circ = U \cdot k_3, \quad I^\circ = I/k_3, \quad (1.18)$$

$$Z^\circ = Z \cdot k_3^2.$$

После вычисления всех ЭДС и сопротивлений и приведения к основной ступени, используя правила преобразования электрических схем, схема замещения сворачивается.

Найденные из преобразованной схемы эквивалентные ЭДС E''_{Σ} и сопротивление x''_{Σ} , используются для вычисления тока КЗ. Учитывая, что ЭДС линейная, а ток КЗ определяется в фазе, то сверхпереходный ток КЗ вычисляется по формуле

$$I''_k = \frac{E''_{\Sigma}}{\sqrt{3}x''_{\Sigma}}. \quad (1.19)$$

1.3.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации.

Сопротивления всех элементов схемы выражаются в именованных единицах с использованием выражений (1.7, 1.13). Сопротивления генератора x_G , трансформатора x_T , линии x_L и реактора x_p определяются с помощью выражений:

$$\left. \begin{aligned} x_G &= x''_d \frac{U_H^2}{S_H} = x''_d \frac{\cos\varphi \cdot U_H^2}{P_H}, \\ x_T &= \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H}, \\ x_L &= x_{\text{пог}} l, \\ x_p &= x_{p*H} \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H}, \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

где l - длина линии. Сопротивление кабеля вычисляется также как и линии. В формулу для вычисления сопротивления трансформатора можно подставить напряжение любой обмотки – при этом получим сопротивление трансформатора, приведенное к напряжению данной обмотки.

С целью компенсации потерь напряжения в элементах энергосистем (линии, кабели, трансформаторы, реакторы) номинальные напряжения обмоток повышающих трансформаторов выше стандартных номинальных напряжений соответствующего класса: если $U_H \leq 220\text{кВ}$, то на 10%, если $U_H \geq 330\text{кВ}$ – на 5 %. Напряжение 220 кВ является граничным, поэтому у некоторых повышающих трансформаторов это напряжение только на 5% выше номинального. Шкала напряжений питающих трансформаторов (таблица А):

Табл. А. Шкала напряжений питающих трансформаторов.

U_H , кВ	6	10	35	110	220	330	500
$U_{\text{повыш. тр-ра}}$, кВ	6,6	11	38,5	121	242 (230)	347	525

1.3.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

На практике часто используется приближенное приведение коэффициентов трансформации, упрощающее расчеты токов КЗ. Для каждой ступени принимают, что все номинальные напряжения обмоток трансформаторов и генераторов одинаковы и равны среднему номинальному напряжению трансформатора $U_{\text{ср.н}}$ или расчетному напряжению. В соответствии с "Правилами устройства электротехнических установок" среднее номинальное значения напряжения принимается выше стандартных номинальных напряжений соответствующего класса: если $U_H \leq 220\text{кВ}$, то на 5%, если $U_H \geq 330\text{кВ}$ – на 2,5 % (таблица Б).

Табл. Б. Шкала средних номинальных напряжений:

U_H , кВ	6	10	35	110	220	330	500
$U_{cp.H}$, кВ	6,3	10,5	37	115	230	340	515

Средние номинальные напряжения генераторов и непосредственно присоединенных к ним трансформаторов (блоков) равны номинальным: 6,3; 10,5; 13,8; 18; 20; 24 кВ.

В приближенном приведении нескольких последовательно соединенных трансформаторов напряжения промежуточных ступеней сокращаются и эквивалентный коэффициент трансформации определяется как отношение средних номинальных напряжений крайних ступеней, т.е. напряжения основной ступени и напряжения ступени приводимого элемента.

Для данного расчета применимы все формулы, приведенные в п.1.3.1. Погрешность расчета токов КЗ при приближенном приведении по сравнению с точным приведением не превышает 10-15%.

1.4. Расчет начальных сверхпереходных токов трехфазного короткого замыкания в относительных единицах

Составляется схема замещения, которая не отличается от схемы замещения для расчета токов КЗ в именованных единицах. Схема делится на ступени напряжения. Границами ступеней являются трансформаторы и автотрансформаторы. Номера ступеней принято обозначать римскими цифрами. В качестве первой ступени рекомендуется выбрать ступень, где произошло КЗ.

Расчет ТКЗ начинается с выбора базисных условий: базисной мощности S_6 и базисного напряжения U_6 одной из ступеней (где произошло КЗ). На других ступенях напряжения находятся пересчетом с помощью коэффициентов трансформации. Затем по формулам (1.3), (1.5) и (1.7) определяются все сопротивления в относительных единицах и к базисным условиям приводятся ЭДС всех генераторов.

1.4.1. Расчет ТКЗ с точным приведением коэффициентов трансформации. Базисное напряжение первой ступени (в месте КЗ) принимается равным действительному напряжению на этой ступени $U_{6I} = U_H$. Базисные напряжения остальных ступеней находятся с помощью коэффициентов трансформации.

Относительные базисные ЭДС генераторов находятся из выражения

$$E_{G*6} = \frac{E_G}{U_{6G}}, \quad (1.21)$$

где U_{6G} - базисное напряжение ступени, к которой подключены выводы генератора.

Сопротивление генератора x_{G*6} , трансформатора x_{T*6} , линии $x_{л*6}$ и реактора x_{p*6} вычисляются с помощью выражений (1.5, 1.8, 1.10):

$$\left. \begin{aligned} x_{G*6} &= x''_d \frac{S_6}{S_H} \left(\frac{U_H}{U_6} \right)^2 = x''_d \frac{S_6 \cos \varphi}{P_H} \left(\frac{U_H}{U_6} \right)^2, \\ x_{T*6} &= \frac{U_{K\%}}{100\%} \frac{S_6}{S_H} \left(\frac{U_H}{U_6} \right)^2, \\ x_{л*6} &= x_{уд} l \frac{S_6}{U_6^2}, \\ x_{p*6} &= x_{p*H} \frac{I_6 U_H}{I_H U_6}, \quad x_{p*6} = x_p \frac{S_6}{U_6^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

Необходимо следить, чтобы отношение напряжений $\left(\frac{U_H}{U_6} \right)$ соответствовало одной ступени напряжения. Для трансформаторов отношения $\left(\frac{U_{HI}}{U_{6i}} \right)$ равны для всех обмоток.

Используя правила преобразования электрических схем, схему замещения сворачивают и при этом получают эквивалентную ЭДС $E''_{э*б}$ и эквивалентное сопротивление $x_{э*б}$. Находят относительный базисный ток КЗ

$$I''_{k*6} = \frac{E''_{3*6}}{x_{3*6}}.$$

Для нахождения тока КЗ в именованных единицах используют формулу

$$I''_k = I''_{k*6}I_{6j},$$

где $I_{6i} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{6i}}$ - базисный ток той ступени, где находится ток КЗ.

Значения токов КЗ определенные в относительных единицах должны совпадать со значениями токов вычисленных в именованных единицах.

1.4.2. Расчет ТКЗ с приближенным приведением коэффициентов трансформации.

При приближенном приведении базисные напряжения принимаются равным средним номинальным напряжениям, т.е. $U_{\bar{\sigma}} = U_{\text{ср.н}}$.

Так как ЭДС генератора при приближенном приведении задается равной напряжению на выводах генератора, то, используя (1.21), получим $E_{G*6} = 1$. При приближенном приведении упрощаются формулы определения сопротивлений элементов, для которых сопротивления заданы в относительных единицах:

$$x_{G*6} = x''_d \frac{S_6}{S_u} = x''_d \frac{S_6 \cos \varphi}{P_u},$$

$$x_{T*6} = \frac{U_{k\%}}{100\%} \frac{S_6}{S_H},$$

$$x_{P*6} = x_{p*H} \frac{I_6}{I_H},$$

Все остальные выражения, необходимые для расчета токов КЗ остаются без изменения.

Пример 1.1.

Для схемы рис. 1.7. определить сверхпереходный ток трехфазного КЗ в точке К1 без учета активных сопротивлений и в точке К2 с учетом активного сопротивления кабеля.

Расчет выполнить четырьмя методами:

- в именованных единицах с точным приведением;
- в относительных единицах с точным приведением;
- в именованных единицах с приближенным приведением;
- в относительных единицах с приближенным приведением.

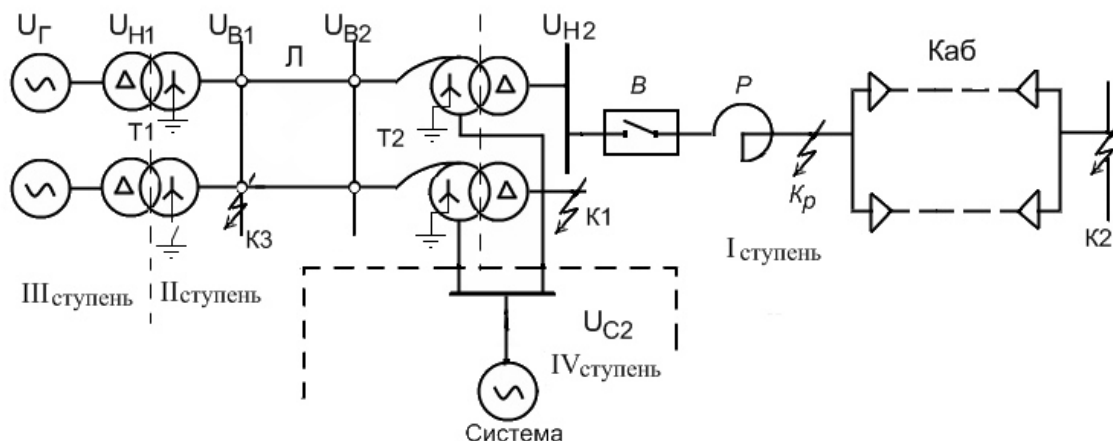


Рис.1.7. Схема электрической сети

Номер варианта

$n v := 1$
 $Gen :=$

Таблица 1.1

Генераторы ГЭС						
N	Рном МВт	cosφ	Uном кВ	X"d Ω	X2 Ω	Ta сек
1	44	0.8	10.5	0.23	0.24	0.1
2	50.4	0.9	11	0.18	0.19	0.09
3	45	0.8	10.5	0.2	0.222	0.095
4	55	0.85	10.5	0.22	0.23	0.09
5	56	0.85	10.5	0.21	0.215	0.085
6	60	0.9	11	0.14	0.15	0.095
7	57	0.85	10.5	0.2	0.195	0.1

Извлечение параметров генератора из массива Gen:

- тип электростанции ГЭС

- мощность генератора

$$P_{HT} := Gen_{nv+2,1} \cdot MW = 44 \cdot MW$$

- номинальный

$$\cos \varphi_{\Gamma} := Gen_{nv+2,2} = 0.8 \quad \sin \varphi_{\Gamma} := \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\Gamma}} = 0.6$$

- номинальное напряжение

$$U_{HT} := Gen_{nv+2,3} \cdot kV = 10.5 \cdot kV$$

- сверхпереходное сопротивление генератора

$$X'_{d*HT} := Gen_{nv+2,4} = 0.23$$

- сопротивление обратной последовательности генератора

$$X_{2*HT} := Gen_{nv+2,5} = 0.24$$

- постоянная времени

$$T_a := Gen_{nv+2,6} \cdot s = 0.1 \cdot s$$

 $Tr1 :=$

Таблица 1.2 :

Трансформаторы электростанции					
Тран:	St1	Uвт1	Uнт1	Uкт1	Рк1
N	MBA	кВ	кВ	%	кВт
1	40	158	10.5	10	170
2	40	165	11	10.5	170
3	40	158	10.5	11	170
4	63	165	10.5	11.5	245
5	63	158	10.5	12	245
6	63	165	11	10	245
7	63	158	10.5	10.5	245

Параметры трансформаторов электростанции:

- мощность трансформатора

$$S_{T1} := Tr1_{nv+2,1} \cdot MW = 40 \cdot MW$$

- высшее напряжение трансформатора

$$U_{BT1} := Tr1_{nv+2,2} \cdot kV = 158 \cdot kV$$

- низшее напряжение трансформатора

$$U_{HT1} := Tr1_{nv+2,3} \cdot kV = 10.5 \cdot kV$$

- напряжение короткого замыкания

$$u_{KT1} := Tr1_{nv+2,4} \cdot \% = 10 \cdot \%$$

- потери короткого замыкания

$$P_{KT1} := Tr1_{nv+2,5} \cdot kW = 170 \cdot kW$$

Tr2 :=

Таблица 1.3

Трансформаторы подстанции						
Вар	St2	Uвт2	Uст2	Uнт2	Uквс	Uквн
N	MBA	кВ	кВ	кВ	%	%
1	80	150	115	6,6	11	24
2	100	150	121	11	11,5	26
3	80	150	115	6,6	12	28
4	100	150	121	11	12,5	30
5	80	150	115	6,6	13	32
6	100	150	121	11	11	24
7	80	150	115	6,6	11,5	26

Параметры автотрансформаторов подстанции:

- мощность автотрансформатора

$$S_{T2} := Tr2_{nv+2,1} \cdot MW = 80 \cdot MW$$

- высшее напряжение автотрансформатора

$$U_{BT2} := Tr2_{nv+2,2} \cdot kV = 150 \cdot kV$$

- среднее напряжение автотрансформатора

$$U_{CT2} := Tr2_{nv+2,3} \cdot kV = 115 \cdot kV$$

- низшее напряжение автотрансформатора

$$U_{HT2} := Tr2_{nv+2,4} \cdot kV = 6.6 \cdot kV$$

- напряжения короткого замыкания

$$u_{KBC} := Tr2_{nv+2,5} \cdot \% = 11 \cdot \%$$

$$u_{KBH} := Tr2_{nv+2,6} \cdot \% = 24 \cdot \%$$

$$u_{KCH} := Tr2_{nv+2,7} \cdot \% = 13 \cdot \%$$

- потери короткого замыкания

$$P_{KBC} := Tr2_{nv+2,8} \cdot kW = 220 \cdot kW$$

$$P_{KBH} := Tr2_{nv+2,9} \cdot kW = 180 \cdot kW$$

$$P_{KCH} := Tr2_{nv+2,10} \cdot kW = 140 \cdot kW$$

SRV :=

Таблица 1.4

Вар	Uнс	Xс	Система	Реактор	
			Xс/Rс	Uнр	Iнр
N	кВ	Ом	-	кВ	кА
1	110	4	7	6	0.4
2	110	5	8	10	0.63
3	110	6	9	6	1
4	110	7	10	10	0.4
5	110	8	11	6	0.63
6	110	4	7	10	1
7	110	5	8	6	0.4

Параметры системы:

- номинальное напряжение системы

$$U_c := SRV_{nv+4,1} \cdot kV = 110 \cdot kV$$

- сопротивление системы

$$X_c := SRV_{nv+2,2} \cdot ohm = 4 \cdot ohm$$

- отношение X_c к R_c

$$XkR := SRV_{nv+2,3} = 7$$

Параметры реактора:

- номинальное напряжение реактора

$$U_{нр} := SRV_{nv+2,4} \cdot kV = 6 \cdot kV$$

- номинальный ток реактора

$$I_{нр} := SRV_{nv+2,5} \cdot kA = 0.4 \cdot kA$$

Параметры выключателя:

- номинальный ток отключения выключателя

$$I_{нотк} := SRV_{nv+2,7} \cdot kA = 10 \cdot kA$$

LK :=

Таблица 1.5

ЛЭП				Кабели			
Вар	Lл	Худл	Спров		Lк	Худк	Гудк
N	км	Ом/км	мм ²		км	Ом/км	Ом/км
1	40	0.4	70		1	0.078	0.326
2	41	0.41	70		1.5	0.081	0.258
3	42	0.42	70		2	0.074	0.206
4	43	0.4	70		2.5	0.077	0.167
5	44	0.41	70		3	0.071	0.129
6	45	0.42	95		1	0.083	0.326
7	46	0.4	95		1.5	0.076	0.258

Параметры воздушной линии передачи:

- длина воздушной линии

$$L_{л} := LK_{nv+2,1} \cdot km = 40 \cdot km$$

- удельное индуктивное сопротивление воздушной линии

$$X_{удл} := LK_{nv+2,2} \cdot \frac{ohm}{km} = 0.4 \cdot \frac{ohm}{km}$$

-сечение алюминиевых проодов

$$S_{пров} := LK_{nv+2,3} \cdot mm^2 = 70 \cdot mm^2$$

Параметры кабельных линий:

- длина кабеля

$$L_{к} := LK_{nv+2,5} \cdot km = 1 \cdot km$$

- удельное индуктивное сопротивление кабелей

$$X_{удк} := LK_{nv+2,6} \cdot \frac{ohm}{km} = 0.078 \cdot \frac{ohm}{km}$$

- удельное активное сопротивление кабелей

$$R_{удк} := LK_{nv+2,7} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} = 0.326 \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}}$$

Составляем схему замещения (рис. 1.2)

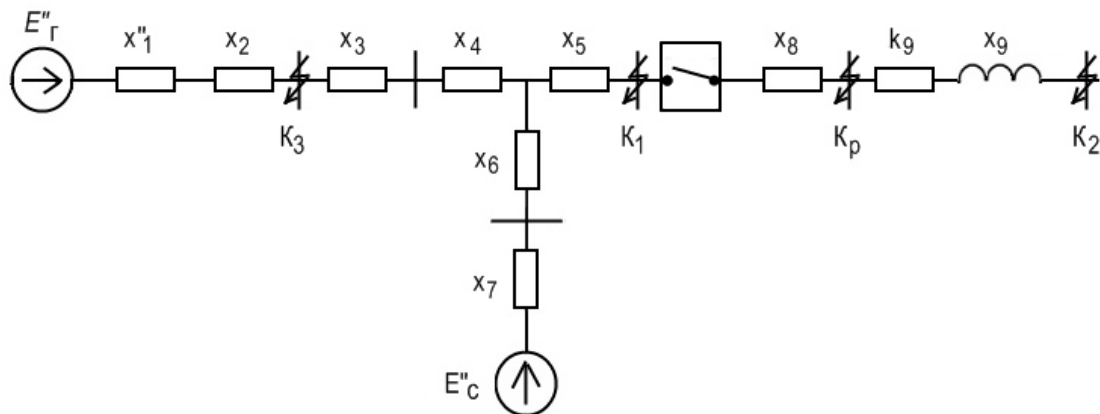


Рис.1.8. Схема замещения

Расчет тока короткого замыкания в точке K1

1.1.1. Расчет в именованных единицах с точным приведением

Расчет приведенных сопротивлений:
генераторов

$$X_{П1} := X''_{д*_{нг}} \cdot \frac{\cos \varphi_{Г} \cdot U_{нг}^2}{2 \cdot P_{нг}} \cdot \left(\frac{U_{вт1}}{U_{нг1}} \cdot \frac{U_{нг2}}{U_{вт2}} \right)^2 = 0.101 \Omega$$

трансформаторов электростанции

$$X_{П2} := \frac{u_{кт1}}{100\%} \cdot \frac{U_{вт1}^2}{2 \cdot S_{т1}} \cdot \left(\frac{U_{нг2}}{U_{вт2}} \right)^2 = 0.06 \Omega$$

воздушной линии

$$X_{П3} := X_{удл} \cdot L_{л} \cdot \left(\frac{U_{нг2}}{U_{вт2}} \right)^2 = 0.031 \Omega$$

автотрансформаторов подстанции

Напряжение короткого замыкания, приходящееся на одну обмотку

$$u_{кв} := 0.5 \cdot (u_{квс} + u_{квн} - u_{ксн}) = 11\%$$

$$u_{кс} := 0.5 \cdot (u_{квс} + u_{ксн} - u_{квн}) = 0\%$$

$$u_{кн} := 0.5 \cdot (u_{квн} + u_{ксн} - u_{квс}) = 13\%$$

$$X_{П4} := \frac{u_{кв}}{100\%} \cdot \frac{U_{нг2}^2}{2 \cdot S_{т2}} = 0.03 \Omega$$

$$X_{\pi 5} := \frac{u_{\text{кн}}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 0.035 \, \Omega$$

$$X_{\pi 6} := 0$$

системы

$$X_{\pi 7} := X_c \cdot \left(\frac{U_{\text{HT2}}}{U_{\text{CT2}}} \right)^2 = 0.013 \, \Omega$$

Определение сверхпереходных ЭДС

Электростанции

$$E_{\pi'' \Gamma} := U_{\text{HT}} \cdot \sqrt{\left(1 + X''_{d\Gamma \text{HT}} \cdot \sin \varphi_{\Gamma} \right)^2 + \left(X''_{d\Gamma \text{HT}} \cdot \cos \varphi_{\Gamma} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{BT1}}}{U_{\text{HT1}}} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}}{U_{\text{BT2}}} = 8.014 \cdot \text{kV}$$

Системы

$$E_{\pi'' c} := U_c \cdot \frac{U_{\text{HT2}}}{U_{\text{CT2}}} = 6.313 \cdot \text{kV}$$

Определение эквивалентных параметров.

преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3)

$$X_{\pi 10} := X_{\pi'' 1} + X_{\pi 2} + X_{\pi 3} + X_{\pi 4} = 0.222 \, \Omega$$

$$X_{\pi 11} := X_{\pi 6} + X_{\pi 7} = 0.013 \, \Omega$$

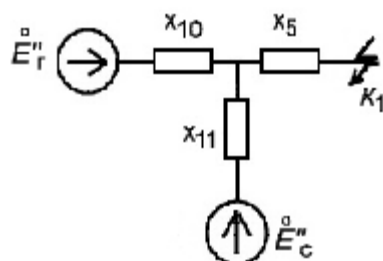


Рис.1.9. Упрощенная схема замещений

Эквивалентная ЭДС

$$E_{\pi''} := \frac{E_{\pi'' \Gamma} \cdot \frac{1}{X_{\pi 10}} + E_{\pi'' c} \cdot \frac{1}{X_{\pi 11}}}{\frac{1}{X_{\pi 10}} + \frac{1}{X_{\pi 11}}} = 6.408 \cdot \text{kV}$$

Эквивалентное сопротивление

$$X_{\pi'' \Sigma k1} := \frac{X_{\pi 10} \cdot X_{\pi 11}}{X_{\pi 10} + X_{\pi 11}} + X_{\pi 5} = 0.048 \, \Omega$$

Ток КЗ в точке К1

$$I''_{k1 \text{ ппм}} := \frac{E_{\pi''}}{\sqrt{3} \cdot X_{\pi'' \Sigma k1}} = 77.351 \cdot \text{kA}$$

1.1.2. Расчет в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации.

Принимаем $S_{\delta} := 1000 \cdot \text{MW}$

Определяем базисные напряжения

$$U_{\delta 1} := U_{HT2} = 6.6 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\delta 2} := U_{\delta 1} \cdot \frac{U_{BT2}}{U_{HT2}} = 150 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\delta 3} := U_{\delta 2} \cdot \frac{U_{HT1}}{U_{BT1}} = 9.968 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\delta 4} := U_{\delta 1} \cdot \frac{U_{CT2}}{U_{HT2}} = 115 \cdot \text{kV}$$

Определяем базисный ток I ступени

$$I_{\delta 1} := \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = 87.477 \cdot \text{kA}$$

Расчет сопротивлений генераторов

$$X_{*1} := X''_{d*HT} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi_{\Gamma}}{2 \cdot P_{HT}} \cdot \left(\frac{U_{HT}}{U_{\delta 3}} \right)^2 = 2.32$$

трансформаторов электростанции

$$X_{*2} := \frac{u_{KT1}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T1}} \cdot \left(\frac{U_{BT1}}{U_{\delta 2}} \right)^2 = 1.387$$

воздушной линии

$$X_{*3} := X_{удл} \cdot L_{\Pi} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} = 0.711$$

трансформаторов подстанции

$$X_{*4} := \frac{u_{KB}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T2}} \cdot \left(\frac{U_{BT2}}{U_{\delta 2}} \right)^2 = 0.687$$

$$X_{*6} := 0$$

$$X_{*5} := \frac{u_{KH}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T2}} \cdot \left(\frac{U_{HT2}}{U_{\delta 1}} \right)^2 = 0.813$$

системы

$$X_{*7} := X_c \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 4}^2} = 0.302$$

Определение сверхпереходных ЭДС электростанции

$$E''_Г := U_{\text{нГ}} \cdot \sqrt{\left(1 + X''_{d\text{Г}} \cdot \sin \varphi_{\text{Г}}\right)^2 + \left(X''_{d\text{Г}} \cdot \cos \varphi_{\text{Г}}\right)^2} = 12.104 \cdot \text{kV}$$

$$E''_{\text{Г}} := \frac{E''_Г}{U_{\text{б3}}} = 1.214$$

системы

$$E''_{\text{с}} := \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{б4}}} = 0.957$$

Определение эквивалентных параметров.

Преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3.)

$$X_{\text{Г10}} := X''_{\text{Г1}} + X_{\text{Г2}} + X_{\text{Г3}} + X_{\text{Г4}} = 5.105$$

$$X_{\text{Г11}} := X_{\text{Г6}} + X_{\text{Г7}} = 0.302$$

Эквивалентная ЭДС

$$E''_{\text{Г1}} := \frac{E''_{\text{Г}} \cdot \frac{1}{X_{\text{Г10}}} + E''_{\text{с}} \cdot \frac{1}{X_{\text{Г11}}}}{\frac{1}{X_{\text{Г10}}} + \frac{1}{X_{\text{Г11}}}} = 0.971$$

Эквивалентное сопротивление

$$X''_{\Sigma \text{К1}} := \frac{X_{\text{Г10}} \cdot X_{\text{Г11}}}{X_{\text{Г10}} + X_{\text{Г11}}} + X_{\text{Г5}} = 1.098$$

Ток в точке К1

$$I_{\text{К1 тог}} := \frac{E''_{\text{Г1}}}{X''_{\Sigma \text{К1}}} \cdot I_{\text{б1}} = 77.351 \cdot \text{kA}$$

1.1.3. Расчет именованных единиц с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Замена напряжений обмоток трансформаторов на средние номинальные напряжения

Вводим вектор средних номинальных напряжений

$$U_{\text{срн}} := \begin{pmatrix} 340 \cdot \text{kV} \\ 230 \cdot \text{kV} \\ 154 \cdot \text{kV} \\ 115 \cdot \text{kV} \\ 37 \cdot \text{kV} \\ 24 \cdot \text{kV} \\ 20 \cdot \text{kV} \\ 18 \cdot \text{kV} \\ 15.75 \cdot \text{kV} \\ 13.8 \cdot \text{kV} \\ 10.5 \cdot \text{kV} \\ 6.3 \cdot \text{kV} \end{pmatrix}$$

Выбор ближайших средних номинальных напряжений из вектора

$$U_{\text{ном}} := U_{\text{вт1}} = 158 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срвт1}} := U_{\text{ср}}(U_{\text{срн}}, U_{\text{ном}}) = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{ном}} := U_{\text{вт2}} = 150 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срвт2}} := U_{\text{ср}}(U_{\text{срн}}, U_{\text{ном}}) = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{ном}} := U_{\text{ст2}} = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срст2}} := U_{\text{ср}}(U_{\text{срн}}, U_{\text{ном}}) = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{ном}} := U_{\text{нт2}} = 6.6 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срнт2}} := U_{\text{ср}}(U_{\text{срн}}, U_{\text{ном}}) = 6.3 \cdot \text{kV}$$

Расчет приведенных приближенных сопротивлений генераторов

$$X_{\text{пт1}} := X''_{\text{д+нт}} \cdot \frac{\cos \varphi_{\text{Г}} \cdot U_{\text{срнт2}}^2}{2 \cdot P_{\text{нт}}} = 0.083 \, \Omega$$

трансформаторов электростанции

$$X_{\text{пт2}} := \frac{u_{\text{кт1}}}{100 \cdot \%} \cdot \frac{U_{\text{срнт2}}^2}{2 \cdot S_{\text{т1}}} = 0.05 \, \Omega$$

воздушной линии

$$X_{\text{пт3}} := X_{\text{удл}} \cdot L_{\text{л}} \cdot \left(\frac{U_{\text{срнт2}}}{U_{\text{срвт2}}} \right)^2 = 0.027 \, \Omega$$

автотрансформаторов подстанции

$$X_{\text{пт6}} := 0$$

$$X_{\text{III}4} := \frac{u_{\text{кв}}}{100\cdot\%} \cdot \frac{U_{\text{срнГ2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 0.027 \Omega$$

$$X_{\text{III}5} := \frac{u_{\text{кн}}}{100\cdot\%} \cdot \frac{U_{\text{срнГ2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 0.032 \Omega$$

системы

$$X_{\text{III}7} := X_{\text{с}} \cdot \left(\frac{U_{\text{срнГ2}}}{U_{\text{срсГ2}}} \right)^2 = 0.012 \Omega$$

Определение сверхпереходных ЭДС.

При приближенном расчете приведенная эквивалентная ЭДС равна среднему номинальному напряжению I ступени.

$$E_{\text{III}} := U_{\text{срнГ2}} = 6.3 \cdot \text{kV}$$

Преобразуем схему замещения для К1 (рис.1.3.)

$$X_{\text{III}10} := X_{\text{III}1} + X_{\text{III}2} + X_{\text{III}3} + X_{\text{III}4} = 0.187 \Omega$$

$$X_{\text{III}11} := X_{\text{III}6} + X_{\text{III}7} = 0.012 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$X_{\text{III}^{\Sigma} \text{K1}} := \frac{X_{\text{III}10} \cdot X_{\text{III}11}}{X_{\text{III}10} + X_{\text{III}11}} + X_{\text{III}5} = 0.044 \Omega$$

Ток КЗ в точке К1

$$I_{\text{к1 III}} := \frac{E_{\text{III}}}{\sqrt{3} \cdot X_{\text{III}^{\Sigma} \text{K1}}} = 83.564 \cdot \text{kA}$$

1.1.4. Расчет в относительных единицах с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Замена напряжений обмоток трансформаторов как в пункте 1.1.3.

Базисные напряжения принимаем равными соответствующим средним номинальным напряжениям.

$$U_{\text{срб1}} := U_{\text{срнГ2}} = 6.3 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срб2}} := U_{\text{срвГ2}} = 154 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срб3}} := U_{\text{нГ1}} = 10.5 \cdot \text{kV}$$

$$U_{\text{срб4}} := U_{\text{срсГ2}} = 115 \cdot \text{kV}$$

Базисный ток I ступени

$$I_{\text{срб1}} := \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{срб1}}} = 91.643 \cdot \text{kA}$$

Расчет сопротивлений генераторов

$$X_{\text{Г}^{\#}1} := X_{\text{Г}^{\#} \text{д}^{\#} \text{Г}} \cdot \frac{S_{\text{б}} \cdot \cos \varphi_{\text{Г}}}{2 \cdot P_{\text{Г}}} = 2.091$$

трансформаторов электростанции

$$X_{\Pi*2} := \frac{u_{KT1}}{100\cdot\%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T1}} = 1.25$$

воздушной линии

$$X_{\Pi*3} := X_{удл} \cdot L_{л} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср\delta 2}^2} = 0.675$$

трансформаторов подстанции

$$X_{\Pi*4} := \frac{u_{KB}}{100\cdot\%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T2}} = 0.687$$

$$X_{\Pi*5} := \frac{u_{KH}}{100\cdot\%} \cdot \frac{S_{\delta}}{2 \cdot S_{T2}} = 0.813$$

$$X_{\Pi*6} := 0$$

системы

$$X_{\Pi*7} := X_c \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ср\delta 4}^2} = 0.302$$

Эквивалентная сверхпереходная ЭДС

$$E''_{\Pi*k1} := 1$$

Преобразуем схему замещения для K1 (рис.1.3.)

$$X_{\Pi*10} := X''_{\Pi*1} + X_{\Pi*2} + X_{\Pi*3} + X_{\Pi*4} = 4.703$$

$$X_{\Pi*11} := X_{\Pi*6} + X_{\Pi*7} = 0.302$$

Эквивалентное сопротивление

$$X''_{\Pi*\Sigma k1} := \frac{X_{\Pi*10} \cdot X_{\Pi*11}}{X_{\Pi*10} + X_{\Pi*11}} + X_{\Pi*5} = 1.097$$

Ток КЗ в точке K1

$$I_{k1\text{п\text{о\text{т}}}} := \frac{E''_{\Pi*k1}}{X''_{\Pi*\Sigma k1}} \cdot I_{ср\delta 1} = 83.564 \cdot \text{kA}$$

1.1.5. Выбор реактора

Реактор должен ограничивать ТКЗ в точке Kp до тока отключения выключателя. Тогда необходимое сопротивление реактора

$$X_p := \frac{E''_{\Pi}}{I_{\text{нотк}}} - X''_{\Pi*\Sigma k1} = 0.593 \Omega$$

Переводим сопротивление реактора в %%

$$X_{p\%} := X_p \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нр}} \cdot 100\cdot\%}{U_{\text{нр}}} = 6.847\cdot\%$$

Вводим вектор стандартных сопротивлений ректора в %%

$$X_{pct} := \begin{pmatrix} 3\% \\ 4\% \\ 5\% \\ 6\% \\ 7\% \\ 8\% \\ 10\% \\ 12\% \\ 15\% \\ 20\% \\ 25\% \\ 30\% \end{pmatrix}$$

Выбор ближайшего стандартного сопротивления ректора в %.

$$X_{pct\%} := X_{ct}(X_{pct}, X_{p\%}) = 7\%$$

1.1.6. Расчет тока короткого замыкания в точке K2

1.1.6.1. Расчет в именованных единицах с точным приведением.

Расчет сопротивлений
реактора

$$X_8 := \frac{X_{p\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{нр}}{\sqrt{3} \cdot I_{нр}} = 0.593 \Omega$$

кабеля

$$X_9 := \frac{1}{2} \cdot X_{удк} \cdot L_K = 0.039 \Omega$$

$$R_9 := \frac{1}{2} \cdot R_{удк} \cdot L_K = 0.163 \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{п''\Sigma k2} := \sqrt{(X_{п''\Sigma k1} + X_8 + X_9) \cdot (X_{п''\Sigma k1} + X_8 + X_9) + R_9^2} = 0.699 \Omega$$

Ток КЗ в точке K2

$$I_{K2пм} := \frac{E_{п''}}{\sqrt{3} \cdot Z_{п''\Sigma k2}} = 5.292 \cdot kA$$

1.1.6.2. Расчет в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации.

Расчет сопротивления
реактора

$$X_{*8} := X_8 \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = 13.613$$

кабеля

$$X_{*9} := X_9 \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = 0.895$$

$$R_{*9} := R_9 \cdot \frac{S_6}{U_{61}^2} = 3.742$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{* \Sigma k2} := \sqrt{(X_{* \Sigma k1} + X_{*8} + X_{*9}) \cdot (X_{* \Sigma k1} + X_{*8} + X_{*9}) + R_{*9}^2} = 16.049$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{K2TOT} := \frac{E_{*k1}}{Z_{* \Sigma k2}} \cdot I_{61} = 5.292 \cdot \text{kA}$$

1.1.6.3. Расчет в именованных единицах с приближенным приведением.

Расчет сопротивлений

реактора

$$X_{\Pi 8} := X_8 = 0.593 \, \Omega$$

кабеля

$$X_{\Pi 9} := X_9 = 0.039 \, \Omega$$

$$R_{\Pi 9} := R_9 = 0.163 \, \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{\Pi \Pi'' \Sigma k2} := \sqrt{(X_{\Pi \Pi'' \Sigma k1} + X_{\Pi 8} + X_{\Pi 9})^2 + R_{\Pi 9}^2} = 0.695 \, \Omega$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{K2 \Pi \Pi''} := \frac{E_{\Pi \Pi''}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Pi \Pi'' \Sigma k2}} = 5.234 \cdot \text{kA}$$

1.1.6.4. расчет в относительных единицах с приближенным учетом коэффициентов трансформации.

Расчет сопротивлений

реактора

$$X_{\Pi * 8} := X_{\Pi 8} \cdot \frac{S_6}{U_{ср61}^2} = 14.94$$

кабеля

$$X_{\Pi * 9} := X_{\Pi 9} \cdot \frac{S_6}{U_{ср61}^2} = 0.983$$

$$R_{\pi*9} := R_{\pi9} \cdot \frac{S_6}{U_{cp61}^2} = 4.107$$

Эквивалентное сопротивление

$$Z_{\pi*\Sigma k2} := \sqrt{(X_{\pi*\Sigma k1} + X_{\pi*8} + X_{\pi*9})^2 + R_{\pi*9}^2} = 17.508$$

Ток КЗ в точке К2

$$I_{k2\text{пот}} := \frac{E_{\pi*k1}}{Z_{\pi*\Sigma k2}} \cdot I_{cp61} = 5.234 \cdot \text{kA}$$

1.5. Мощность короткого замыкания

При выборе выключателей его номинальный ток отключения сопоставляют с величиной тока КЗ, которая имеет место в расчетный момент отключения повреждения. Соответственно, если этот выбор производится по номинальной мощности отключения, то она должна быть сопоставлена с так называемой мощностью КЗ

$$S_{kt} = \sqrt{3} U_{cp.n} I_{kt},$$

где I_{kt} - ток КЗ в расчетный момент времени, $U_{cp.n}$ - среднее номинальное напряжение той ступени, где установлен выключатель.

В относительных единицах при $U_6 = U_{cp.n}$ мощность равна току $S_{k*} = I_{k*} = \frac{1}{x_{\Sigma*6}}$, откуда $S_k = S_{k*} S_6 = S_6 / x_{\Sigma*6}$.

Поэтому расчеты можно вести непосредственно для мощностей КЗ. Мощность отключения выключателя по ГОСТу 687-70 дается при наибольшем рабочем напряжении.

Контрольные вопросы к главе 1

1. Короткие замыкания. Причины, виды, последствия.
2. Назначение расчетов токов КЗ. Основные требования и допущения.
3. Система относительных единиц.
4. Формулы определения сопротивлений основных элементов энергосистем в именованных единицах.
5. Формулы для определения сопротивлений основных элементов энергосистем в относительных единицах.
6. Математические модели синхронных генераторов, силовых трансформаторов (автотрансформаторов), линий электропередачи, кабелей, реакторов, электрических двигателей, обобщенной нагрузки, системы для расчета токов КЗ.
7. Эквивалентные преобразования электрических схем (преобразование двух параллельно включенных источников ЭДС с различными ЭДС и внутренними сопротивлениями, преобразование звезды в треугольник и обратное преобразование).
8. Порядок расчета тока КЗ в именованных единицах.
9. Порядок расчета тока КЗ в относительных единицах.
10. Точное и приближенное приведение коэффициентов трансформации при выполнении расчетов токов КЗ.
11. Мощность КЗ.

Задача 1.1.

1. Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном повреждении в точке K для схем участков энергосистемы, приведенных на рис.1.10,а,б именованных и относительных базисных единицах с точным и приближенным приведением коэффициентов трансформации. Генераторы до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

Параметры основных элементов схем приведены таблице. Недостающие параметры элементов схемы выбрать в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Все параллельно работающие элементы сети рекомендуется выбирать однотипными. Количество параллельно включенных элементов должно быть не менее двух. Суммарная мощность всех трансформаторов электрической станции (ЭС) должна быть не менее полной мощности всех генераторов (ТГ-турбогенераторы, ГГ-гидрогенераторы). Длина линии Л2 выбирается по напряжению обмотки среднего напряжения (авто) трансформатора подстанции (п/ст). Погонное сопротивление линии выбирается по напряжению.

Результаты расчетов токов КЗ представить в виде таблицы.

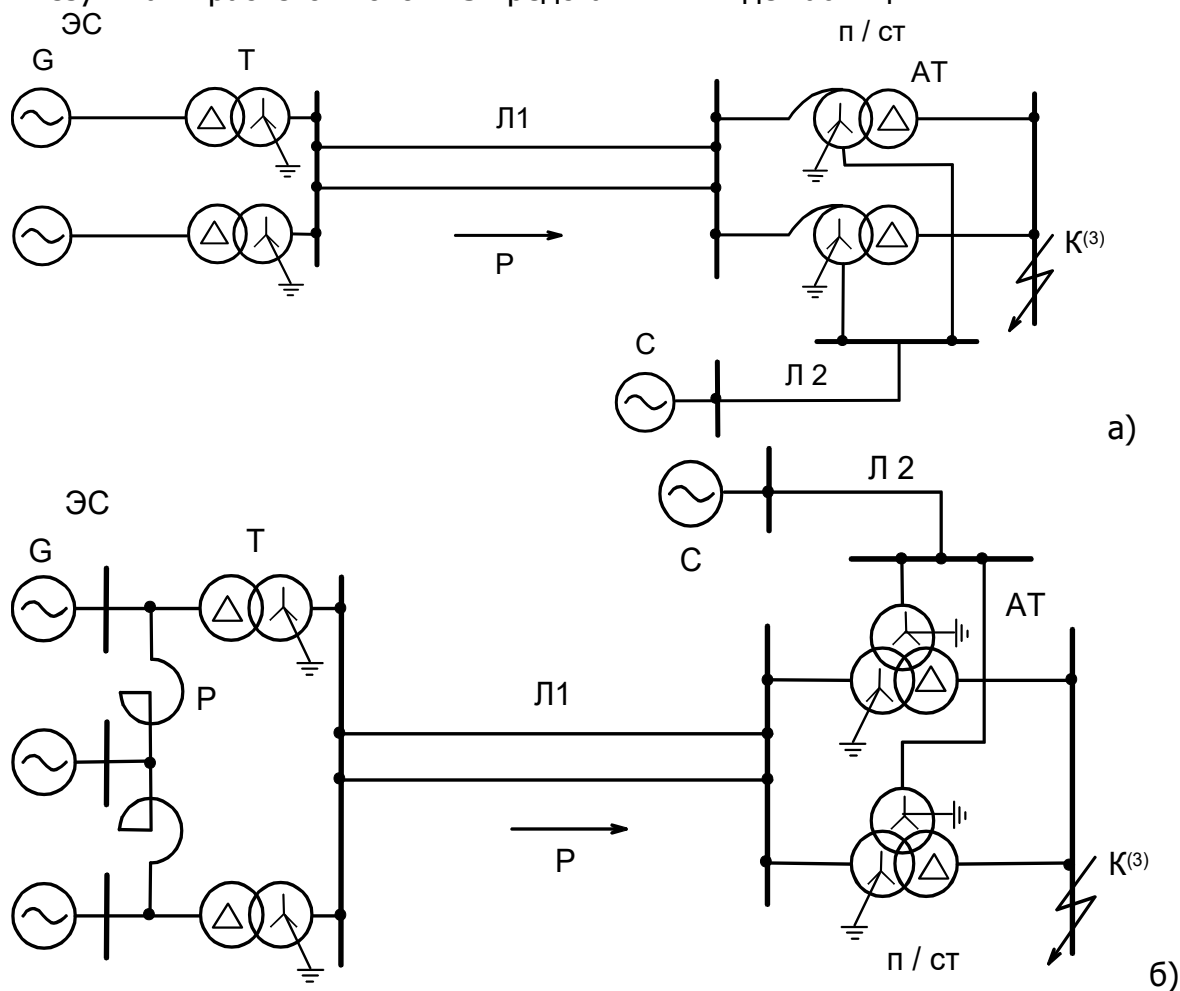


Рис.1.10. Схемы участков энергосистем

Таблица 1.6. Исходные данные

№ п.п.	Последняя цифра шифра	Схема на рис.1.10	Тип генераторов	$P_{ген}, \text{ МВт}$	Длина линии Л1, км	Мощность (авто) трансформаторов п/ст, МВА	Сопротивление системы, Ом
1	0	а)	ГГ	170-220	240-260	120-150	18
2	1	а)	ТГ	380-410	140-170	120-150	16
3	2	а)	ТГ	580-620	280-300	200-260	25
4	3	а)	ГГ	750-810	190-210	200-260	22
5	4	а)	ГГ	1150-1400	1100-1200	800-1000	26
6	5	а)	ТГ	1600-1800	700-900	900-1000	23
7	6	б)	ТГ	50-60	130-160	120-140	9
8	7	б)	ТГ	90-100	40-60	120-140	11
9	8	б)	ТГ	180-210	230-250	150-260	12
10	9	б)	ТГ	390-420	140-150	190-260	14

2. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В СВЕРХПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ (ПОПЕРЕЧНАЯ НЕСИММЕТРИЯ)

Расчет токов КЗ при несимметричных повреждениях может быть выполнен, решив систему уравнений, составленных для всех контуров сети. Однако технически это сложно сделать из-за большого количества уравнений и необходимости знать взаимные индуктивности у элементов энергосистемы. Более предпочтительным является преобразование исходной трехфазной цепи в три однофазные, для которых отдельно производятся расчеты токов, а полный ток получают путем геометрического суммирования токов однофазных цепей. Наиболее часто для расчета несимметричных КЗ используется метод симметричных составляющих (МСС).

В данном разделе рассмотрены методы расчета токов КЗ при однократном несимметричном КЗ, т.е. при однократной поперечной несимметрии. При этом предполагается, что электрическая сеть является симметричной, а несимметрия возникает только вследствие КЗ.

2.1. Метод симметричных составляющих

2.1.1 Основные понятия метода симметричных составляющих

Основная физическая сущность метода симметричных составляющих заключается в том, что, составляющие разных последовательностей между собой не взаимодействуют, что позволяет изображать схемы замещения отдельно для каждой последовательности. Источники ЭДС ($\dot{E}_\Sigma$) являются источниками ЭДС прямой последовательности. ЭДС источников обратной и нулевой последовательностей равны нулю.

Несимметричную трехфазную систему произвольных векторов $\dot{F}_j$ ($j = A, B, C$) можно разложить на три симметричных системы векторов прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей (рис.2.1):

$$\dot{F}_A = \dot{F}_{1A} + \dot{F}_{2A} + \dot{F}_{0A} ; \dot{F}_B = \dot{F}_{1B} + \dot{F}_{2B} + \dot{F}_{0B} ; \dot{F}_C = \dot{F}_{1C} + \dot{F}_{2C} + \dot{F}_{0C} . \quad (2.1)$$

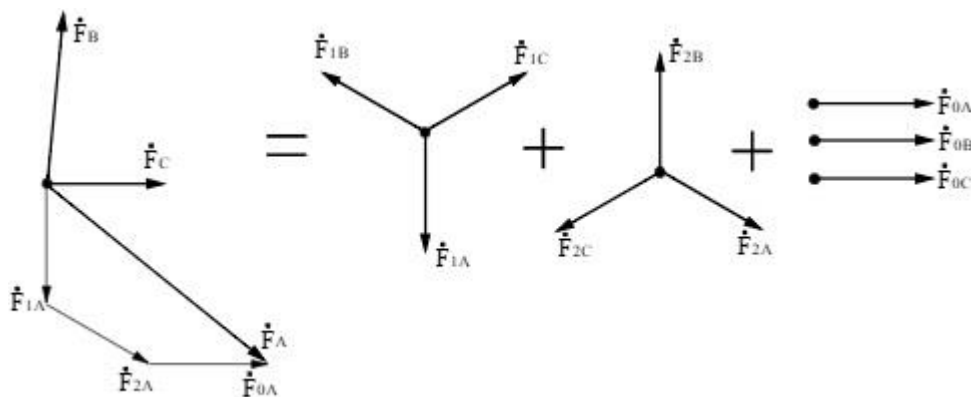


Рис. 2.1. Разложение несимметричной системы векторов на три симметричные

Симметричные составляющие в электрической сети появляются в результате разложения несимметричной системы векторов.

Для удобства теоретических выводов вводится специальный оператор фазы (фазный множитель)

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Таким образом, оператор фазы является вектором, модуль которого равен 1, а аргумент 120° . При умножении произвольного вектора на оператор фазы,

происходит поворот исходного вектора на 120° в положительном направлении без изменения его длины.

Основные свойства оператора фазы:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}, \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1,$$

$$a^2 + a + 1 = 0, \quad a^2 - a = -j\sqrt{3}.$$

Введение оператора фазы позволяет выразить два вектора каждой симметричной системы (2.1) через третий вектор той же системы, например, через вектор $\dot{F}_{iA}$ ($i = 1, 2, 0$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_A &= \dot{F}_{1A} + \dot{F}_{2A} + \dot{F}_0 \\ \dot{F}_B &= a^2 \dot{F}_{1A} + a \dot{F}_{2B} + \dot{F}_0 \\ \dot{F}_C &= a \dot{F}_{1A} + a^2 \dot{F}_{2B} + \dot{F}_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

при этом $\dot{F}_0 = \dot{F}_{0A} = \dot{F}_{0B} = \dot{F}_{0C}$.

Решение системы уравнений (2.2) дает формулы для определения симметричных составляющих

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{1A} &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a \dot{F}_B + a^2 \dot{F}_C) \\ \dot{F}_{2A} &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + a^2 \dot{F}_B + a \dot{F}_C) \\ \dot{F}_0 &= \frac{1}{3}(\dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C) \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

Системы уравнений (2.2) и (2.3) однозначно устанавливают связь между фазными величинами и их симметричными составляющими и являются основными уравнениями МСС. Приведенные выражения справедливы для всех электрических векторов, например, токов, напряжений, ЭДС и т.п.

Степень несимметрии системы векторов характеризуется коэффициентом несимметрии $b_2 = F_2/F_1$, а степень неуравновешенности - коэффициентом неуравновешенности $b_0 = F_0/F_1$. В нормальном симметричном режиме и при трехфазном КЗ $b_2 = 0$ и $b_0 = 0$.

При замыкании на землю в токах и напряжениях содержатся составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, при междуфазных замыканиях только прямой и обратной.

2.1.2 Схемы замещения отдельных последовательностей

Так как разноименные последовательности не взаимодействуют между собой это позволяет составлять отдельно схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Ниже приведены рекомендации по составлению схем замещения отдельных последовательностей.

Схема замещения прямой последовательности (СЗПП). Эта схема имеет такую же структуру и параметры элементов, как и схема замещения при трехфазном КЗ, отличается от нее только тем, что в место повреждения включен источник напряжения прямой последовательности $\dot{U}_{1k}$.

Схема замещения обратной последовательности (СЗОП). Схема имеет такую же структуру и параметры элементов, как и схема замещения при трехфазном КЗ, за исключением элементов с подвижными магнитосвязанными цепями (генераторы, электрические двигатели, синхронные компенсаторы); источники ЭДС генераторов закорочены (их сопротивления с течением времени неизменны), в место повреждения включен источник напряжения обратной последовательности $\dot{U}_{2k}$. Для всей схемы замещения обратной последовательности, как правило, $x_{1\beta} = x_{2\beta}$, поэтому при выполнении производственных расчетов схемы замещения обратной последовательности иногда не изображают.

Схема замещения нулевой последовательности (СЗНП) определяется путями протекания тока нулевой последовательности $\dot{I}_{0k}$. Составление схемы рекомендуется начинать с точки КЗ, в которую включается источник напряжения нулевой последовательности $\dot{U}_{0k}$. Условием для протекания тока нулевой последовательности является наличие элементов с заземленными нейтралями электрически связанных с точкой КЗ.

Схемам замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей соответствуют первое, второе и третье уравнение системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_\Sigma - \dot{I}_1 Z_{1\Sigma} \\ \dot{U}_2 &= -\dot{I}_2 Z_{2\Sigma} \\ \dot{U}_0 &= -\dot{I}_0 Z_{0\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ - напряжения и токи, прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно, $Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ - суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, $\dot{E}_\Sigma$ - суммарная (эквивалентная) ЭДС (за положительное направление тока принимается направление к месту повреждения). Система уравнений (2.4) записана для установившегося синусоидального режима, однако в операторной форме справедлива и для переходного режима.

2.2. Сопротивления машин и аппаратов токам обратной и нулевой последовательностей

Все сопротивления, которыми характеризовались элементы схемы замещения при трехфазных КЗ (а также в нормальном режиме), являются сопротивлениями для токов прямой последовательности, так как ток трехфазного КЗ является только током прямой последовательности.

Для элементов с неподвижными магнитно связанными цепями (системы, (авто) трансформаторы, реакторы, воздушные линии, кабели) сопротивления прямой и обратной последовательностей равны между собой, так как не зависят от порядка следования фаз.

Для элементов с подвижными друг относительно друга магнитосвязанными цепями (синхронные и асинхронные машины) сопротивления прямой и обратной последовательностей, в общем случае, различны.

У синхронных машин магнитный поток, созданный токами обратной последовательности, вращается в обратную по отношению к ротору сторону, т.е. вращается относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Поэтому в обмотке возбуждения и демпферных контурах наводятся токи двойной частоты. Поток статора вытесняется из ротора, поэтому сопротивление обмотки статора определяется, в основном, потоками рассеяния статора.

Сопротивление синхронной машины с демпферными контурами турбогенератора токам обратной последовательности, без учета высших гармонических, с достаточной для практики точностью определяется как средняя величина между сопротивлениями по продольной и поперечной осям $x_2 = (x''_d + x''_q)/2$, без демпферных обмоток - $x_2 = \sqrt{x'_d x'_q}$. Приближенно можно считать: для машин с демпферными контурами $x_2 = 1,22x''_d$, для машин без демпферных контуров $x_2 = 1,45x''_d$. В практических расчетах обычно приближенно считают $x_2 \approx x''_d$. Это не приводит к большим погрешностям, так как в комплексную схему замещения, кроме сопротивлений обратной последовательности входят сопротивления прямой последовательности, а если

повреждение происходит не на выводах генераторов, то и внешние по отношению к генератору сопротивления.

В асинхронных двигателях протекают процессы подобные процессам в синхронных машинах с демпферными обмотками. Сопротивление обратной последовательности (ротор симметричный) $x_2 = x'' \approx 0,2$.

Для обобщенной нагрузки сопротивление обратной последовательности также равно сопротивлению прямой последовательности $x_{2нагр} = x_{1нагр} = 0,35$. Необходимо отметить, что сопротивления обратной последовательности электрических машин и обобщенной нагрузки в течение переходного процесса постоянны и равны начальному значению.

Генераторы и электрические двигатели обычно работают с незаземленными нейтралью и поэтому не входят в схему замещения нулевой последовательности.

В отличие от генератора, система имеет заземлённые нейтраль, поэтому всегда входит в схему замещения нулевой последовательности. Сопротивление системы токам нулевой последовательности всегда превышает сопротивление системы токам прямой последовательности (трёхфазного КЗ) и задаётся в исходных данных.

Схема замещения и сопротивление нулевой последовательности x_0 (авто) трансформатора зависят от схемы соединения обмоток и конструкции его магнитопровода. Прежде всего, необходимо отметить, $x_0 \rightarrow \infty$ со стороны обмотки (авто) трансформатора, соединённой в треугольник или звезду без заземлённой нейтраль, так как приложенное напряжение нулевой последовательности не может вызвать ток в обмотке трансформатора независимо от схемы соединения остальных обмоток. Следовательно, (авто) трансформатор может включаться в схему замещения нулевой последовательности при наличии электрической связи обмотки, соединённой в звезду с заземлённой нейтралью. Схемы соединения обмоток трансформаторов и их схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов приведены на рис.2.2.

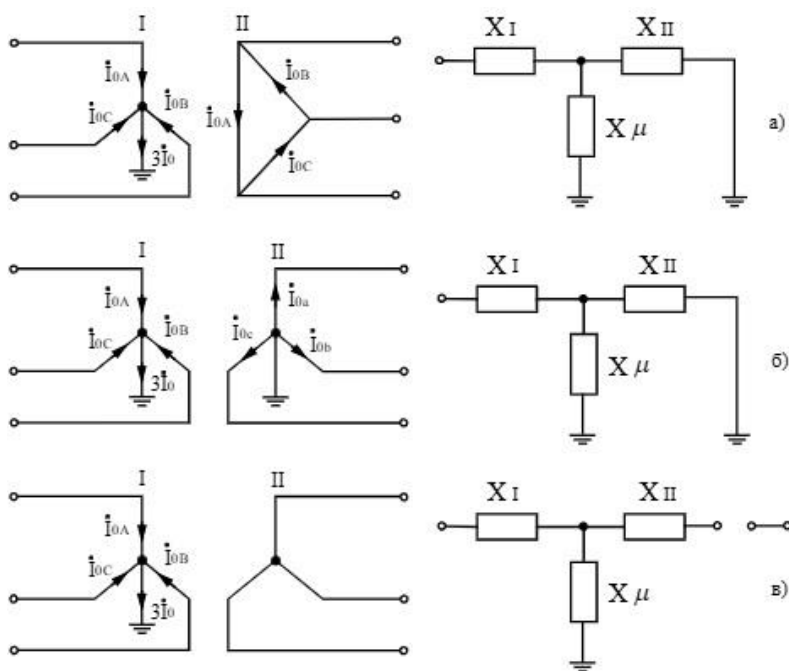


Рис. 2.2. Схемы замещения трансформаторов для токов нулевой последовательности

При соединении обмоток трансформатора по схеме $\star / \star$ (рис.2.2,а) ток нулевой последовательности протекает по обмотке, соединённую в звезду, трансформируется в обмотку, соединённую в треугольник, и там циркулирует, не попадая в дальнейшую часть схемы. На схеме замещения это отражается закорачиванием обмотки, соединённой в треугольник, на землю. Вся сеть, включенная за треугольником, не входит в схему замещения, независимо от того имеются ли там обмотки с заземлёнными нейтралями.

При соединении обмоток $\star / \star$ схема замещения обеспечивает проведение тока нулевой последовательности, если в схеме имеются элементы с заземлённой нейтралью (рис. 2.2,б). Если последнее условие не выполняется, то его схема замещения такая же, как и при соединении обмоток $\star / \star$ (рис. 2.2,в).

На основе приведенных схем замещения двухобмоточных трансформаторов составляются схемы замещения трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов. Необходимо при этом отметить, что у автотрансформаторов нейтраль всегда заземлена, а у части трансформаторов напряжением 110 кВ она может незаземляться (для снижения токов однофазного КЗ).

Если в нейтраль трансформатора включено сопротивление (реактор) для ограничения токов однофазного КЗ, то через него протекает ток $3I_0$. В схеме замещения нулевой последовательности это учитывается увеличением втрое сопротивления в нейтрали трансформатора.

Величина сопротивления ветви намагничивания (x_μ) зависит от конструкции магнитопроводов трансформаторов. Для трансформаторной группы, составленной из однофазных трансформаторов, а также для четырёхстержневых и броневого трансформаторов имеется путь для магнитного потока с малым магнитным сопротивлением, а так как для любого устройства и физической среды $\varepsilon\mu = const$, поэтому электрическое сопротивление $x_\mu \rightarrow \infty$. У трёхстержневого трансформатора путь для замыкания магнитного потока проходит через масло трансформатора, кожух трансформатора, изоляцию. В этом случае магнитное сопротивление для потока оказывается большим, а электрическое сопротивление ветви намагничивания составляет порядка $x_{*\mu} \approx 0,3 \div 1,0$.

Для приведенных выше схем трансформаторов сопротивления имеют следующие значения:

- для всех типов и конструкций при соединении обмоток по схеме $\star / \star$

$$x_0 = x_1 = x_I + x_{II},$$

- для трёхфазных групп из однофазных трансформаторов, броневого и четырёхстержневых:

при соединении обмоток $\star / \star$ $x_0 \rightarrow \infty$,

при соединении обмоток $\star / \star$ $x_0 = x_1 = x_I + x_{II}$;

- для трёхфазных трёхстержневых трансформаторов

при соединении обмоток $\star / \star$ $x_0 = x_1 + x_\mu$,

при соединении обмоток $\star / \star$ следует использовать полную схему замещения с учётом x_μ .

Сопротивление реактора главным образом определяется собственной индуктивностью каждой фазы (взаимоиндукция между фазами относительно мала), поэтому $x_0 = x_2 = x_1$.

2.3. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последовательности

Одноцепная линия. Сопротивление нулевой последовательности трехфазной воздушной линии складывается из собственного сопротивления фазы $x_{\text{пог.с}}$ и двух взаимных сопротивлений (остальных фаз) $x_{\text{пог.вз1}}$ и $x_{\text{пог.вз2}}$

$$x_{\text{пог.л}} = x_{\text{пог.с}} + x_{\text{пог.вз1}} + x_{\text{пог.вз2}}.$$

Векторы токов (напряжений и потоков) нулевой последовательности всех фаз совпадают по направлению. Приближенно считая, что проводники трехфазной линии расположены в вершинах равностороннего треугольника или выполнен полный цикл транспозиции проводов, запишем

$$\begin{aligned} x_{\text{пог.л}} &= x_{\text{пог.с}} + 2x_{\text{пог.вз}} = \\ &= 0,145lg \frac{D_3}{r_3} + 2 \cdot 0,145lg \frac{D_3}{D_{cp}} = 0,435 \frac{D_3}{\sqrt[3]{r_3 D_{cp}^2}}, \end{aligned}$$

Вместо r_3 следует подставлять:

$$r_{cp} = \sqrt[3]{r_3 D_{cp}^2} - \text{средний геометрический радиус системы трех проводов.}$$

С физической точки зрения между сопротивлениями прямой x_1 и нулевой x_0 последовательностей линии имеется глубокое различие. Для токов нулевой последовательности потоки взаимоиндукции увеличивают поток линии и пропорциональное ему сопротивление; для токов прямой (обратной) последовательности потоки взаимоиндукции оказывают размагничивающее действие, что приводит к уменьшению сопротивления. Таким образом, x_0 линии всегда оказывается большим $x_1(x_2)$.

Двухцепная линия. Для двухцепной воздушной линии x_0 каждой цепи дополнительно увеличивается вследствие взаимоиндукции от проводов второй параллельной линии (КЗ предполагается за пределами линии или на одном из ее концов).

Так как векторы токов (и потоков) нулевой последовательности обеих цепей совпадают по направлению, то сопротивление линии определяется по формуле

$$x_{\text{пог.л}} = x_{\text{пог.с}} + 2x_{\text{пог.вз}} + 3x'_{\text{пог.вз}},$$

где $x'_{\text{пог.вз}}$ - сопротивление, обусловленное потоками от проводов соседней линии.

Очевидно, что

$$x'_{\text{пог.вз}} = 0,145lg \frac{D_3}{D'_{cp}},$$

где $D'_{cp} = \sqrt[9]{d_{AA'}d_{AB'}d_{AC'}d_{BA'}d_{BB'}d_{BC'}d_{CA'}d_{CB'}d_{CC'}}$ - среднее геометрическое расстояние между параллельными цепями. Тогда, предполагая, что линии идентичны, получим

$$x_{\text{пог.л}} = 0,145lg \frac{D_3}{r_3} + 2 \cdot 0,145lg \frac{D_3}{D_{cp}} + 3 \cdot 0,145lg \frac{D_3}{D'_{cp}} = 0,872lg \frac{D_3}{\sqrt[6]{r_3 D_{cp}^2 (D'_{cp})^3}}.$$

Таким образом, наличие второй цепи приводит к увеличению сопротивления линии токам нулевой последовательности. Если линии находятся друг от друга на расстоянии более 400-500 м, то их взаимным влиянием можно пренебречь.

Если КЗ на землю происходит на одной из линий (рис.2.3,а, где α - доля длины линии до места КЗ), то следует воспользоваться схемой замещения, приведенной на рис.2.3,б. Здесь x_{I-II0} - сопротивление взаимоиндукции, x_0 - сопротивление нулевой последовательности для одной трехфазной линии без учета второй, $x_\sigma = x_0 - x_{I-II0}$.

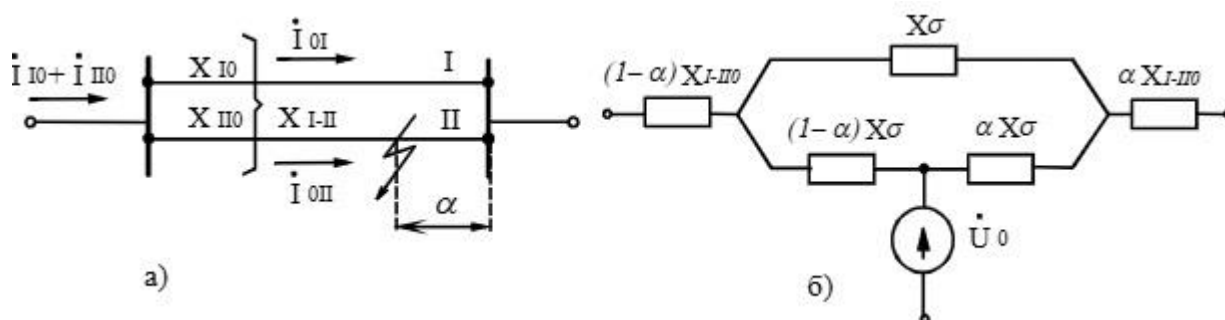


Рис. 2.3. Схема замещения двухцепной линии

Рассмотрим влияние грозозащитных тросов, предназначенных для защиты от попаданий молнии, на сопротивление нулевой последовательности линии. Тросы подвешиваются на опорах линии на изоляторах и разрезаются на ряд участков. С одного конца участка тросы заземляют, а с другого – оставляют искровой промежуток, который пробивается при перенапряжениях. При этом тросы не оказывают влияния на сопротивление нулевой последовательности линии.

Однако в электрических сетях находятся в эксплуатации и линии старой конструкции, в которых тросы заземлялись на каждой опоре вместе с мачтой. При этом ток нулевой последовательности возвращается к месту повреждения по земле и грозозащитному тросу. Поток взаимной индукции оказывает размагничивающее действие, что приводит к уменьшению сопротивления линии. Степень размагничивания зависит от проводимости троса. Стальные тросы оказывают меньшее влияние по сравнению с алюминиевыми.

Приближенно определить сопротивление линии токам нулевой последовательности можно, используя следующие данные

Таблица 2.А. Коэффициенты нулевой последовательности.

№ п.п.	Конструкция линии	x_0/x_1
1	Одноцепная линия без влияния тросов	3,5
2	Одноцепная линия со стальными тросами, заземленными на каждой опоре	3,0
3	Двухцепная линия без влияния тросов	5,5
4	Двухцепная линия со стальными тросами, заземленными на каждой опоре	4,7

Кабельная линия. Так как кабели прокладываются на небольшой глубине (обычно около 1 м) подземную цепь провод-земля можно рассматривать как воздушную однопроводную линию. Следовательно, если бы трехжильный кабель не обладал проводящей оболочкой, то его сопротивление нулевой последовательности можно было бы определить так же, как и трехфазной воздушной линии, подставив в приведенные выше формулы средний геометрический радиус его жил.

Оболочка кабеля заземляется по его концам и на муфтах, образуя для токов нулевой последовательности путь параллельный земле. В этом отношении заземленная оболочка кабеля аналогична заземленному тросу воздушной линии. При замыкании токоведущей жилы на оболочку часть тока нулевой последовательности возвращается по оболочке, другая – по земле. Распределение токов между оболочкой и землей

зависит от сопротивления оболочки и сопротивления ее заземления. Так как оболочка кабеля охватывает все его жилы, то магнитный поток от тока оболочки полностью сцеплен с жилами, т.е. не обладает потоками рассеяния. Следовательно, если пренебречь активным сопротивлением оболочки, то независимо от сопротивлений ее заземления токи нулевой последовательности будут возвращаться только по оболочке. Поэтому реактивная составляющая сопротивления нулевой последовательности $x_0 = (3,5 - 4,5) x_1$ (при отсутствии данных можно приближенно принять $x_1 = 0,07$ Ом/км). Истинные значения параметров нулевой последовательности кабелей можно получить только с помощью экспериментальных испытаний.

Пример 2.1. Для схемы, приведенной на рис.2.4. построить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

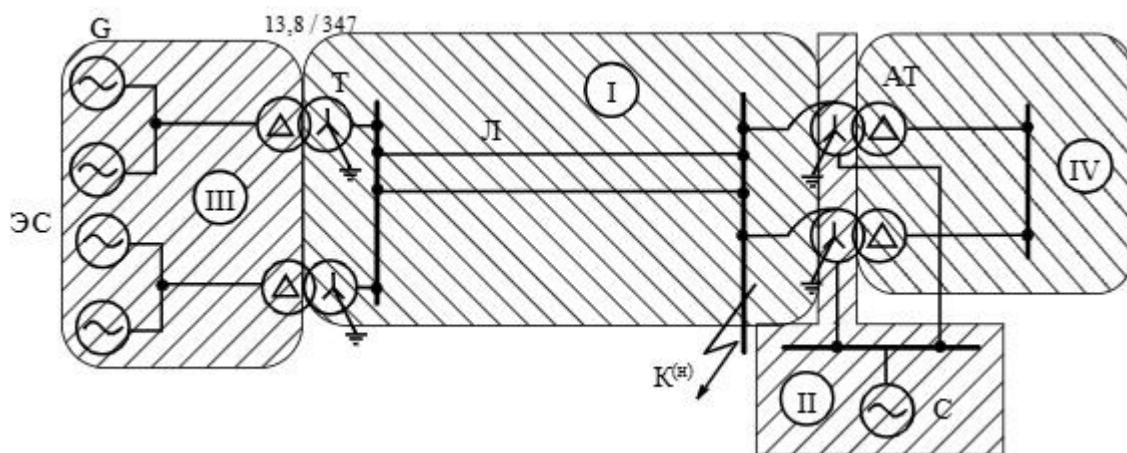


Рис.2.4. Схема к примеру 2.1.

Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей приведены на рис.2.5 (а – прямой, б – обратной, в – нулевой последовательности соответственно). Сопротивления элементов схемы замещения прямой последовательности такие же, как и в схеме замещения для трехфазного КЗ. В схеме замещения обратной последовательности величина сопротивления генератора в общем случае отличается от сопротивления прямой последовательности (поэтому использован другой порядковый номер).

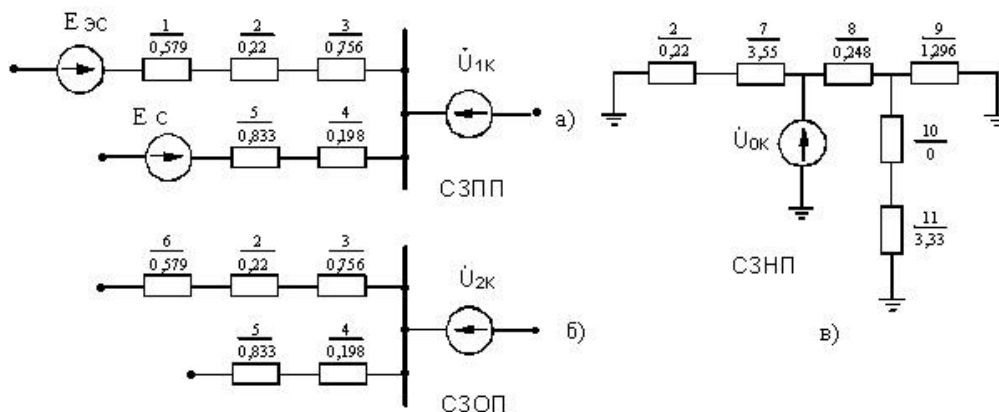


Рис. 2.5. Схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей

В схему замещения нулевой последовательности генератор не входит, так как присоединен к обмоткам трансформатора, соединенные в треугольник, а сопротивления линии и системы отличаются от сопротивлений прямой (обратной) последовательностей.

2.4. Определение токов при несимметричных коротких замыканиях

В дальнейшем будем считать, что повреждение происходит на отпайке, что позволяет исключить из рассмотрения токи нагрузки.

Фазу А будем считать "особой фазой", т.е. процессы в ней будут отличаться от процессов в двух других фазах (В и С). Так однофазное КЗ будет рассматриваться в фазе А, а двухфазное КЗ и двухфазное КЗ на землю – в фазах В и С. Переходное сопротивление в месте КЗ, если это специально не оговаривается будем считать равным нулю, т.е. будем рассматривать металлическое КЗ. На основании законов Кирхгофа имеем 3 уравнения (2.4), в которых 6 неизвестных. Недостающие 3 уравнения будем брать исходя из граничных условий (соотношений для фазных токов и напряжений).

2.4.1. Двухфазное короткое замыкание. Рассмотрим двухфазное КЗ между фазами В и С (рис.2.6).

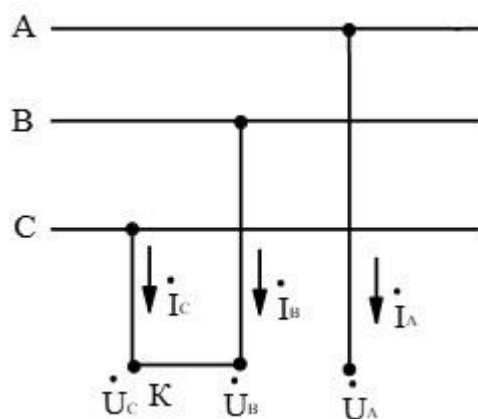


Рис. 2.6. Двухфазное короткое замыкание.

Граничные условия при двухфазном КЗ:

$$\dot{I}_A = 0, \dot{I}_B = -\dot{I}_C, \dot{U}_B = \dot{U}_C.$$

Подставив граничные условия для токов в систему уравнений (2.4), получим

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{a\dot{I}_B - a^2\dot{I}_B}{3}, \dot{I}_{kA2} = \frac{a^2\dot{I}_B - a\dot{I}_B}{3}, \dot{I}_{kA0} = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_B}{3} = 0.$$

Из первых двух соотношений $\dot{I}_{kA1} = -\dot{I}_{kA2}$. Из последнего выражения, следует, что и $\dot{U}_{kA0} = 0$, т.е. при К⁽²⁾ нулевая последовательность отсутствует.

Подставив граничные условия для напряжений в систему уравнений (2.3), получим

$$\frac{a^2\dot{U}_{kA1} + a\dot{U}_{kA2}}{3} = \frac{a\dot{U}_{kA1} + a^2\dot{U}_{kA2}}{3},$$

$$\text{следовательно, } \dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2}.$$

Таким образом, в месте двухфазного КЗ связь между симметричными составляющими устанавливается следующими соотношениями

$$\dot{I}_{kA1} = -\dot{I}_{kA2}, \dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2}, \dot{U}_{kA0} = 0, \dot{I}_{kA0} = 0. \quad (2.5)$$

Подставляя соотношения (2.5), в первое уравнение системы (2.4), получим

$$\dot{E}_{\Sigma A} - j\dot{I}_{kA1}x_{1\Sigma} = -j\dot{I}_{kA2}x_{2\Sigma} = j\dot{I}_{kA1}x_{2\Sigma}.$$

Откуда ток прямой последовательности

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{E_{A\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (2.6)$$

Ток КЗ поврежденной фазы, например, фазы В

$$\dot{I}_{kB} = \dot{I}_{kB1} + \dot{I}_{kB2} = a^2\dot{I}_{kA1} + a\dot{I}_{kA2} = (a^2 - a)\dot{I}_{kA1}.$$

Так как $a^2 - a = -j\sqrt{3}$, то $\dot{I}_{kB} = j\sqrt{3}\dot{I}_{kA1}$.

Модуль тока

$$I_{kB} = \frac{\sqrt{3}E_{A\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma}}.$$

Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ, построенная в соответствие с соотношениями (2.6), изображена на рис.2.7, здесь "н"- начало, "к" – конец схемы, 1, 2, 0 – соответственно схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. При двухфазном КЗ токи и напряжения нулевой последовательности отсутствуют, поэтому схема замещения нулевой последовательности в комплексную схему замещения не входит.

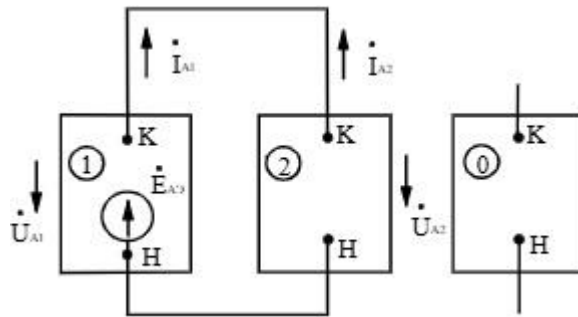


Рис. 2.7. Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.8, а и б соответственно. Диаграммы построены для индуктивной цепи, поэтому токи прямой последовательности отстают от соответствующих напряжений на 90° .

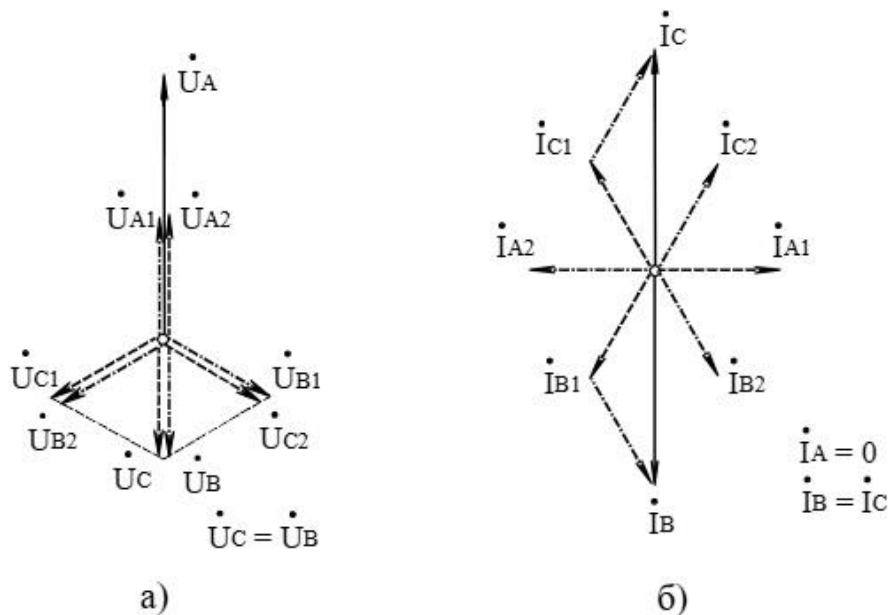


Рис. 2.8. Векторные диаграммы напряжений и токов при двухфазном КЗ

Как видно из последнего рисунка здесь выполняются граничные условия.

2.4.2. Однофазное короткое замыкание

Рассмотрим замыкание фазы А на землю (рис.2.9).

Граничные условия при однофазном замыкании

$$\dot{U}_A = 0, \dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0.$$

Подставив граничные условия для токов в систему уравнений (2.3), получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kA1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A, \\ \dot{I}_{kA2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A, \\ \dot{I}_{kA0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A, \\ \text{т.е.} \quad \dot{I}_{kA1} &= \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3}\dot{I}_A. \end{aligned} \quad (2.7)$$

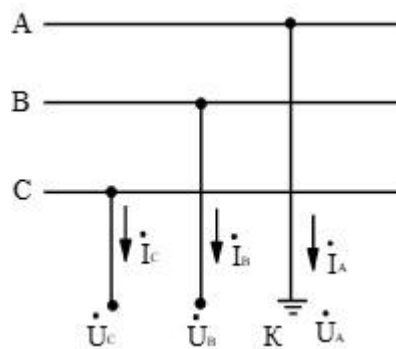


Рис 2.9. Однофазное КЗ

Из граничного условия для напряжения

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} = 0 \quad (2.8)$$

Подставляя в последнее выражение значения симметричных составляющих напряжений из системы (2.3), получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} &= E_{A\vartheta} - jx_{1\vartheta}\dot{I}_{kA1} - jx_{2\vartheta}\dot{I}_{kA2} - jx_{0\vartheta}\dot{I}_{kA0} = \\ &= E_{A\vartheta} - j(x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta})\dot{I}_{kA1} = 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A\vartheta}}{j(x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta})}.$$

Ток поврежденной фазы $\dot{I}_{kA} = \dot{I}_{kA1} + \dot{I}_{kA2} + \dot{I}_{kA0} = 3\dot{I}_{kA1} = \frac{3\dot{E}_{A\vartheta}}{j(x_{1\vartheta} + x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta})}$.

В соответствие с соотношениями (2.7) и (2.8) комплексная схема замещения при однофазном КЗ приведена на рис.2.10.

Найдем значения симметричных составляющих напряжения

$$\dot{U}_{kA1} = j\dot{I}_{kA1}(x_{2\vartheta} + x_{0\vartheta}); \dot{U}_{kA2} = -j\dot{I}_{kA2}x_{2\vartheta}; \dot{U}_{kA0} = -j\dot{I}_{kA0}x_{0\vartheta}.$$

Векторные диаграммы напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.11, а и б соответственно.

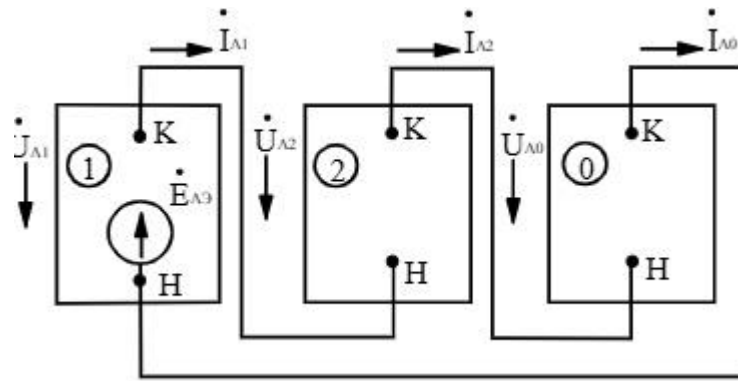


Рис. 2.10. Комплексная схема замещения при однофазном КЗ

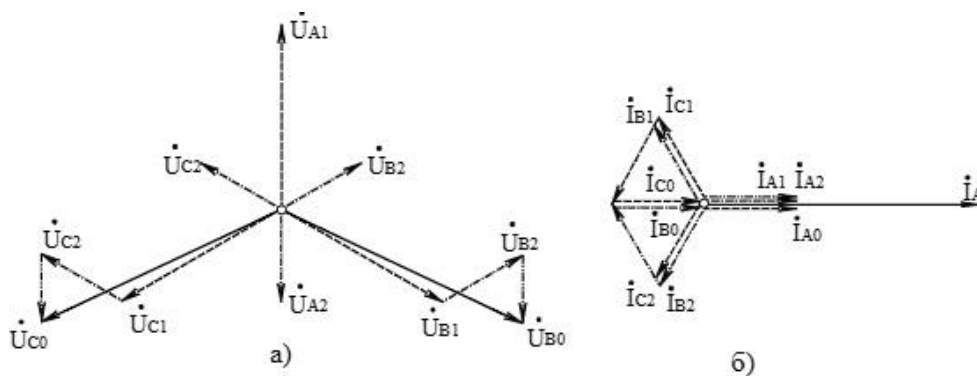


Рис. 2.11. Векторная диаграмма напряжений и токов при однофазном КЗ

2.4.3. Двухфазное короткое замыкание на землю

Рассмотрим двухфазное КЗ на землю между фазами В и С (рис.2.12). Граничные условия при этом:

$$I_A = 0, U_B = 0, U_C = 0.$$

Сопоставляя граничные условия при однофазном КЗ и двухфазном КЗ на землю можно установить, что условия для напряжений и токов меняются местами,

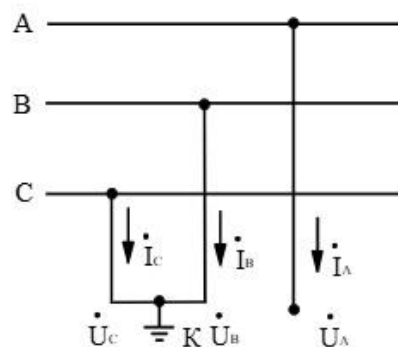


Рис. 2.12. Двухфазное КЗ на землю

поэтому следует ожидать таким же образом изменятся соотношения между симметричными составляющими.

Подставив граничные условия для напряжений в систему уравнений (2.3), получим

$$\begin{aligned}\dot{U}_{kA1} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A, \\ \dot{U}_{kA2} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A, \\ \dot{U}_{kA0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}\dot{U}_A,\end{aligned}$$

т.е.

$$\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2} = \dot{U}_{kA0} = \frac{1}{3}\dot{U}_A \quad (2.9)$$

Из граничного условия для тока

$$\dot{I}_{kA1} + \dot{I}_{kA2} + \dot{I}_{kA0} = 0. \quad (2.10)$$

Подставляя в последнее выражение значения симметричных составляющих токов из системы (2.2), получим

$$\frac{\dot{E}_{A3}}{jx_{13}} - \frac{\dot{U}_{kA1}}{jx_{13}} - \frac{\dot{U}_{kA2}}{jx_{23}} - \frac{\dot{U}_{kA0}}{jx_{03}} = 0,$$

или

$$\frac{\dot{E}_{A3}}{jx_{13}} - \dot{U}_{kA1} \left(\frac{1}{jx_{13}} + \frac{1}{jx_{23}} + \frac{1}{jx_{03}} \right) = 0.$$

Из последнего выражения

$$\dot{U}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A3}}{jx_{13} \left(\frac{1}{jx_{13}} + \frac{1}{jx_{23}} + \frac{1}{jx_{03}} \right)} = \frac{\dot{E}_{A3}(x_{23} // x_{03})}{(x_{13} + x_{23} + x_{03})},$$

откуда

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{\dot{E}_{A3}}{(x_{13} + x_{23} // x_{03})},$$

где // - означает параллельное соединение (включение) элементов.

В соответствие с соотношениями (2.9) и (2.10) комплексная схема замещения при двухфазном КЗ на землю приведена на рис.2.13.

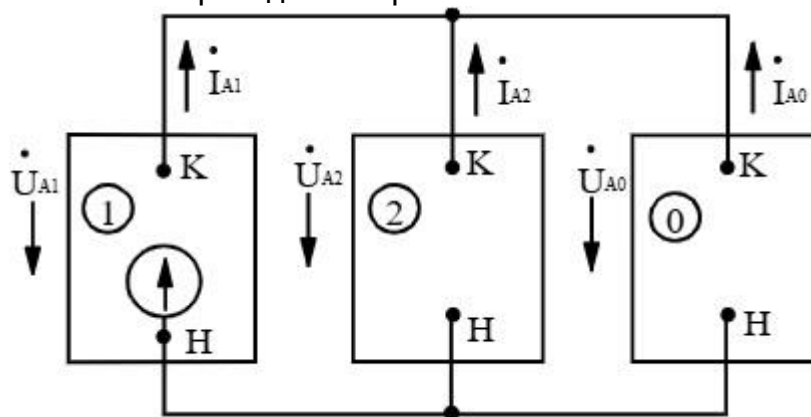


Рис. 2.13. Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ на землю

Из комплексной схемы замещения

$$\dot{I}_{kA2} = -\dot{I}_{kA1} \frac{x_{03}}{x_{23} + x_{03}}, \quad \dot{I}_{kA0} = -\dot{I}_{kA1} \frac{x_{23}}{x_{23} + x_{03}},$$

Ток одной из поврежденных фаз, например, В

$$\begin{aligned} i_{kB} &= a^2 i_{kA1} + a i_{kA2} + i_{kA0} = i_{kA1} \left(a^2 - \frac{x_{2\Omega} + a \cdot x_{0\Omega}}{x_{2\Omega} + x_{0\Omega}} \right) = \\ &= i_{kA1} \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Omega} \cdot x_{0\Omega}}{(x_{2\Omega} + x_{0\Omega})^2}}. \end{aligned}$$

Найдем значения симметричных составляющих напряжения

$$\begin{aligned} \dot{U}_{kA1} &= j i_{kA1} \frac{x_{2\Omega} \cdot x_{0\Omega}}{x_{2\Omega} + x_{0\Omega}}; \\ \dot{U}_{kA2} &= -j i_{kA2} x_{2\Omega}; \quad \dot{U}_{kA0} = -j i_{kA0} x_{0\Omega}. \end{aligned}$$

Векторные диаграммы для напряжений и токов в месте повреждения приведены на рис.2.14,а и б соответственно.

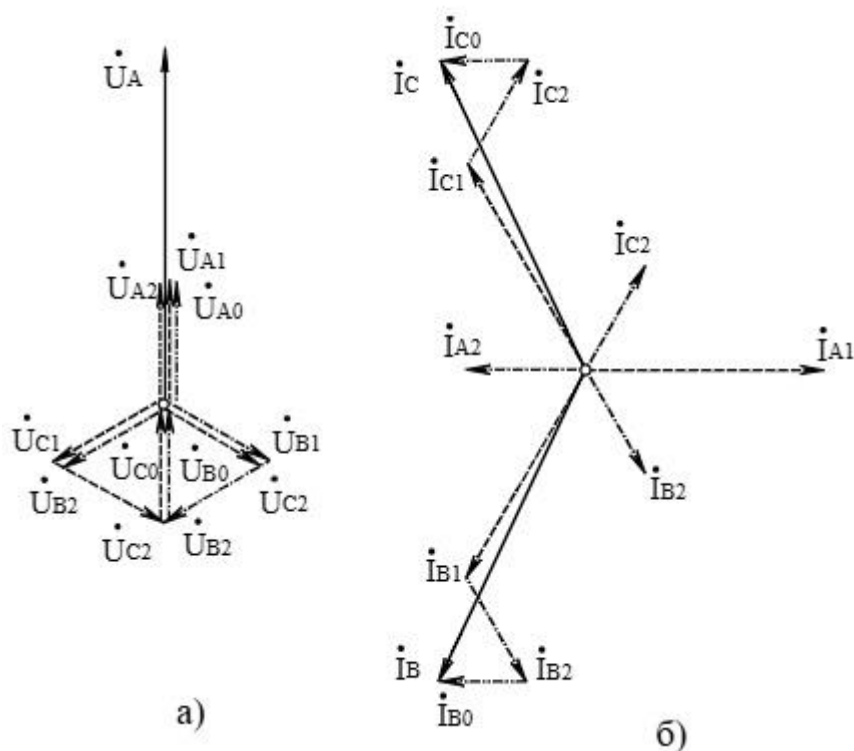


Рис. 2.14. Векторные диаграммы токов и напряжений при двухфазном КЗ на землю

2.4.4. Правило эквивалентности прямой последовательности

Установленные п.п. 2.4.1-2.4.3 выражения для токов при несимметричных повреждениях показывают, что их величины пропорциональны току прямой последовательности, следовательно, абсолютную величину тока КЗ можно найти из общего выражения

$$I_k^{(n)} = m^{(n)} I_{1k}^{(n)},$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент пропорциональности, зависящий от вида КЗ, величина которого приведена в таблице 2.1, $I_{1k}^{(n)}$ - ток прямой последовательности для рассматриваемого вида КЗ.

Табл.2.1. Коэффициент пропорциональности

Вид КЗ	$k^{(2)}$	$k^{(1)}$	$k^{(1,1)}$	$k^{(3)}$
$m^{(n)}$	$\sqrt{3}$	3	$\sqrt{3} / \sqrt{1 - \frac{x_{2\Delta} \cdot x_{0\Delta}}{(x_{2\Delta} + x_{0\Delta})^2}}$	1
$x_{\Delta}^{(n)}$	$x_{2\Delta}$	$x_{2\Delta} + x_{0\Delta}$	$\frac{x_{2\Delta} \cdot x_{0\Delta}}{x_{2\Delta} + x_{0\Delta}}$	0

Для расчета трехфазных КЗ МСС не используется, однако значения $m^{(n)}$ и $x_{\Delta}^{(n)}$ приведены для полноты понимания МСС.

Структура полученных выражений для тока прямой последовательности в общем случае имеет вид:

$$I_{1k}^{(n)} = \frac{E_{\Delta}}{x_{1\Delta} + x_{\Delta}^{(n)}},$$

где $x_{\Delta}^{(n)}$ дополнительное сопротивление, вводимое в схему замещения прямой последовательности, величина которого зависит от вида КЗ и определяется соотношениями из табл.2.1.

На основании общего выражения для тока прямой последовательности Н.Н. Щедриным было сформулировано следующее правило эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности при любом несимметричном КЗ может быть определен как ток трехфазного КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ за дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$, которое не зависит от параметров схемы замещения прямой последовательности (рис.2.15).

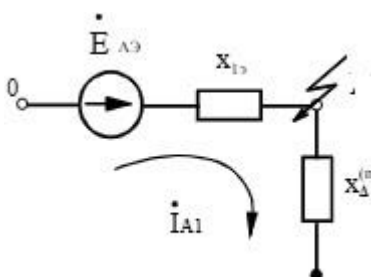


Рис. 2.15. Схема для определения тока прямой последовательности при несимметричном КЗ.

Такая трактовка тока прямой последовательности при несимметричных КЗ предполагает учет только основной гармоники тока КЗ.

Таким образом, вычисление токов при несимметричных КЗ производится в следующей последовательности:

- составляются схемы замещения: при междуфазных замыканиях прямой и обратной последовательностей;
- при замыканиях на землю – прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- схемы замещения сворачиваются и находятся эквивалентные сопротивления;
- из схемы замещения прямой последовательности также находится эквивалентная ЭДС;
- определяются $x_{\Delta}^{(n)}$ и ток прямой последовательности;
- вычисляется ток КЗ.

Пример 2.2

Для схемы на рис 1.7. произвести расчет сверхпереходных токов всех видов несимметричных КЗ в точке КЗ.

Расчет выполняем в относительных единицах с точным учетом коэффициентов трансформации. Сохраняем базисную мощность $S_6 = 1000 \text{ MVA}$.

Сохраняем прежние базисные напряжения:

$$U_{62} = 150 \cdot \text{kV}$$

-здесь находится точка КЗ

$$U_{64} = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{63} = 9.968 \cdot \text{kV}$$

Определяем базисный ток 2 ступени, где точка КЗ

$$I_{62} := \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{62}} = 3.849 \cdot \text{kA}$$

Из первой задачи используем сопротивление генераторов, трансформаторов станции, воздушной линии, трансформаторов подстанции и системы.

$$X_{\#1} = 2.32$$

$$X_{\#2} = 1.387$$

$$X_{\#3} = 0.711$$

$$X_{\#4} = 0.687$$

$$X_{\#6} = 0$$

$$X_{\#7} = 0.302$$

Из первой задачи используем сверхпереходную ЭДС генераторов и сверхпереходную ЭДС системы

$$E_{\#T} = 1.214$$

$$E_{\#C} = 0.957$$

2.2.1. Схемы замещения.

Схема замещения прямой последовательности имеет вид:

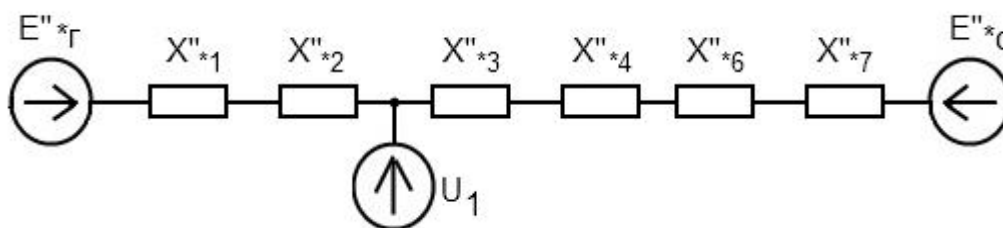


Рис.2.16. Схема замещения прямой последовательности.

Преобразуем схему замещения

$$X_{\#8} := X_{\#1} + X_{\#2} = 3.707$$

$$X_{\Sigma 0} := X_{*3} + X_{*4} + X_{*6} + X_{*7} = 1.701$$

Эквивалентное сопротивление прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} := \frac{X_{*8} \cdot X_{*9}}{X_{*8} + X_{*9}} = 1.166$$

Эквивалентная ЭДС

$$E_{*K3} := \frac{\frac{E_{*Г}}{X_{*8}} + \frac{E_{*с}}{X_{*9}}}{\frac{1}{X_{*8}} + \frac{1}{X_{*9}}} = 1.038$$

Схема замещения прямой последовательности принимает вид:

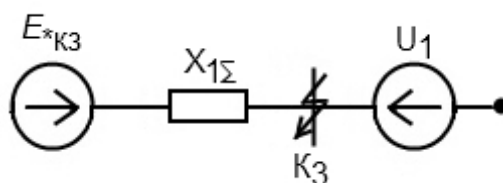


Рис.2.17. Свернутая схема замещения прямой последовательности.

В схеме замещения обратной последовательности только генератор имеет сопротивление обратной последовательности немного больше сопротивления прямой последовательности. Этим можно пренебречь, тогда свернутая схема замещения обратной последовательности имеет вид:

$$X_{2\Sigma} := X_{1\Sigma} = 1.166$$

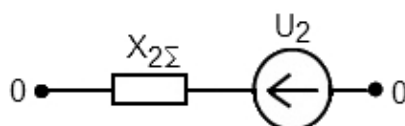


Рис.2.18. Свернутая схема замещения обратной последовательности.

Схема замещения нулевой последовательности составляется с учетом режимов работы нейтралей трансформаторов.

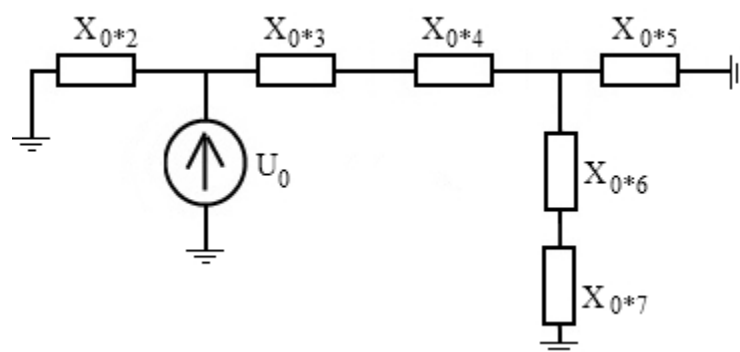


Рис.2.19.Схема замещения нулевой последовательности.

Так как у половины трансформаторов нейтраль отключена, то

$$X_{0*2} := X_{*2} = 1.387$$

Остальные сопротивления нулевой последовательности согласно теории и заданию равны соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

$$X_{0*3} := X_{*3} = 0.711$$

$$X_{0*4} := X_{*4} = 0.687$$

$$X_{0*5} := X_{*5} = 0.813$$

$$X_{0*6} := X_{*6} = 0$$

$$X_{0*7} := X_{*7} = 0.302$$

Преобразуем схему замещения к одному сопротивлению

$$X_{0*8} := \frac{X_{0*5} \cdot (X_{0*6} + X_{0*7})}{X_{0*5} + (X_{0*6} + X_{0*7})} + X_{0*3} + X_{0*4} = 1.619$$

Эквивалентное сопротивление нулевой последовательности

$$X_{0\Sigma} := \frac{X_{0*2} \cdot X_{0*8}}{X_{0*2} + X_{0*8}} = 0.747$$

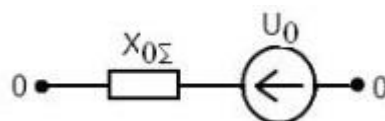


Рис.2.20. Свернутая схема замещения нулевой последовательности.

2.2.2. Расчет двухфазного и однофазного коротких замыканий

Составляем комплексную схему замещения

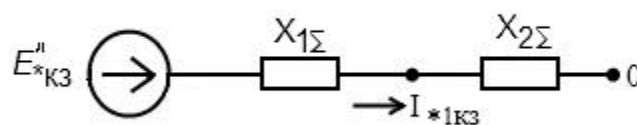


Рис.2.21. Комплексная схема замещения при 2-х фазном коротком замыкании.

Ток двухфазного короткого замыкания

$$I_{2\phi K3} := \frac{\sqrt{3} \cdot E''_{*K3}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}} \cdot I_{\phi 2} = 2.966 \cdot \text{kA}$$

Составляем комплексную схему замещения.

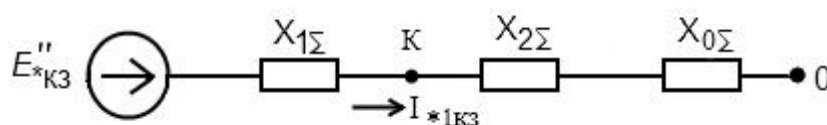


Рис.2.22. Комплексная схема замещения при однофазном

коротком замыкании.

Ток однофазного короткого замыкания

$$I_{1\phi\text{КЗ}} := \frac{3 \cdot E''_{\text{КЗ}}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \cdot I_{\phi 2} = 3.891 \cdot \text{kA}$$

2.2.3. Расчет двухфазного короткого замыкания на землю

Составляем комплексную схему замещения

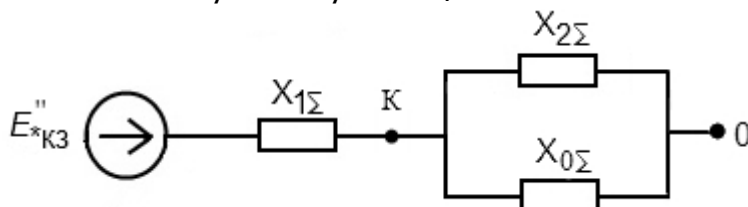


Рис.2.23. Комплексная схема замещения при 2-х фазном коротком замыкании на землю.

Ток двухфазного КЗ на землю

$$I_{11\phi\text{КЗ}} := \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \cdot \frac{E''_{\text{КЗ}}}{X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}} \cdot I_{\phi 2} = 3.724 \cdot \text{kA}$$

2.4.5. Учет активных сопротивлений в месте КЗ

Рассмотрим методы учета переходных сопротивлений в месте повреждения на двух примерах.

Двухфазное КЗ при замыкании через переходное сопротивление (рис.2.24,а).

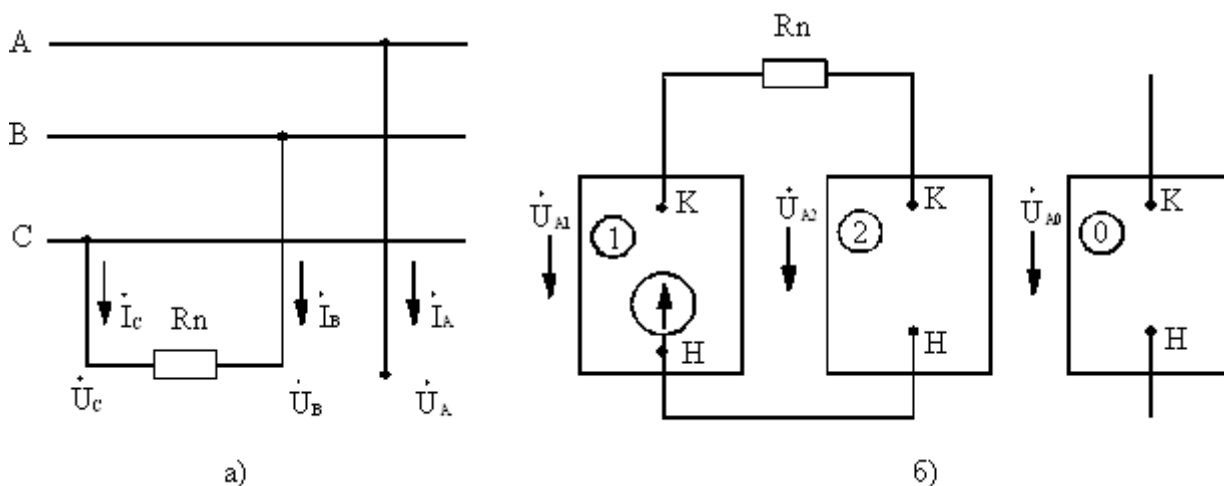


Рис. 2.24. Двухфазное КЗ через переходное сопротивление (а) и комплексная схема замещения (б)

Граничные условия: $I_A = 0$, $I_B = -I_C$, $U_B - U_C = I_B R_n$.

Найдем симметричные составляющие для особой фазы А, используя систему уравнений (2.3)

$$I_{kA1} = \frac{1}{3} (I_A + a I_B + a^2 I_C) = \frac{1}{3} (a - a^2) I_B,$$

$$i_{kA2} = \frac{1}{3}(i_A + a^2 i_B + a i_C) = \frac{1}{3}(a^2 - a) i_B,$$

$$i_{kA0} = \frac{1}{3}(i_A + i_B + i_C) = 0,$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B - \dot{U}_C &= a^2 \dot{U}_{kA1} + a \dot{U}_{kA2} - a \dot{U}_{kA1} - a^2 \dot{U}_{kA2} = \\ &= (a^2 - a) \dot{U}_{kA1} + (a - a^2) \dot{U}_{kA2} = (a^2 + a) \dot{U}_{kA1} R_n, \end{aligned}$$

следовательно, $\dot{U}_{kA1} = -\dot{U}_{kA2}$ и $\dot{U}_{kA1} = \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA1} R_n$.

Комплексная схема замещения приведена на рис.2.24,б.

Выражение для вычисления тока КЗ при двухфазном повреждении

$$\dot{I}_{kB} = \frac{\sqrt{3} \dot{E}_{A3}}{R_n + j(x_{13} + x_{23})}.$$

Однофазное КЗ при замыкании через переходное сопротивление (рис.2.25, а).

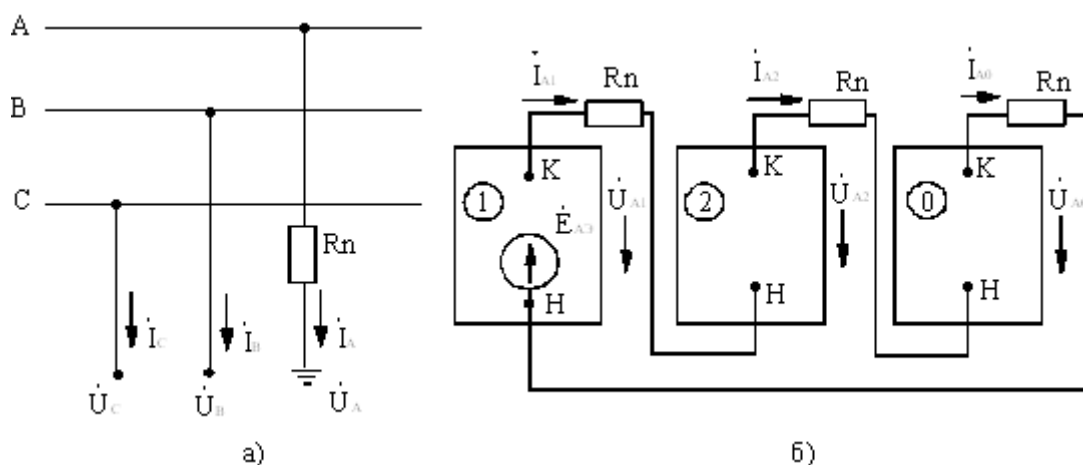


Рис. 2.25. Однофазное КЗ через переходное сопротивление (а) и комплексная схема замещения (б)

Граничные условия:

$$\dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0, \dot{U}_A = \dot{I}_A R_n.$$

Найдем симметричные составляющие для особой фазы А, используя систему уравнений (2.5)

$$\dot{I}_{kA1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a \dot{I}_B + a^2 \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\text{т.е. } \dot{I}_{kA1} = \dot{I}_{kA2} = \dot{I}_{kA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A,$$

$$\text{следовательно, } \dot{U}_A = \dot{U}_{kA1} + \dot{U}_{kA2} + \dot{U}_{kA0} = 3 \dot{I}_{kA1} R_n.$$

Комплексная схема замещения приведена на рис.2.25, б.

Выражение для вычисления тока КЗ при однофазном повреждении

$$\dot{I}_{kA} = \frac{3 \dot{E}_{A3}}{3 R_n + j(x_{13} + x_{23} + x_{03})}.$$

2.5. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей

Чтобы определить ток в любой ветви схемы при несимметричном КЗ необходимо сначала найти для этой ветви токи прямой, обратной и нулевой (при замыканиях на землю) последовательностей. Затем, пользуясь выражениями (2.2), можно определить действительные токи в фазах. Для практических расчётов часто ограничиваются графическим суммированием векторов отдельных последовательностей.

Для определения токов отдельных последовательностей в заданной ветви первоначально производится вычисление токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ соответствующих последовательностей.

Ток прямой последовательности распределяется также, как и ток трёхфазного КЗ. При этом должно быть лишь учтено, что в месте повреждения приложено напряжение прямой последовательности $\dot{U}_{1k}$, которое влияет на величину токов и напряжений прямой последовательностей.

Распределение напряжений отдельных последовательностей рассмотрим на схеме участка системы, приведенную на рис.2.26. Из рисунка видно, что по мере приближения к источнику U_{1k} растет, а U_{2k} и U_{0k} уменьшаются.

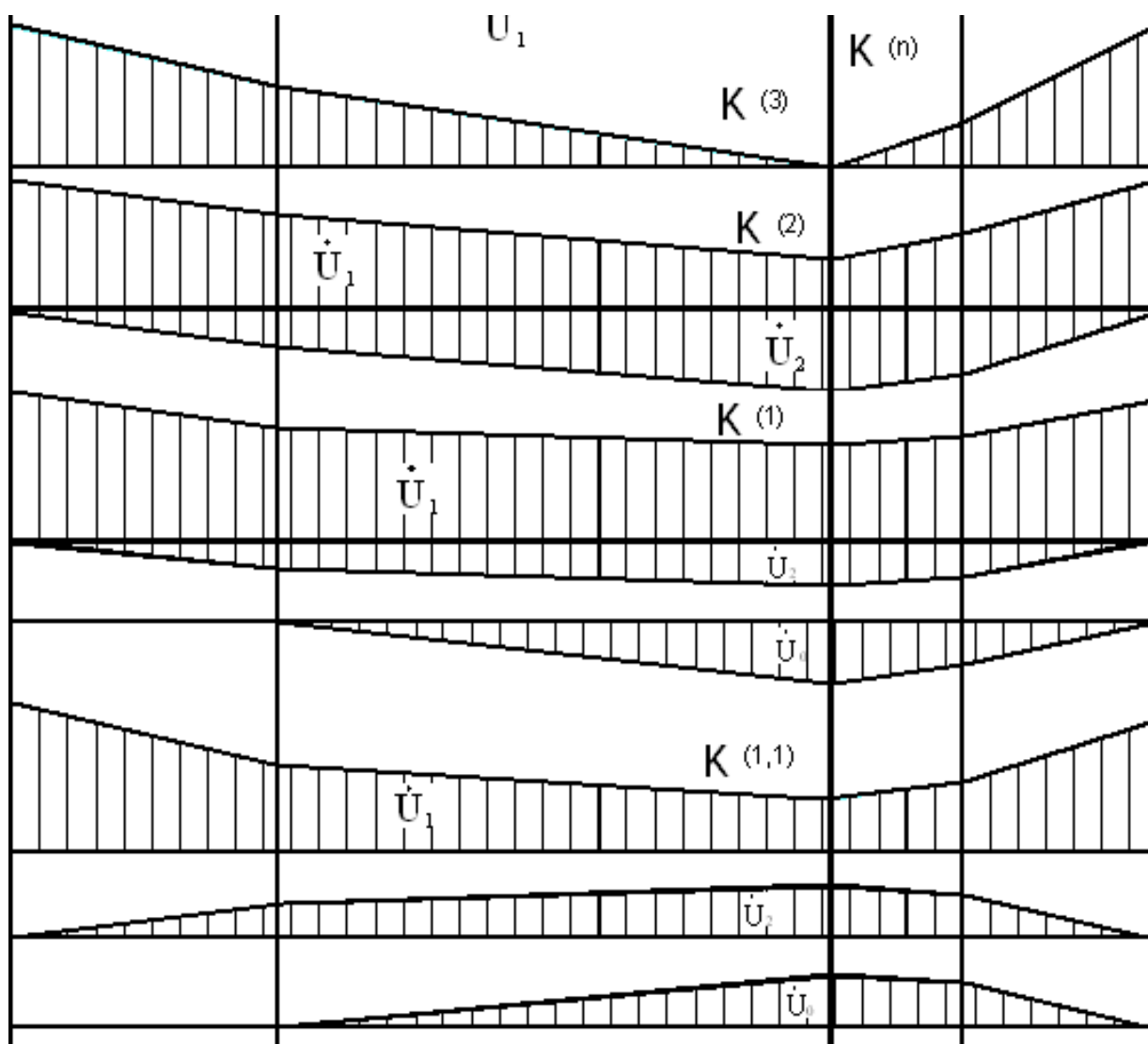


Рис. 2.26. Распределение напряжений отдельных последовательностей при несимметричных КЗ

Симметричные составляющие токов и напряжений при переходе через трансформатор изменяются по величине и по фазе. Изменение токов и напряжений по величине зависит от коэффициента трансформации, а поворот векторов от группы соединения обмоток.

Для трансформаторов с чётной группой соединения обмоток Δ/Δ (или Δ/Δ) обычно принимается группа 12, при этом угловое смещение токов и напряжений отсутствует.

Определим угловое смещение векторов токов и напряжений для наиболее часто встречающейся схемы Δ/Δ (рис.2.27).

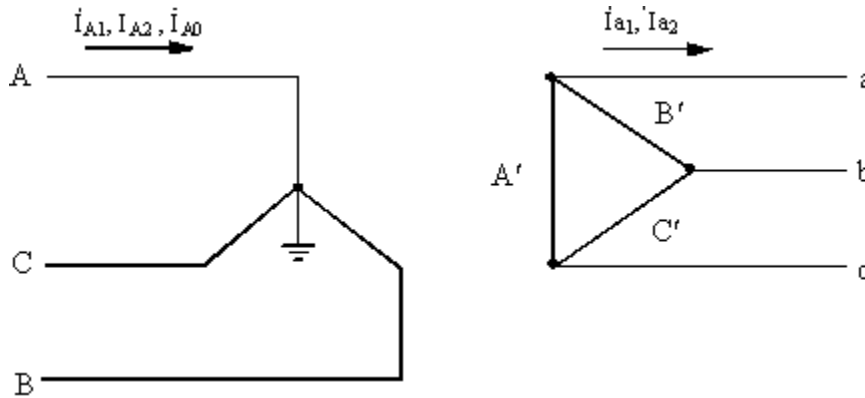


Рис 2.27. Трансформатор с группой соединения обмоток Δ/Δ

Пусть коэффициент трансформации равен k_I . Выразим I_{a1} в функции от I_{A1} :

$$I_{A'1} = I_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}}, \quad I_{B'1} = I_{B1} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = a^2 I_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}},$$

следовательно,

$$I_{a1} = I_{A'1} - I_{B'1} = (1 - a^2) I_{A1} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = I_{A1} k e^{j30^\circ}.$$

Аналогично для обратной последовательности

$$I_{a2} = I_{A'2} - I_{B'2} = (1 - a) I_{A2} \frac{k_I}{\sqrt{3}} = I_{A2} k e^{-j30^\circ}.$$

Подобные выражения можно получить и для напряжений.

Таким образом, при переходе со стороны звезды на сторону треугольника векторы напряжений и токов прямой последовательности поворачиваются на 30° против часовой стрелки, а обратной – на 30° по часовой стрелке. При переходе со стороны треугольника на сторону звезды угловое смещение симметричных составляющих меняют свой знак на противоположный.

2.6. Сравнение токов при различных видах КЗ

Анализируя полученные в п.2.4. формулы для расчёта тока КЗ при несимметричных повреждениях можно для простейшего случая одного генератора получить соотношения между токами.

При различных видах КЗ:

$$x_A^{(1)} > x_A^{(2)} > x_A^{(1,1)} > x_A^{(3)} = 0.$$

Следовательно, между токами прямой последовательности в месте повреждения имеет место следующее соотношение

$$I_1^{(3)} > I_1^{(1,1)} > I_1^{(2)} > I_1^{(1)}.$$

Определим соотношения между полными токами.

Отношение тока двухфазного КЗ к трёхфазному

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\frac{\sqrt{3}E_3}{x_{13} + x_{23}}}{\frac{E_3}{x_{13}}}.$$

Если $x_{2\phi}$ близко по величине к $x_{1\phi}$, что соответствует удалённому КЗ или начальному значению тока КЗ в сети питаемой турбогенератором, то

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Для установившихся значений токов КЗ вблизи генераторов $x_{1\phi}$ обычно значительно больше $x_{2\phi}$, поэтому отношение $I_k^{(2)}/I_k^{(3)}$ может достигать 1,6. Таким образом, тепловой импульс при двухфазном КЗ может быть больше, чем при трёхфазном, и, следовательно, аппаратура и токоведущие части на зажимах генератора должны проверяться на тепловую устойчивость при трёхфазном и двухфазном КЗ.

Для гидрогенератора в начальный момент времени $x_{2\phi} > x_{1\phi}$, поэтому

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} < 0,87.$$

Отношение тока однофазного КЗ к трёхфазному

$$\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\frac{3E_\phi}{x_{1\phi}+x_{2\phi}+x_{0\phi}}}{\frac{E_\phi}{x_{1\phi}}} = \frac{3x_{1\phi}}{x_{1\phi}+x_{2\phi}+x_{0\phi}}.$$

В сетях 110 кВ часть нейтралей трансформаторов для уменьшения тока однофазного КЗ могут быть незаземлены. При этом в любой точке сети должно выдерживаться соотношение $\frac{x_{0\phi}}{x_{1\phi}} < 4$, при этом, полагая, что $x_{2\phi} \approx x_{1\phi}$

$$\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} \approx 0,5.$$

При КЗ на шинах мощных электрических станций и подстанций имеет место соотношение $x_{0\phi} \ll x_{1\phi}$, то при $x_{2\phi} \approx x_{1\phi}$ $\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} > 1,5$.

Отношение тока двухфазного КЗ на землю к трехфазному

$$\frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} = \frac{(a^2-1)x_{1\phi}x_{2\phi}+(a^2-a)x_{1\phi}x_{0\phi}}{x_{1\phi}x_{2\phi}+x_{1\phi}x_{0\phi}+x_{2\phi}x_{0\phi}}.$$

Если $x_{0\phi} \gg x_{2\phi}$, то данный вид замыкания соответствует двухфазному КЗ, т.е.

$$\frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} = 0,87. \text{ При равенстве } x_{1\phi} = x_{2\phi} = x_{0\phi} \text{ имеем } \frac{I_k^{(1,1)}}{I_k^{(3)}} \approx 1.$$

2.7. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземлённой нейтралью

При однофазных замыканиях на землю в электрических сетях с незаземленной нейтралью в месте замыкания возникают только емкостные токи, обусловленные емкостью фаз относительно земли (рис. 2.28,а). При этом ток, как правило, не превышает 50 А, а само повреждение называется не КЗ, а простым замыканием на землю.

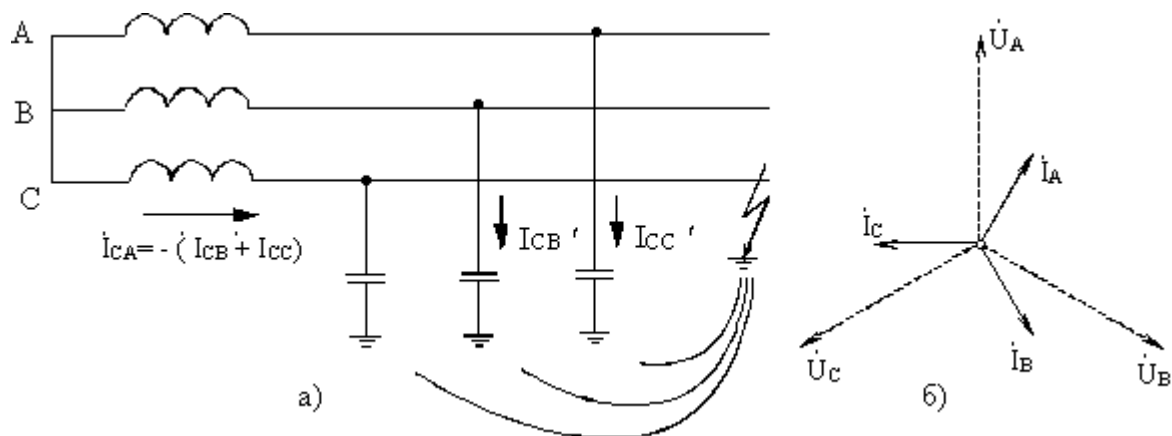


Рис. 2.28. Однофазное замыкание на землю (а) и векторная диаграмма напряжений и токов в нормальном режиме

При замыкании происходит смещение нейтрали источника. На нейтрали появляется фазное напряжение, а напряжение неповрежденных фаз увеличивается до линейного напряжения, т.е. в $\sqrt{3}$ раза. Это называется перекосом напряжений фаз относительно земли. Линейные напряжения остаются без изменения.

Перекося напряжений не распространяется через трансформаторы на другую электрическую ступень. Через автотрансформаторы, имеющие в отличие от трансформаторов помимо магнитной и электрическую связь между обмотками, перекося фаз может перейти с обмотки высшего напряжения на обмотку низшего, если нейтраль не заземлена. Поэтому нейтрали автотрансформаторов всегда заземляются, и, следовательно, они не применяются в сетях с изолированными нейтральными (ниже 110 кВ).

В предшествующем замыканию режиме емкостные токи равны (рис.2.28,б)

$$I_{cA} = I_{cB} = I_{cC} = U_{\phi} \omega C,$$

где U_{ϕ} - фазное напряжение.

При замыкании (рис.2.29)

$$I_{cB'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C, I_{cC'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C, I_{cA'} = \sqrt{3} U_{\phi} \omega C.$$

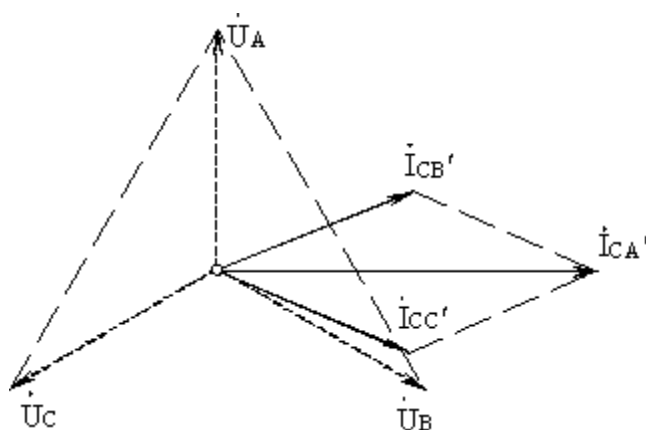


Рис. 2.29. Векторная диаграмма напряжений и токов при однофазном замыкании на землю

Таким образом, ток в месте замыкания на землю, равен арифметической сумме емкостных токов фаз предшествующего режима. Система емкостных токов является неуравновешенной и поэтому ведет себя так же, как и система нулевой последовательности. При значительной величине тока замыкания возникают условия для перемежающейся дуги, что может привести к перенапряжениям в сети, опасными для изоляции. Величина тока замыкания может быть уменьшена (скомпенсирована) с помощью реактора, включенного в нейтраль трансформатора.

Контрольные вопросы к главе 2

1. Назначение и сущность метода симметричных составляющих.
2. Основные уравнения метода симметричных составляющих.
3. Сопротивление электрических машин токам обратной последовательности.
4. Схемы замещения трансформаторов при протекании токов нулевой последовательности.
5. Сопротивление линий электропередачи токам нулевой последовательности.
6. Схемы замещения отдельных последовательностей.
7. Двухфазное короткое замыкание. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
8. Однофазное короткое замыкание. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
9. Двухфазное короткое замыкание на землю. Расчет токов и напряжений. Построение векторных диаграмм.
10. Правило эквивалентности прямой последовательности.
11. Учет активных сопротивлений в месте КЗ.
12. Распределение и трансформация токов и напряжений отдельных последовательностей.
13. Сравнение токов при различных видах КЗ.
14. Замыкания на землю в электрических сетях с незаземленной нейтралью.

Задача 2.1

Произвести расчет сверхпереходного тока КЗ при трехфазном, двухфазном, однофазном и двухфазном КЗ на землю на шинах высокого напряжения электрической станции (ЭС) и схемы участка энергосистемы, приведенной на рис.2.4 в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Генераторы до возникновения повреждения работали в номинальном режиме.

Параметры основных элементов схем приведены в таблице. Недостающие параметры элементов схемы выбрать в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Все параллельно работающие элементы сети рекомендуется выбирать однотипными. Количество параллельно включенных элементов должно быть не менее двух. Суммарная мощность всех трансформаторов (ЭС) должна быть не менее полной мощности всех генераторов (ТГ-турбогенераторы, ГГ-гидрогенераторы). Принять, что все трансформаторы имеют четырехстержневой магнитопровод. Погонное сопротивление прямой последовательности линии выбирается по номинальному напряжению линии. От ударов молнии линии защищены стальными грозозащитными тросами, заземленными на каждой опоре.

Результаты расчетов свести в таблицу.

Табл. 2.2. Исходные данные к задаче главы 2

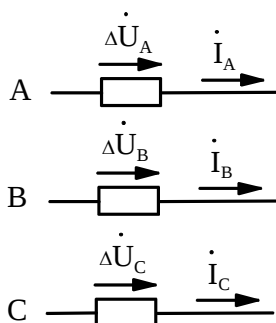
Последняя цифра шифра	Тип генераторов	$P_{ЭС}$, МВт	Длина линии Л1: $l_{Л1}$, км	Мощность п/ст, МВА	Сопротивление системы, $x_{1э}$ Ом	Сопротивление системы, $x_{0э}$ Ом
1	ГГ	170-220	240-260	120-150	18	26
2	ТГ	380-410	140-170	120-150	16	24
3	ТГ	580-620	280-300	200-260	25	32
4	ГГ	750-810	190-210	200-260	22	31
5	ГГ	1150-1400	900-990	800-900	26	33
6	ТГ	1600-1800	700-900	900-980	23	30
7	ТГ	50-60	130-160	120-140	9	12
8	ТГ	90-100	40-60	120-140	11	16
9	ТГ	180-210	230-250	150-260	12	18
0	ТГ	390-420	140-150	190-260	14	17

3. ПРОДОЛЬНАЯ НЕСИММЕТРИЯ

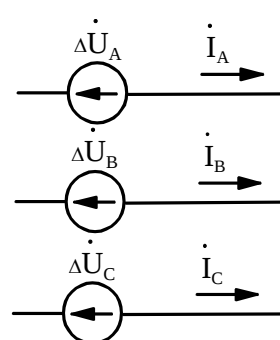
3.1. Однократная продольная несимметрия

В трехфазных сетях в некоторых случаях имеет место неравенство сопротивлений фаз, которое называется продольной несимметрией. Наиболее сильно выраженная несимметрия проявляется при обрыве проводов, а также при пофазном отключении фаз однофазными выключателями. В данном разделе рассмотрены методы расчета токов и напряжений при продольной несимметрии.

В общем случае несимметрии во всех фазах включены разные сопротивления (рис.3.1,а), которые могут быть связаны между собой взаимными индукциями. Падения напряжения на сопротивлениях в фазах обозначим $\Delta \dot{U}_A$, $\Delta \dot{U}_B$, $\Delta \dot{U}_C$. Вместо сопротивлений в схему могут быть включены соответствующие им ЭДС (рис.3.1,б). Индексы L и L' принято использовать для обозначения продольной несимметрии, аналогично как индекс k для обозначения поперечной несимметрии, т.е. коротких замыканий.



а)



б)

Рис.3.1. Продольная несимметрия фаз

Используя МСС Напряжения $\Delta \dot{U}_A, \Delta \dot{U}_B, \Delta \dot{U}_C$ можно разложить на симметричные составляющие и для особой фазы A составить схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для участка энергосистемы, состоящего из двух систем M и N (рис. 3.2).

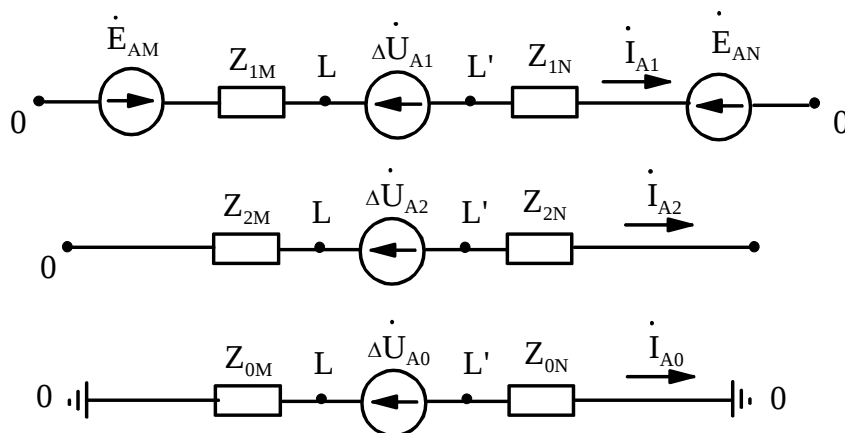


Рис.3.2. Схемы замещения при продольной несимметрии

Этим схемам соответствуют уравнения

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{A\bar{3}} &= \Delta \dot{U}_{LA1} + \dot{I}_{A1} Z_{1\bar{3}} \\ 0 &= \Delta \dot{U}_{LA2} + \dot{I}_{A2} Z_{2\bar{3}} \\ 0 &= \Delta \dot{U}_{LA0} + \dot{I}_{A0} Z_{0\bar{3}} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где $\dot{E}_{A\bar{3}} = \dot{E}_{AM} - \dot{E}_{AN}$, $Z_{1\bar{3}} = Z_{1M} + Z_{1N}$, $Z_{2\bar{3}} = Z_{2M} + Z_{2N}$, $Z_{0\bar{3}} = Z_{1M} + Z_{1N}$.

Таким образом, напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте продольной несимметрии появляются в результате разложения системы несимметричных векторов фазных напряжений.

Расчет токов и напряжений в случае продольной несимметрии может быть произведен путем решения системы уравнений (3.1). Система из трех уравнений содержит 6 неизвестных. Поэтому для ее решения используются три дополнительных уравнения исходя из граничных условий, зависящих от вида несимметрии. Далее рассматриваются два вида продольной несимметрии: разрыв одной и двух фаз.

3.2. Разрыв одной фазы

Рассмотрим разрыв особой фазы A (рис.3.3).

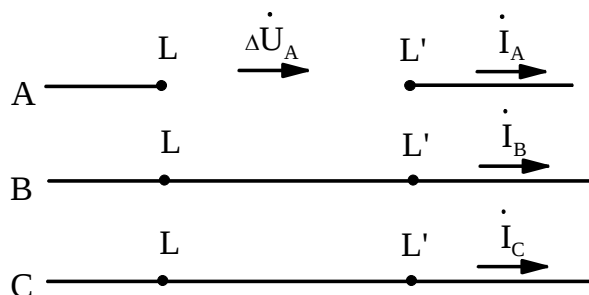


Рис.3.3. Разрыв одной фазы

Этому случаю продольной несимметрии соответствуют граничные условия:

$$\dot{I}_{LA} = 0, \Delta \dot{U}_{LB} = 0, \Delta \dot{U}_{LC} = 0. \quad (3.2)$$

Эти условия аналогичны граничным условиям при двухфазном КЗ на землю, что обуславливает и аналогичные расчетные выражения.

Из системы уравнений (2.5) с учетом граничных условий (3.2) получим:

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}, \Delta \dot{U}_{LA2} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}, \Delta \dot{U}_{LA0} = \frac{1}{3} \dot{U}_{LA}.$$

Из системы уравнений (3.1)

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA2}}{jx_{L2\phi}}, \dot{I}_{LA0} = -\frac{\Delta \dot{U}_{LA0}}{jx_{L0\phi}}. \quad (3.3)$$

Так как $\dot{I}_{LA} = 0$, то

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = 0. \quad (3.4)$$

Подставив в (3.4) выражения (3.3), получим

$$\dot{I}_{LA1} - \Delta \dot{U}_{LA1} \left(\frac{1}{jx_{L2\phi}} + \frac{1}{jx_{L0\phi}} \right) = 0$$

или

$$\dot{I}_{LA1} \cdot jx_{\Delta}^{(1)} = \Delta \dot{U}_{LA1}, \quad (3.5)$$

где $x_{\Delta}^{(1)} = x_{L2\phi} // x_{L0\phi}$ (индекс 1 означает разрыв одной фазы)

Из первого уравнения (3.1) с учетом (3.5) получим формулу для вычисления тока прямой последовательности при продольной несимметрии

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A\phi}}{j(x_{L1\phi} + x_{\Delta}^{(1)})}. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) аналогична формуле для вычисления тока прямой последовательности при КЗ на основе правила эквивалентности прямой последовательности.

Используя соотношения между симметричными составляющими, получена комплексная схема замещения при разрыве одной фазы (рис. 3.4).

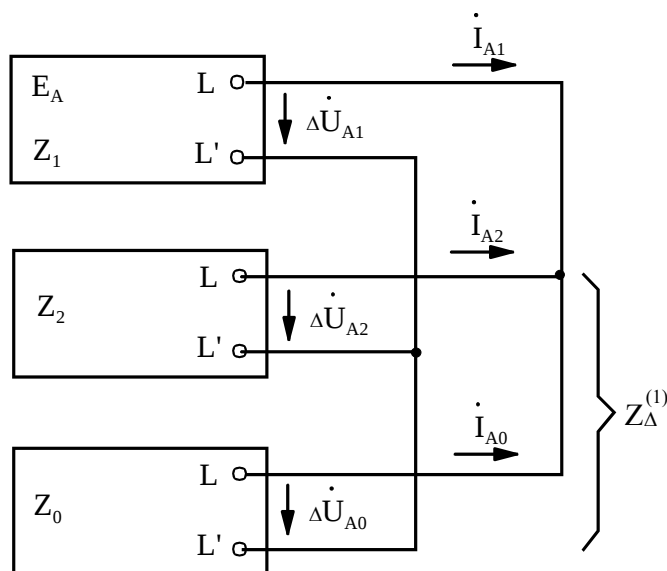


Рис.3.4. Комплексная схема замещения при разрыве одной фазы

Из комплексной схемы замещения находим токи обратной и нулевой последовательностей

$$\dot{I}_{LA2} = -\frac{x_{L0\phi}}{x_{L2\phi} + x_{L0\phi}} \dot{I}_{LA1},$$

$$I_{LA0} = -\frac{x_{L23}}{x_{L23}+x_{L03}} I_{LA1}.$$

Полные токи и напряжения получают путем суммирования векторов прямой обратной и нулевой последовательностей.

3.3. Разрыв двух фаз

Рассмотрим разрыв фаз B и C (рис.3.5).

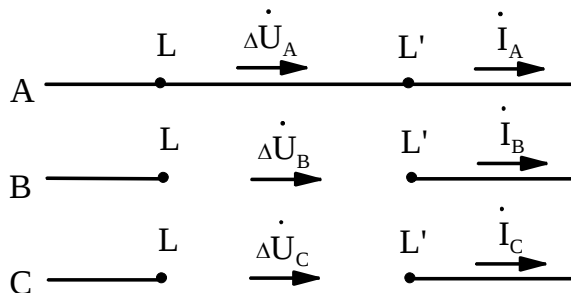


Рис.3.5. Разрыв двух фаз

Этому случаю продольной несимметрии соответствуют граничные условия:

$$\dot{I}_B = 0, \dot{I}_C = 0, \Delta \dot{U}_{LA} = 0. \quad (3.7)$$

При этом граничные условия аналогичны граничным условиям при однофазном КЗ.

Из системы уравнений (2.3) с учетом граничных условий (3.7) получим:

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \frac{1}{3} \dot{I}_{LA}, \quad (3.8)$$

$$\Delta \dot{U}_{LA1} + \Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0} = 0. \quad (3.9)$$

Сложим уравнения системы (3.1) с учетом (3.8) и (3.9) и после несложных преобразований найдем

$$\dot{I}_{LA1} = \frac{\dot{E}_{A3}}{j(x_{L13} + x_{\Delta}^{(2)})},$$

где $x_{\Delta}^{(2)} = x_{L23} + x_{L03}$ (индекс 2 означает разрыв двух фаз).

Для тока в фазе A $\dot{I}_{LA} = 3\dot{I}_{LA1}$. Разность фазных напряжений прямой последовательности в месте разрыва определяется путем сложения двух последних уравнений системы (3.1) с учетом (3.8) и (3.9)

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = -(\Delta \dot{U}_{LA2} + \Delta \dot{U}_{LA0}) = j x_{\Delta}^{(2)} \dot{I}_{LA1}.$$

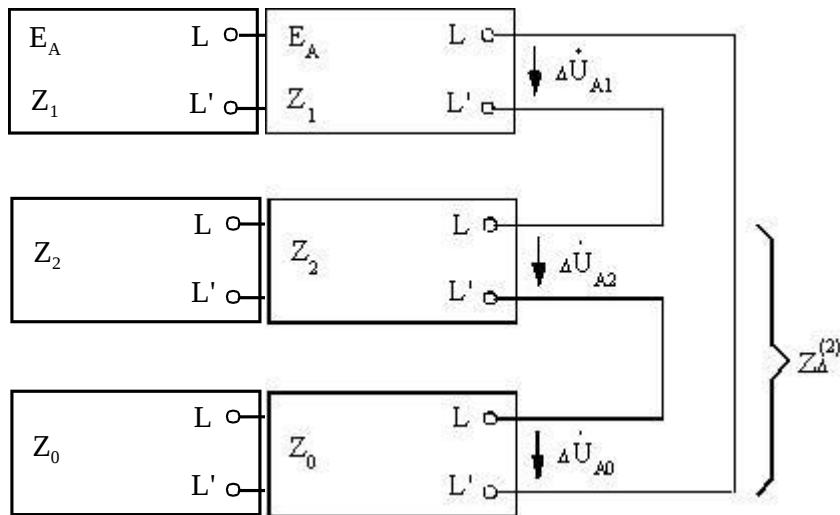


Рис.3.6. Комплексная схема замещения при разрыве двух фаз

Используя соотношения между симметричными составляющими (3.8) и (3.9) построена комплексная схема при разрыве двух фаз (рис. 3.6).

Пример 3.1. Для схемы, приведенной на рис.3.7 построить комплексную схему замещения при разрыве одной фазы и двух фаз в начале линии.

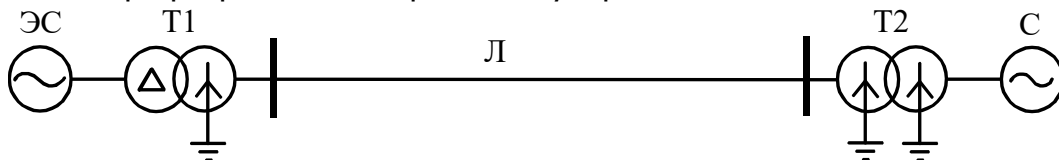


Рис.3.7. Схема участка энергосистемы

Требуемые схемы замещения приведены на рис.3.8 и 3.9 соответственно. Комплексные схемы замещения соответствуют особой фазе А.

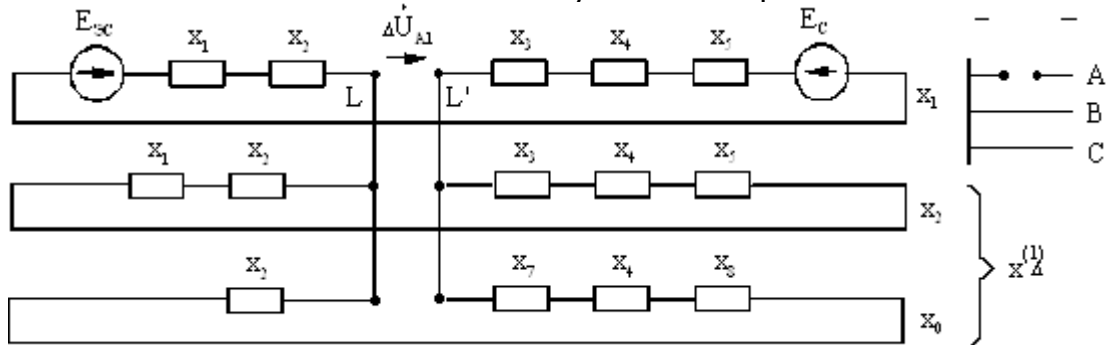


Рис.3.8. Схема замещения при разрыве одной фазы

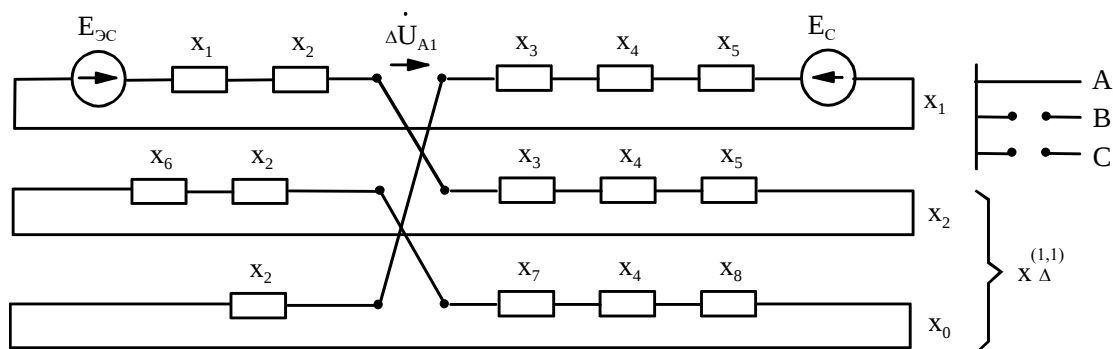


Рис.3.9. Схема замещения при разрыве двух фаз

Подобные схемы используются, как правило, для расчета переходных электромагнитных процессов, которые протекают сравнительно медленно (1-3 с). Поэтому для генератора задаются переходное сопротивление $x'_{x_1}(x_6)$ (без учета влияния демпферных контуров) и переходная ЭДС. ▷

Контрольные вопросы к главе 3

1. Назначение и сущность метода симметричных составляющих.
2. Основные уравнения метода симметричных составляющих.
3. Разрыв одной фазы. Расчет токов и напряжений.
4. Разрыв двух фаз. Расчет токов и напряжений.
5. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии.

4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИДЕАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭДС

В данном разделе рассматривается электромагнитный переходный процесс в симметричной цепи с сосредоточенными индуктивностями и активными сопротивлениями. Питание цепи осуществляется от источника бесконечной мощности, собственное сопротивление которого равно нулю, а его напряжение, изменяясь с постоянной частотой, имеет неизменную амплитуду. Это соответствует теоретическому пределу КЗ, в точке удаленной от мощных электрических станций. Переходные процессы в подобных условиях изучались в курсе ТОЭ, поэтому в данном разделе лишь кратко напоминаются основные выводы исследования таких переходных процессов.

4.1. Трехфазное короткое замыкание в неразветвленной цепи

Рассмотрим переходный процесс, вызванный трехфазным КЗ, которое равносильно включению трехфазного выключателя Q (рис.4.1).

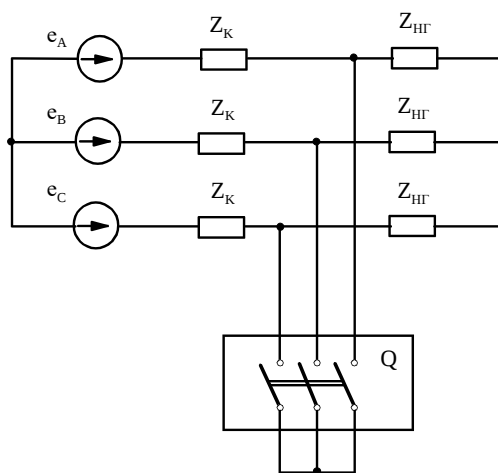


Рис.4.1. Трехфазное КЗ в сети

Предшествующий режим характеризуется векторами токов $\dot{I}_{HA}$, $\dot{I}_{HB}$, $\dot{I}_{HC}$ (рис.4.2). Здесь $Z_{HГ} = R_{HГ} + jX_{HГ}$, $Z_K = R_K + jX_K$. Предполагается, что взаимоиנדукция между фазами отсутствует ($M_i=0$).

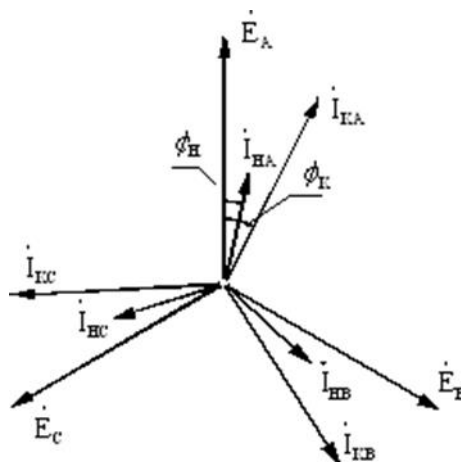


Рис.4.2. Векторная диаграмма токов и напряжений в нормальном режиме и при трехфазном КЗ

В данном режиме ток в каждой из фаз является синусоидальным и описывается выражением

$$i_H = I_{mH} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_H),$$

где α – начальная фаза источника, $I_{mH} = E / (Z_{Hr} + Z_K)$ – амплитуда тока в предшествующем режиме, φ_H – угол цепи в нормальном режиме.

После возникновения КЗ (включение выключателя) дифференциальное уравнение для участка цепи между источником и выключателем по 2-му закону Кирхгофа для каждой из фаз имеет вид

$$L_K \frac{di_K}{dt} + R_K i_K = e. \quad (4.1)$$

При решении уравнения (4.1) классическим методом, искомый ток КЗ определяется как сумма принужденной и свободной составляющих

$$i_k = i_{k.пр} + i_{k.св} = I_{mk} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a(0)} \exp(-t/T_a), \quad (4.2)$$

где $I_{mk} = E / Z_K$ – амплитуда тока КЗ, φ_K – угол цепи в режиме КЗ, T_a – постоянная времени цепи короткого замыкания. Напомним, что постоянная времени определяет скорость затухания свободного тока; свободный ток затухает практически за (3-5) T_a . Как правило $\varphi_K \geq \varphi_H$ (рис.4.2), так как в нормальном режиме $\cos \varphi_H \rightarrow 1$.

Затухающий по экспоненте свободный ток называется апериодической слагающей тока КЗ. Начальное значение этой слагающей определяется из первого закона коммутации, т.е. ток в индуктивности не может измениться скачком $i_{L(0-)} = i_{L(0)} = i_{L(0+)}$, в этом случае

$$i_{a(0)} = I_{mH} \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{mk} \sin(\alpha - \varphi_K).$$

При заданном значении α максимальное значение $i_{a(0)}$ имеет место при $I_{mH} = 0$, т.е. в случае разомкнутой цепи (в предшествующем режиме); при этом

$$i_{a(0)} = -I_{mk} \sin(\alpha - \varphi_K).$$

В этом случае выражение для тока КЗ в каждой фазе трехфазной цепи имеет вид

$$i_k = I_{mk} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) \exp(-t/T_a)]. \quad (4.3)$$

Величины $i_{a(0)}$ в общем случае, во всех фазах различны (их сумма в трех фазах $i_{aA} + i_{aB} + i_{aC} = 0$). Поэтому определение трехфазного КЗ, как симметричного, строго говоря, применительно только к периодическим слагающим фазных токов.

4.2. Ударный ток короткого замыкания

Выбор электрических аппаратов и токоведущих частей по условию механической прочности производится по максимально возможному значению тока КЗ. Максимальное мгновенное значение тока КЗ называется ударным током КЗ и обозначается $i_{уд}$. Ударный ток КЗ обусловлен наложением свободной апериодической слагающей на принужденную периодическую слагающую тока КЗ. Величина периодической составляющей тока КЗ зависит от параметров цепи КЗ, а апериодической, кроме того, и от момента КЗ. Максимальное значение апериодической слагающей имеет место при $\alpha - \varphi_K = \pm \pi/2$ (из уравнения 4.3). В этом случае уравнение (4.3) принимает вид

$$i_K = I_{mk} [\exp(-t/T_a) - \cos(\omega t)]. \quad (4.4)$$

Кривая тока КЗ с наибольшей апериодической слагающей, соответствующая уравнению (4.4), приведена на рис.4.3. Как видно из рисунка ударный ток КЗ наступает через время, равное примерно полупериоду промышленной частоты и для $f = 50$ Гц $t \approx 0,01$ с.

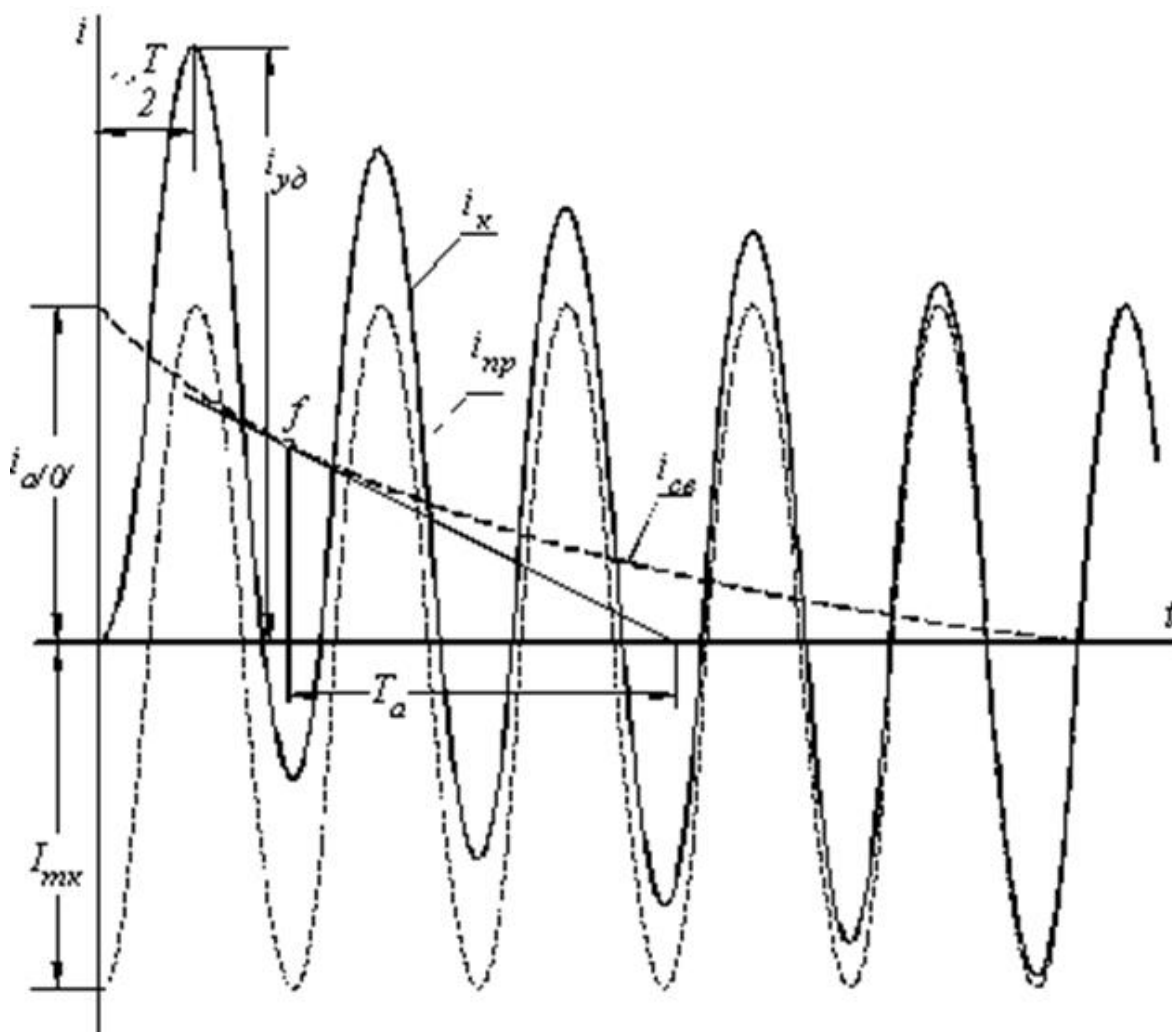


Рис.4.3. Кривая тока КЗ с наибольшей аperiodической слагающей

Подставив в выражение (4.4) значение $t = 0,01$ с, получим

$$i_{уд} = I_{mk}[1 + \exp(-0,01/T_a)] = k_{уд}I_{mk} = \sqrt{2}k_{уд}I''_k, \quad (4.5)$$

где $k_{уд}$ - ударный коэффициент.

Ударный коэффициент показывает превышение ударного тока над амплитудным значением. При расчетах ударного тока в энергосистемах предполагается, что амплитуда периодической слагающей не затухает.

Ударный коэффициент зависит от постоянной времени первичной цепи; его величина находится в пределах $1 < k_{уд} < 2$, что соответствует предельным значениям T_a , т.е. $T_a = 0$ (при $L_k = 0$) $T_a \rightarrow \infty$ (при $R_k = 0$). Чем меньше значение T_a , тем быстрее затухает аperiodическая слагающая и тем соответственно меньше ударный коэффициент. Реально в электрических сетях $T_a = 0,01-0,3$ с при этом $k_{уд} = 1,3-1,95$. С ростом номинального напряжения сети T_a и, соответственно, $k_{уд}$ возрастают.

Ударный коэффициент может быть определен либо по формуле

$$k_{уд} = 1 + \exp(-0,01/T_a), \quad (4.6)$$

либо с помощью кривых на рис. 4.4, выражающих зависимости $k_{уд} = f(T_a)$ или $k_{уд} = f(X/R)$.

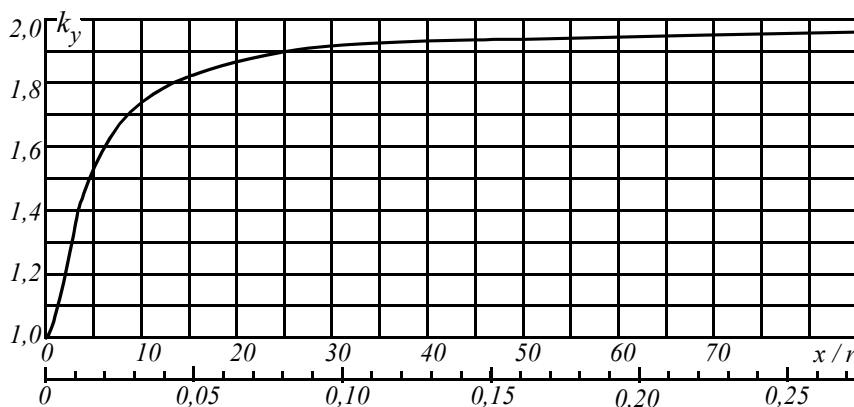


Рис.4.4. Кривая зависимости ударного тока

При отсутствии необходимых данных величину X/R для отдельных элементов можно найти из табл. 4.1.

Таблица 4.1. Отношения X к R в энергосистеме

№ п.п.	Наименование элемента	Отношение $\frac{X}{R}$
1	Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15 - 85
2	Турбогенераторы мощностью 100 - 500 МВт	100 - 140
3	Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40 - 60
4	Гидрогенераторы без демпферных обмоток	60 - 90
5	Трансформаторы мощностью 5 - 30 МВА	7 - 17
6	Трансформаторы мощностью 60 - 500 МВА	20 - 50
7	Реакторы 6 - 10 кВ	15 - 80
8	Воздушные линии	2 - 8
9	Электрическая система	10 - 20
10	Обобщенная нагрузка	2,5

Для разветвленных схем сумму апериодических слагающих токов приближенно заменяют одной экспонентой с эквивалентной постоянной времени

$$T_{aэ} = \frac{X_э}{\omega R_э},$$

где $X_э$ – суммарное индуктивное сопротивление на промышленной частоте при равных нулю активных сопротивлениях ($R_i=0$), $R_э$ – суммарное активное сопротивление при равных нулю индуктивных сопротивлениях ($X_i=0$).

Для снижения погрешности расчета ударного тока на шинах станции целесообразно ударный ток определять отдельно для генераторов (г) станции и других источников системы (с)

$$i_{уд.э} = \sqrt{2}k_{уд.г}I''_{кг} + \sqrt{2}k_{уд.с}I''_{кс}. \quad (4.6)$$

4.3. Действующее значение тока короткого замыкания

Под действующим значением тока КЗ для заданного момента времени условно понимают среднеквадратичное значение тока за один период (T), в центре которого находится рассматриваемый момент. Таким образом, действующее значение тока

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_k^2 dt}, \quad (4.7)$$

где i_k - мгновенное значение тока КЗ. Напомним, что действующее значение переменного тока численно равно постоянному току, который выделяет в проводнике такое же количество тепла, что и переменный.

Общее выражение для тока КЗ достаточно сложное, поэтому для упрощения вычисления действующего значения принимают, что за рассмотренный период его обе слагающие не изменяются. Амплитуда периодической слагающей остается постоянной, аaperиодическая слагающая остается неизменной и равной мгновенному значению свободного тока в рассматриваемый момент времени. При этом выражение (4.4) упрощается и при подстановке его в (4.6) последнее принимает вид

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}, \quad (4.8)$$

где I_{nt} , I_{at} - действующие значения периодической и аperiодической составляющих соответственно.

Наибольшее действующее значение тока КЗ имеет место в первый период переходного процесса и вызывает ударное действие на аппараты и токоведущие части. Его можно определить подстановкой (4.5) в (4.8). При неизменном I_{nt} в первом периоде

$$I_{уд} = I''_к \sqrt{1 + 2(k_{уд} - 1)^2}. \quad (4.9)$$

В соответствие с указанными выше пределами для $k_{уд}$, имеем

$$1 < i_{уд}/I_{уд} < \sqrt{3}.$$

Величина $I_{уд}$ из (4.9) используется для проверки электрических аппаратов на динамическую устойчивость при КЗ.

Пример 4.1.

Для схемы (рис.4.5.) определить сверхпереходный и ударный ток КЗ в точке К1 с учетом подпитки от синхронного компенсатора (СК), нагрузки и асинхронного двигателя (АД). Построить осциллограммы ТКЗ от синхронного компенсатора, нагрузки и питающей сети для 3х периодов. Определить сверхпереходный ТКЗ в точке Кр и остаточное напряжение на шинах.

Дано:

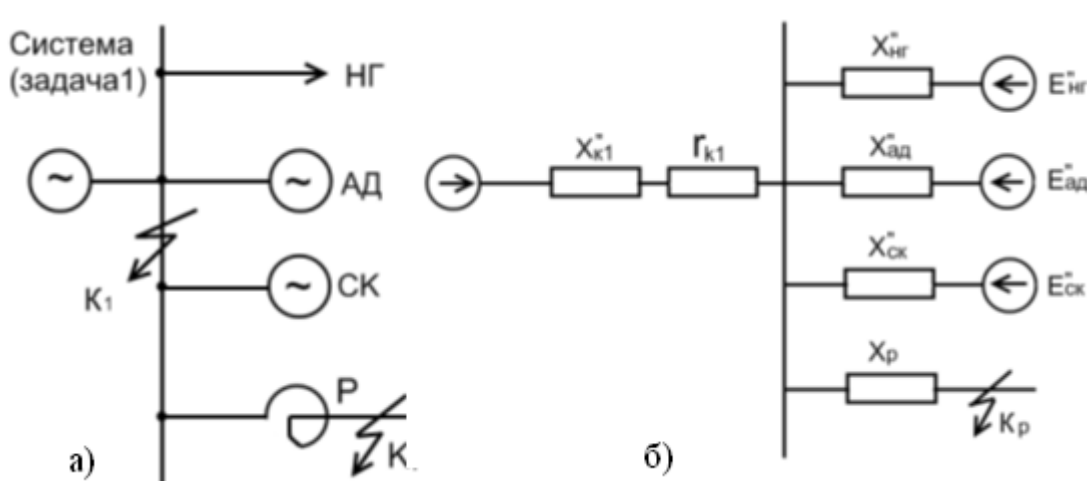


Рис. 4.5. Исходная схема (а) и схема замещения (б)

$N_{agr} :=$

Таблица 4.2

Нагрузка			
вар№	U _{нг} кВ	P _{нг} МВт	cosφ _{нг} -
1	6	40	0,8
2	10	50	0,85
3	6	60	0,9
4	10	40	0,8
5	6	50	0,85
6	10	60	0,9
7	6	40	0,8

4.1.1. Параметры

Параметры нагрузки:

- номинальное напряжение

$$U_{наг} := N_{agr_{nv+2,1}} \cdot kV = 6 \cdot kV$$

- активная мощность

$$P_{наг} := N_{agr_{nv+2,2}} \cdot MW = 40 \cdot MW$$

- коэффициент мощности

$$\cos\varphi_{наг} := N_{agr_{nv+2,3}} = 0.8$$

Параметры обобщенной нагрузки:

- сверхпереходное сопротивление

$$X_{нф_{наг}} := 0.35$$

- сверхпереходная ЭДС

$$E_{нф_{наг}} := 0.85$$

- ударный коэффициент

$$k_{унаг} := 1$$

 $AD :=$

Таблица 4.3

Асинхронные двигатели						
вар№	U _{ад} кВ	P _{кад} кВт	cosφ	Кпуск	К _у АД	I _{ад} *Н
1	6	3200	0,74	5,2	1,5	0,7
2	10	3500	0,75	5,5	1,55	0,75
3	6	4000	0,78	6	1,6	0,8
4	10	5000	0,79	6,5	1,65	0,85
5	6	6300	0,8	7	1,7	0,9
6	10	3200	0,81	5,2	1,5	0,7
7	6	3500	0,83	5,5	1,55	0,75

Параметры АД:

- номинальное напряжение

$$U_{ад} := AD_{nv+2,1} \cdot kV = 6 \cdot kV$$

- активная мощность

$$P_{ад} := AD_{nv+2,2} \cdot kW = 3.2 \times 10^3 \cdot kW$$

- коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{ад} := AD_{nv+2,3} = 0.74$$

- коэффициент пуска

$$k_{пуск} := AD_{nv+2,4} = 5.2$$

- ударный коэффициент

$$k_{уад} := AD_{nv+2,5} = 1.5$$

- загрузка асинхронного двигателя

$$I_{*ад} := AD_{nv+2,6} = 0.7$$

Параметры СК:

СК :=

Таблица 4.4

Синхронные компенсаторы					
вар№	U _{ск}	Q _{ск}	X'' _{дск}	T _{аск}	I _{ск}
	кВ	МВАр	*Н	сек	*Н
1	6,6	5	0,16	0,14	0,75
2	11	10	0,18	0,15	0,8
3	6,6	16	0,2	0,16	0,85
4	11	25	0,22	0,17	0,9
5	6,6	32	0,24	0,18	0,95
6	11	10	0,16	0,19	0,75
7	6,6	16	0,18	0,2	0,8

- номинальное напряжение

$$U_{ск} := СК_{nv+2,1} \cdot kV = 6.6 \cdot kV$$

- реактивная мощность

$$Q_{ск} := СК_{nv+2,2} \cdot MW = 5 \cdot MW$$

- сверхпереходное сопротивление СК

$$X''_{дск} := СК_{nv+2,3} = 0.16$$

- постоянная времени СК

$$T_{аск} := СК_{nv+2,4} \cdot s = 0.14 s$$

- загрузка СК

$$I_{*ск} := СК_{nv+2,5} = 0.75$$

Параметры реактора:

- номинальный ток реактора

$$I_{нр} = 0.4 \cdot kA$$

- номинальное напряжение реактора

$$U_{нр} = 6 \cdot kV$$

- сопротивление реактора

$$X_{рст\%} = 7\%$$

Параметры системы:

- эквивалентное индуктивное сопротивление системы из точного расчета в именованных единицах

$$X_{\Pi\Sigma k1} = 0.048 \Omega$$

- ток короткого замыкания от системы

$$I''_{k1\text{ТТМ}} = 77.351 \cdot \text{kA}$$

Параметры генератора:

- сверхпереходное приведенное сопротивление генератора

$$X''_{\Pi 1} = 0.101 \, \Omega$$

- постоянная времени генератора

$$T_a = 0.1 \, \text{s}$$

Параметры трансформаторов:

- мощность потерь КЗ в трансформаторе Т1

$$P_{kT1} = 170 \cdot \text{kW}$$

- мощность трансформатора Т1

$$S_{T1} = 40 \cdot \text{MW}$$

- номинальные напряжения Т1

$$U_{HT1} = 10.5 \cdot \text{kV}$$

$$U_{BT1} = 158 \cdot \text{kV}$$

- мощности потерь КЗ в обмотках трансформатора Т2

$$P_{kBC} = 220 \cdot \text{kW}$$

$$P_{kBH} = 180 \cdot \text{kW}$$

$$P_{kCH} = 140 \cdot \text{kW}$$

- мощность трансформатора Т2

$$S_{T2} = 80 \cdot \text{MW}$$

- номинальное напряжение Т2

$$U_{BT2} = 150 \cdot \text{kV}$$

$$U_{CT2} = 115 \cdot \text{kV}$$

$$U_{HT2} = 6.6 \cdot \text{kV}$$

Параметры линии:

- длина воздушной линии

$$L_{\text{л}} = 40 \cdot \text{km}$$

- сечение алюминиевых проводов

$$S_{\text{пров}} = 70 \cdot \text{mm}^2$$

- проводимость алюминия

$$\gamma_{\text{ал}} := 32 \cdot \frac{10^6}{\Omega \cdot \text{m}}$$

- для системы в задаче 1

$$X_{kR} = 7$$

- индуктивное приведенное сопротивление системы

$$X_{\Pi 7} = 0.013 \, \Omega$$

4.1.2. Расчеты для короткого замыкания в точке K1

Определяем сверхпереходное ЭДС:

СК:

$$E_{\text{нф,ск}} := \frac{U_{\text{срнт2}}}{U_{\text{ск}}} + I_{\text{ф,ск}} \cdot X_{\text{нф,дск}} = 1.075$$

АД:

$$E_{\text{нф,ад}} := \frac{U_{\text{срнт2}}}{U_{\text{ад}}} - I_{\text{ф,ад}} \cdot \frac{1}{k_{\text{пуск}}} \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi_{\text{ад}}}^2 = 0.959$$

Определяем токи короткого замыкания в точке K1 от СК, АД и обобщенной нагрузки:

$$I_{\text{ск}} := \frac{E_{\text{нф,ск}}}{X_{\text{нф,дск}}} \cdot \frac{Q_{\text{ск}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ск}}} = 2.937 \cdot \text{kA}$$

$$I_{\text{ад}} := \frac{E_{\text{нф,ад}}}{\frac{1}{k_{\text{пуск}}}} \cdot \frac{P_{\text{ад}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ад}} \cdot \cos \varphi_{\text{ад}}} = 2.076 \cdot \text{kA}$$

$$I_{\text{наг}} := \frac{E_{\text{нф,наг}}}{X_{\text{нф,наг}}} \cdot \frac{P_{\text{наг}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{наг}} \cdot \cos \varphi_{\text{наг}}} = 11.684 \cdot \text{kA}$$

Ток КЗ в точке K1 с учетом ТКЗ от системы

$$I_{\Sigma \text{К1}} := I_{\text{к1 тпм}} + I_{\text{ск}} + I_{\text{ад}} + I_{\text{наг}} = 94.049 \cdot \text{kA}$$

Определяем ударные коэффициенты для СК, АД и обобщенной нагрузки:

$$k_{\text{уск}} := 1 + e^{-\frac{0.01 \cdot s}{T_{\text{аск}}}} = 1.931$$

$$k_{\text{уад}} = 1.5$$

$$k_{\text{унаг}} = 1$$

Система (схема в задаче 1):

активное сопротивление генераторов:

$$R_{\text{п1}} := \frac{X_{\text{п1}}}{\frac{314}{1 \cdot \text{s}} \cdot T_{\text{а}}} = 3.218 \times 10^{-3} \Omega$$

активное сопротивление трансформаторов электростанции

$$R_{\text{п2}} := \frac{P_{\text{кт1}}}{S_{\text{т1}}} \cdot \frac{U_{\text{вт1}}^2}{2 \cdot S_{\text{т1}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{нт2}}}{U_{\text{вт2}}} \right)^2 = 2.568 \times 10^{-3} \Omega$$

активное сопротивление воздушной линии

$$R_{\Pi 3} := \frac{L_{\Pi}}{\gamma_{\text{ал}} \cdot S_{\text{пров}} \cdot 2} \cdot \left(\frac{U_{\text{HT2}}}{U_{\text{BT2}}} \right)^2 = 0.017 \Omega$$

Активные сопротивления трансформаторов подстанции.

Определяем потери мощности КЗ в обмотках трансформатора Т2.

$$P_{\text{KB}} := 0.5 \cdot (P_{\text{KBH}} + P_{\text{KBc}} - P_{\text{KcH}}) = 130 \cdot \text{kW}$$

$$P_{\text{Kc}} := 0.5 \cdot (P_{\text{KcH}} + P_{\text{KBc}} - P_{\text{KBH}}) = 90 \cdot \text{kW}$$

$$P_{\text{KH}} := 0.5 \cdot (P_{\text{KBH}} + P_{\text{KcH}} - P_{\text{KBc}}) = 50 \cdot \text{kW}$$

Активные сопротивления в относительных номинальных единицах

$$R_{\text{B}^*\text{H}} := \frac{P_{\text{KB}}}{S_{\text{T2}}} = 1.625 \times 10^{-3}$$

$$R_{\text{c}^*\text{H}} := \frac{P_{\text{Kc}}}{S_{\text{T2}}} = 1.125 \times 10^{-3}$$

$$R_{\text{H}^*\text{H}} := \frac{P_{\text{KH}}}{S_{\text{T2}}} = 6.25 \times 10^{-4}$$

Активные сопротивления в именованных единицах

$$R_{\Pi 4} := R_{\text{B}^*\text{H}} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 4.424 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_{\Pi 5} := R_{\text{H}^*\text{H}} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 1.702 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_{\Pi 6} := R_{\text{c}^*\text{H}} \cdot \frac{U_{\text{HT2}}^2}{2 \cdot S_{\text{T2}}} = 3.063 \times 10^{-4} \Omega$$

Схема замещения для активного сопротивления аналогична рис.1.8. Преобразуем ее:

$$R_{\Pi 10} := R_{\Pi 1} + R_{\Pi 2} + R_{\Pi 3} + R_{\Pi 4} = 0.024 \Omega$$

$$R_{\Pi 11} := R_{\Pi 6} + \frac{X_{\Pi 7}}{X_{\text{kR}}} = 2.188 \times 10^{-3} \Omega$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{\Pi \Sigma k1} := \frac{R_{\Pi 10} \cdot R_{\Pi 11}}{R_{\Pi 10} + R_{\Pi 11}} = 2.002 \times 10^{-3} \Omega$$

Постоянная времени переходного процесса

$$T_{k1} := \frac{X_{\Pi'' \Sigma k1}}{314 \cdot \frac{1}{s} \cdot R_{\Pi \Sigma k1}} = 0.076 \text{ s}$$

Ударный коэффициент для системы

$$k_{yc} := 1 + e^{-\frac{0.01 \cdot s}{T_{k1}}} = 1.877$$

Суммарный ударный ток КЗ в точке К1

$$i_{\Sigma yk1} := \sqrt{2} \cdot (k_{yc} \cdot I''_{k1 \text{ ППМ}} + k_{ycK} \cdot I''_{cK} + k_{yad} \cdot I''_{ад} + k_{yHag} \cdot I''_{Hag}) = 234.26 \cdot \text{kA}$$

4.1.3. Построение графиков токов короткого замыкания в точке К1

Диапазон времени для построения графиков

$$t := 0, 0.001 \dots 0.06$$

Графики ТКЗ системы (рис. 4.6)

Периодическая составляющая ТКЗ

$$i_{c\Pi}(t) := -\sqrt{2} \cdot I''_{k1 \text{ ППМ}} \cdot \cos(314 \cdot t)$$

Апериодическая составляющая ТКЗ

$$i_{ca}(t) := \sqrt{2} \cdot I''_{k1 \text{ ППМ}} \cdot e^{-\frac{t \cdot s}{T_{k1}}}$$

Полный ток короткого замыкания

$$i_c(t) := i_{c\Pi}(t) + i_{ca}(t)$$

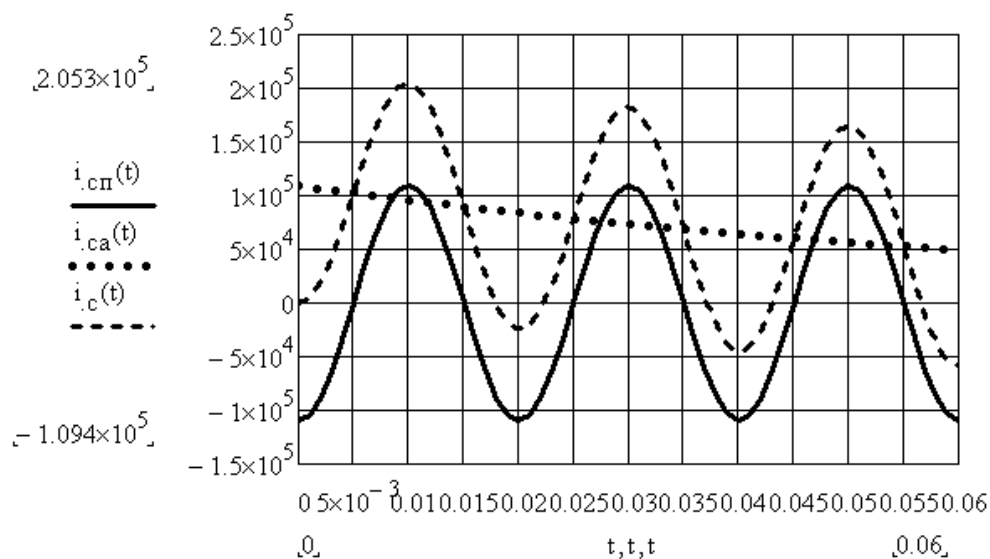


Рис. 4.6. Графики периодического, апериодического и полного токов в точке К1

Графики ТКЗ СК (рис. 4.7)

Периодическая составляющая ТКЗ

$$i_{cK\Pi}(t) := -\sqrt{2} \cdot I''_{cK} \cdot \cos(314 \cdot t)$$

Апериодическая составляющая ТКЗ

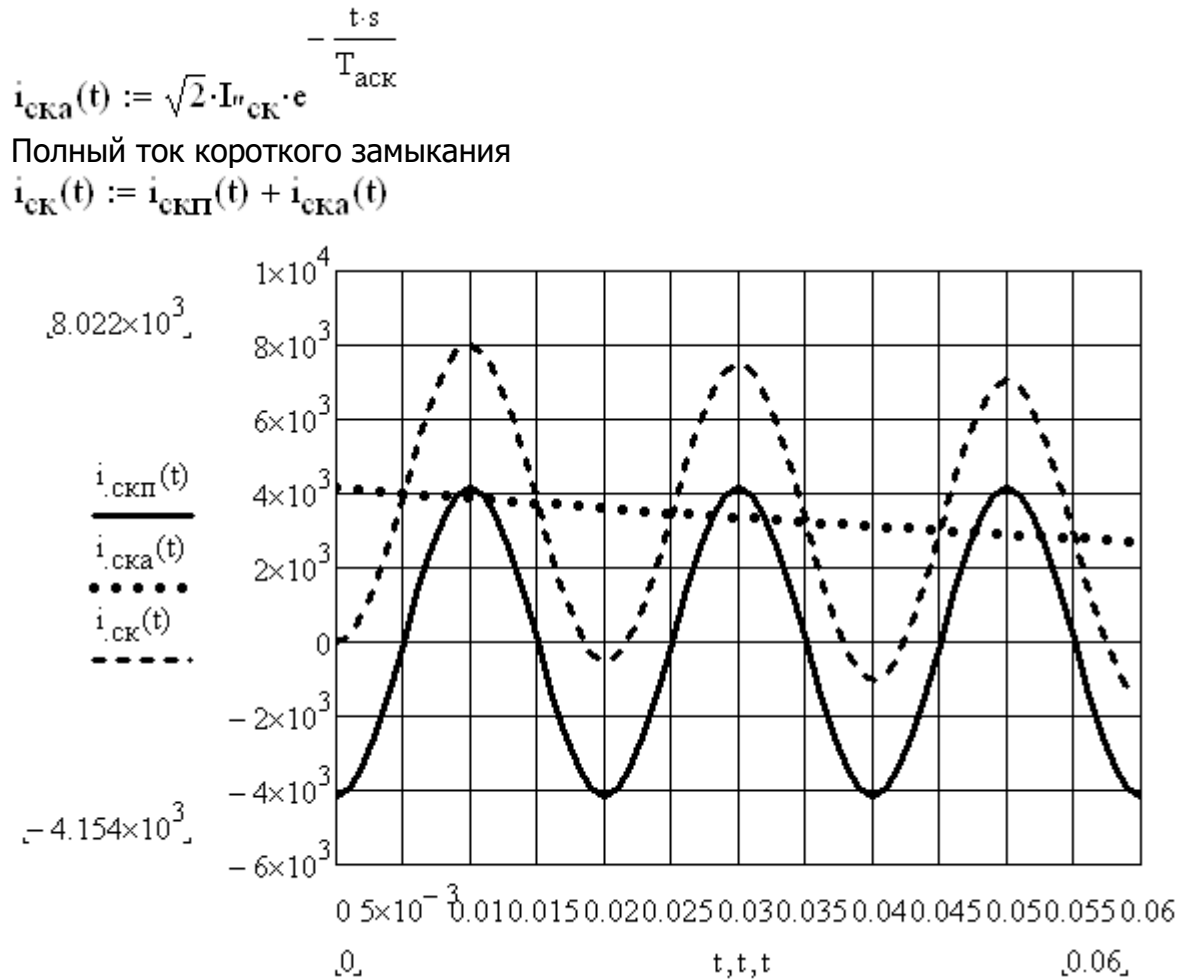


Рис. 4.7. Графики периодического, аperiodического и полного токов синхронного компенсатора

$$T_{\text{наг}} := 0.025 \cdot s$$

Графики ТКЗ нагрузки (рис. 4.8)

Периодическая составляющая ТКЗ

Аperiodическая составляющая ТКЗ

Полный ток короткого замыкания

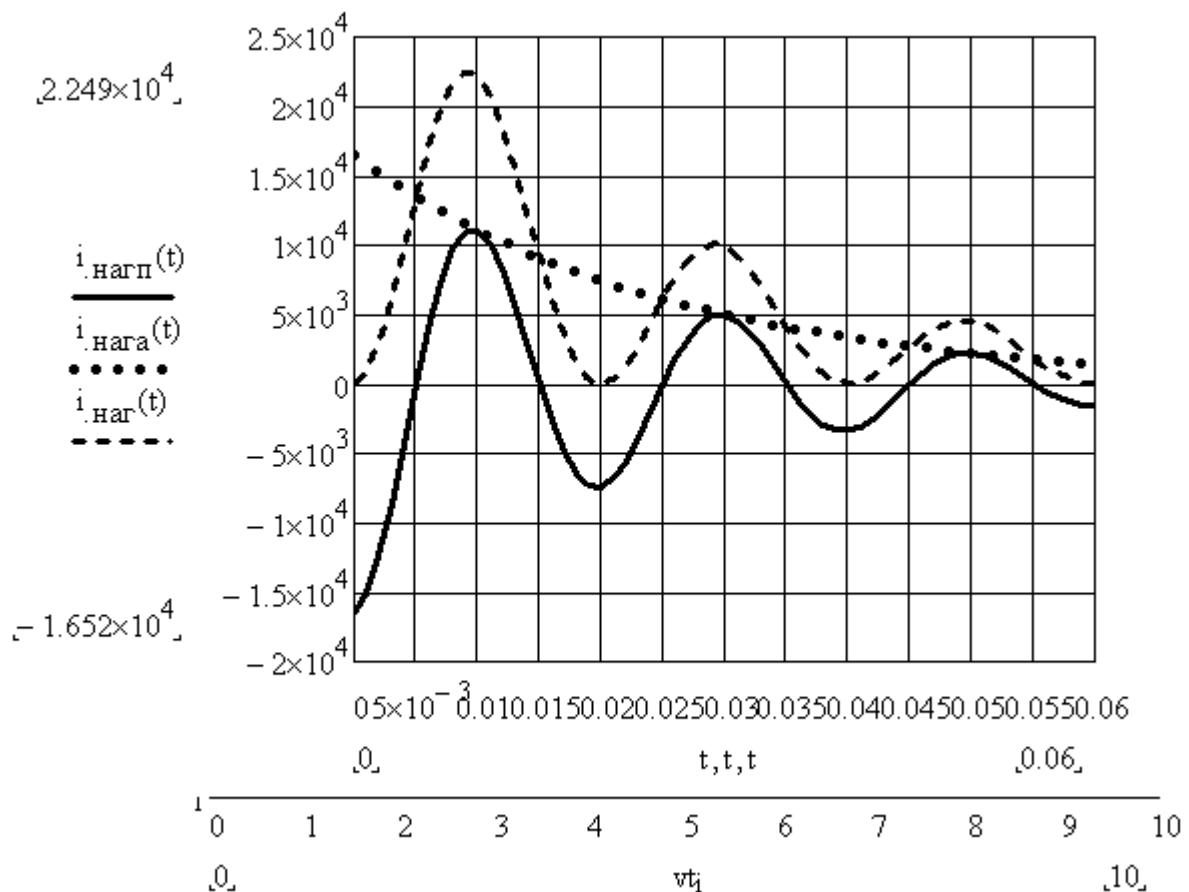


Рис. 4.8. Графики периодического, апериодического и полного токов обобщенной нагрузки

4.1.4. Расчеты для короткого замыкания в точке Кр.

Нагрузку и АД не учитываем. Применяем метод приближенного расчета в относительных единицах, тогда

$$E_{н\#} := 1$$

Расчет сопротивлений в относительных единицах СК:

$$X_{\#СК} := X_{н\#дСК} \cdot \frac{S_{\delta}}{Q_{СК}} = 32$$

Реактора

$$X_{\#P} := \frac{X_{рст\%}}{100\cdot\%} \cdot \frac{I_{ср\delta 1}}{I_{нр}} \cdot \frac{U_{нр}}{U_{ср\delta 1}} = 15.274$$

Эквивалентное сопротивление до точки Кр

$$X_{н\#\Sigma Кр} := \frac{X_{н\#\Sigma К1} \cdot X_{\#СК}}{X_{н\#\Sigma К1} + X_{\#СК}} + X_{\#P} = 16.334$$

Сверпереходный ток КЗ в точке К.р

$$I_{\#Кр} := \frac{E_{н\#}}{X_{н\#\Sigma Кр}} \cdot I_{ср\delta 1} = 5.611 \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах при КЗ за реактором

$$U_{ост} := \frac{E_{н\phi}}{X_{н\phi \Sigma_{кр}}} \cdot X_{\phi p} \cdot 100 \cdot \% = 93.508 \cdot \%$$

Контрольные вопросы к главе 4

1. Выражение для переходного тока КЗ с максимальной апериодической слагающей.
2. Когда возникают апериодические слагающие токов.
3. Что отражает постоянная времени электрической цепи.
4. Что такое ударный ток и ударный коэффициент.
5. Пределы изменения $k_{уд}$.
6. Действующее значение ударного тока КЗ.
7. Цель расчета $k_{уд}$ и $I_{уд}$.

Задача 4.1

Используя данные задачи №1 (глава 1) произвести расчет ударного тока КЗ при трехфазном КЗ (в заданной на схеме рис.1.7 точке КЗ) в относительных базисных единицах с приближенным приведением коэффициентов трансформации. Длину и сечение линий выбрать по их номинальным напряжениям.

Активные сопротивления генераторов и трансформаторов определить используя данные табл.4.1, воздушных линий – используя рекомендации главы 1.

5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Аналитическое исследование электромагнитного переходного процесса в электрических машинах представляет достаточно сложную задачу. Для ее упрощения вводится ряд допущений:

- учитывается только периодическая слагающая тока статора;
- скорость ротора считается неизменной и равной ω ;
- рассматривается синхронная машина, работающая отдельно от других источников питания;
- трансформаторные ЭДС принимаются равными нулю, вследствие того, что обобщенные векторы потоков изменяются медленно.

Таким образом, в дальнейшем рассматривается в известной мере идеализированная машина. Это вносит погрешности в оценку отдельных величин. Однако, как показывают сопоставления полученных величин с экспериментальными данными, обычно погрешности находятся в допустимых пределах.

5.1. Уравнения синхронной машины в фазных координатах

Принципиальная схема синхронной машины, ротор которой имеет явновыраженные полюсы, представлена на рис.5.1. Первоначально предположим, что синхронная машина не имеет демпферных обмоток.

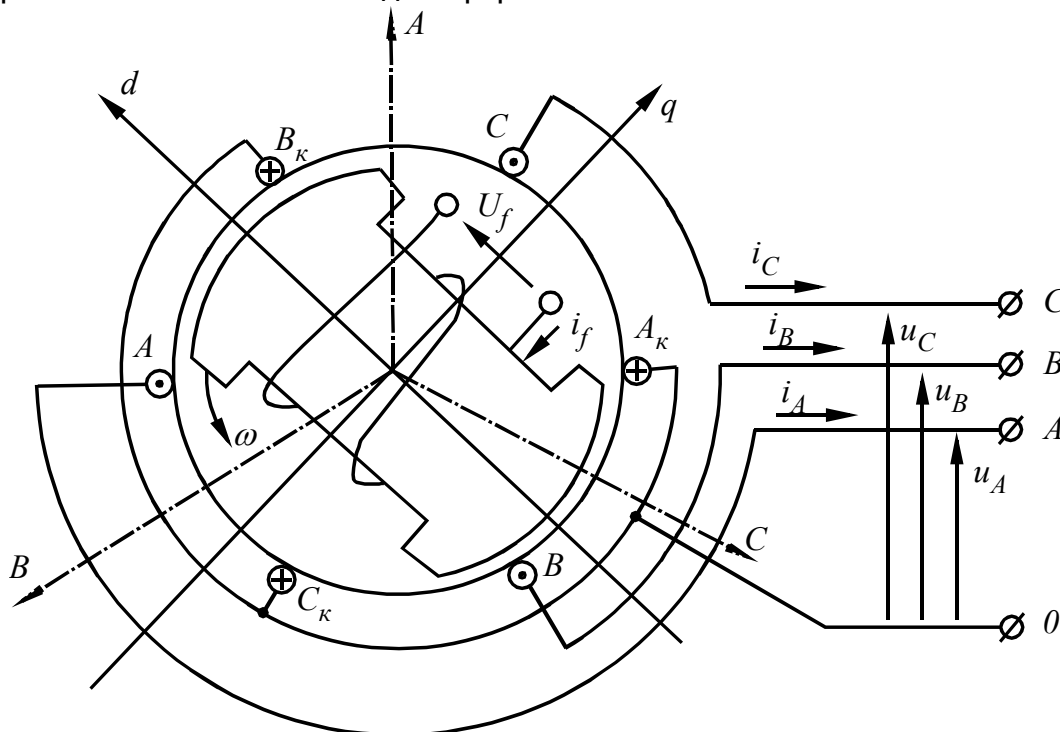


Рис.5.1. Принципиальная схема явнополюсной синхронной машины

Дифференциальные уравнения для каждой из обмоток синхронной машины

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A &= u_A \\ \frac{d\Psi_B}{dt} - Ri_B &= u_B \\ \frac{d\Psi_C}{dt} - Ri_C &= u_C \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\}, \quad (5.1)$$

где R, R_f - активные сопротивления контуров каждой фазы цепи возбуждения соответственно, $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f$ - результирующие потокосцепления обмоток статора и обмотки возбуждения соответственно, u_A, u_B, u_C, u_f - напряжения на зажимах соответствующих обмоток.

При принятых допущениях выражения для потокосцеплений представляют линейные зависимости. Так для потокосцепления фазы А

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f,$$

где L_A - индуктивность фазы А; M_{AB}, M_{AC}, M_{Af} - взаимоиנדуктивности фазы А с фазами В и С и обмоткой возбуждения (индекс f) соответственно.

Аналогично

$$\Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f,$$

где L_f - индуктивность обмотки возбуждения. Необходимо отметить, что по принципу взаимности $M_{AB} = M_{BA}, M_{Af} = M_{fA}$ и т.д.

Параметры L и M зависят от положения ротора относительно обмоток статора и, следовательно, являются функциями времени (только индуктивность обмотки возбуждения L_f можно считать неизменной).

Положение ротора будем характеризовать углом $\gamma = f(t)$ между магнитной осью фазы А и продольной осью d (рис.5.2).

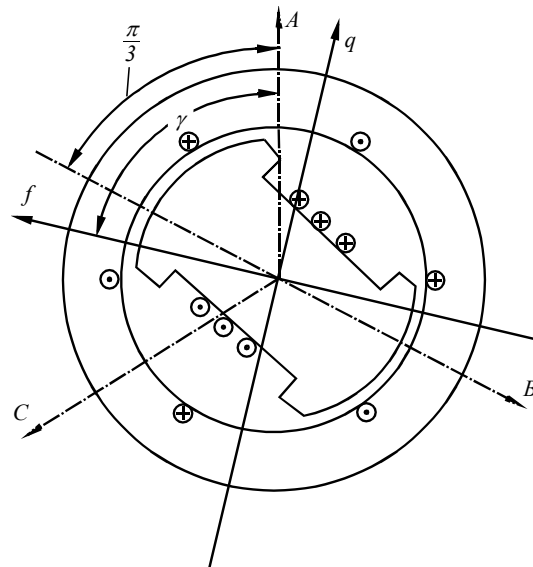


Рис. 5.2. К определению пространственного ротора

Синусоидальность наводимых в статоре ЭДС указывает на закон изменения взаимных индуктивностей между обмоткой возбуждения и каждой из фазных обмоток. Так, например, для фазы А

$$M_{Af} = M_{fA} = M_d \cos \gamma,$$

где M_d - максимальное значение взаимоиנדукции при совпадении магнитных осей обмоток.

Изменение индуктивностей фазных обмоток и взаимных индуктивностей между ними обусловлены вращением явнополюсного ротора, поскольку при этом меняется сопротивление магнитным потокам, которые определяют данные величины. Изменение магнитных потоков происходит гармонически с периодом $T_1 = T/2$, так как при повороте ротора на 180° повторяется предыдущий цикл изменения магнитного сопротивления.

Так, например, индуктивность фазы A определяется выражением,

$$L_A = l_0 + l_2 \cos 2\gamma,$$

взаимная индуктивность между обмотками фаз A и B

$$M_{AB} = m_0 + m_2 \cos 2(\gamma - \pi/3),$$

где l_0, m_0 - постоянные составляющие соответствующих индуктивностей; l_2, m_2 - амплитуды вторых гармоник соответствующих индуктивностей.

Аналогично могут быть записаны выражения для L и M для остальных обмоток.

Таким образом, коэффициенты в уравнениях системы (5.1) являются переменными, что значительно усложняет ее решение. (Дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами называются параметрическими; аналитическое решение имеют только немногие из них).

5.2. Обобщенный вектор трехфазной системы и замена переменных синхронной машины

Мгновенные значения токов (напряжений, потоков и т.п.) трехфазной системы можно получить, проектируя один вектор на три оси времени, расположенные под углом 120° (рис.5.3,а). Такой вектор называется обобщенным (или изображающим) вектором трехфазной системы. При его вращении в ту же сторону, что и системы трех векторов, чередование осей времени фаз нужно заменить на противоположное.

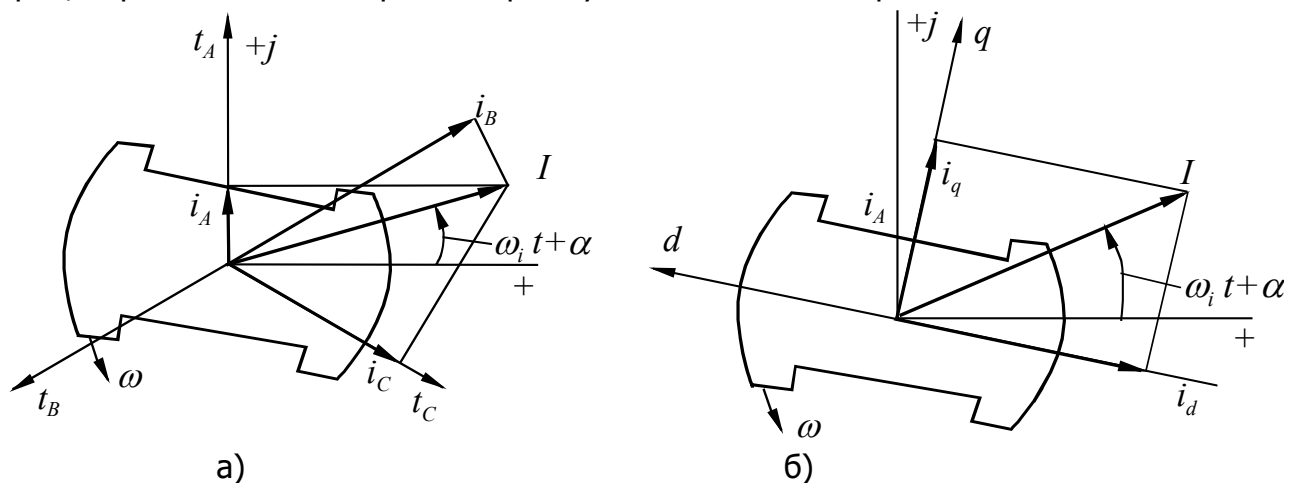


Рис.5.3. Обобщенные векторы трехфазной системы

Замена фазных переменных величин обобщенным вектором позволяет разложить его на продольную (d) и поперечную (q) составляющие. Оси $d, q, 0$ образуют декартову систему координат, вращающуюся вместе с ротором. Переход от неподвижной фазной системы координат A, B, C к вращающейся, жестко связанной с ротором системы $d, q, 0$ был впервые предложен Блонделем для установившегося режима. Парком Р.Х. и Горевым А.А. такой подход был распространен на переходный режим. Это позволяет параметрическую систему уравнений (5.1) свести к системе дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, что упрощает ее решение.

Величина обобщенного вектора I может быть определена исходя из следующих равенств

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I \sin(\omega_i t + \alpha), \\ i_B &= I \sin(\omega_i t - \pi/3 + \alpha), \\ i_C &= I \sin(\omega_i t + \pi/3 + \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где ω_i - угловая скорость обобщенного вектора I , которая в переходном режиме может отличаться от угловой скорости вращения ротора ω , α - начальный угол обобщенного вектора относительно оси, перпендикулярной оси обмотки А.

Если возвести равенства (5.2) в квадрат и просуммировать их, то получим величину обобщенного вектора

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}.$$

Фазные токи на основе рис.5.3,6 (при $I_0=0$) :

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma \\ i_B &= i_d \cos(\gamma - 2\pi/3) + i_q \sin(\gamma - 2\pi/3) \\ i_C &= i_d \cos(\gamma + 2\pi/3) + i_q \sin(\gamma + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} . \quad (5.3)$$

5.3. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины

В уравнение для фазы А обмотки статора (из системы (5.1))

$$\frac{d\Psi_A}{dt} - Ri_A = u_A$$

подставим выражения для фазных величин (Ψ , i , u), выраженные через обобщенные векторы в продольной и поперечной осях ротора (из системы 5.3))

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma, u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma, \Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma.$$

С помощью этой подстановки заменим фазные переменные обобщенными. После дифференцирования и преобразования получим

$$\left(u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d\right) \cos \gamma + \left(u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q\right) \sin \gamma = 0. \quad (5.4)$$

Равенство (5.4) может быть удовлетворено при любом значении γ , только при условии, что каждое выражение в скобках тождественно равно нулю. Приравнявая выражения в скобках к нулю, получим два уравнения. Добавим к полученным уравнениям уравнение для обмотки возбуждения из системы (5.1), получим систему уравнений при отсутствии демпферных контуров

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d &= -u_d \\ \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q &= -u_q \\ \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f &= u_f \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Полученные уравнения называются уравнениями Парка-Горева. Они выражают теорию двух реакций обмоток статора синхронной машины и характеризуют переходный процесс в ней. Входящие в систему дифференциальные уравнения имеют постоянные коэффициенты.

Слагаемые $\frac{d\Psi_d}{dt}$, $\frac{d\Psi_q}{dt}$ представляют ЭДС трансформации, так как наводятся в обмотках статора и ротора благодаря изменению потокоцеплений. Трансформаторные ЭДС наводятся в переходном режиме, в стационарном режиме они отсутствуют.

Слагаемые, содержащие $\frac{d\gamma}{dt}$, представляют собой ЭДС вращения (резания), которые наводятся в обмотках статора благодаря вращающему полю. В обмотках ротора в стационарном режиме эти ЭДС отсутствуют, так как не создают в них

изменяющегося потока. В переходном режиме происходит перемещение обобщенного вектора потока относительно ротора и в его обмотках наводятся ЭДС скольжения. Потокосцепления Ψ_d и Ψ_q включают потоки рассеяния обмоток статора. Полные синхронные индуктивности $L_d = L_{ad} + L\sigma$, $L_q = L_{aq} + L\sigma$. При принятом положительном направлении потока из ротора в статор результирующее потокосцепление можно выразить через обобщенные векторы токов ротора и статора

$$\Psi_d = L_{ad}i_f - L_d i_d, \quad \Psi_q = -L_q i_q.$$

5.4. Трехфазное короткое замыкание синхронной машины

5.4.1. Переходный процесс в синхронной машине без демпферных обмоток при отключенном регуляторе возбуждения. При указанных выше допущениях и учитывая, что в месте КЗ $u_d = u_q = 0$ из первого и второго уравнений системы (5.5) путем несложных преобразований можно получить

$$I = \frac{E_q}{\sqrt{x_d'^2 + R^2}}, \quad (5.6)$$

где $E_q = Ri_q + x_d i_d$ - синхронная ЭДС в установившемся режиме. Выражение (5.6) может быть использовано для расчета переходного режима при заданных значениях E'_q и x'_d .

Изменение во времени действующего значения периодической слагающей тока получим из третьего уравнения системы (5.5)

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f = u_f.$$

Разделим это уравнение на R_f , и учитывая, что $\Psi_f = L_f i_f$, получим

$$\frac{L_f}{R_f} \frac{di_f}{dt} + i_f = \frac{u_f}{R_f}, \quad (5.7)$$

где $i_{fe} = \frac{u_f}{R_f}$ - вынужденный ток возбуждения.

Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора

$$T_{f0} = \frac{L_{f0}}{R_f},$$

при замкнутой обмотке статора постоянная времени свободного переходного тока статора

$$T'_d = T_{f0} \frac{x'_d}{x_d}.$$

С учетом последнего выражения перепишем уравнение (5.7) в виде

$$T'_d \frac{di_f}{dt} + i_f = i_{fe}. \quad (5.8)$$

Так как относительных единицах ток возбуждения равен ЭДС $i_{f*} = E_{q*}$, то (5.8) представим в виде

$$T'_d \frac{dE_q}{dt} + E_q = E_{qe}, \quad (5.9)$$

где E_{qe} - вынужденная ЭДС, создаваемая возбудителем, равная при отключенном регуляторе возбуждения ЭДС предшествующего режима.

Решение дифференциального уравнения (5.9)

$$E_q = (E_{q0} - E_{qe}) \exp(-t/T'_d) + E_{qe}, \quad (5.10)$$

где E_{q0} - начальная полная ЭДС в первый момент КЗ с учетом возрастания за счет свободных токов ответной реакции ротора.

В соответствие с (5.6) разделим все члены уравнения (5.10) на $(x_d + x_{вн})$ ($x_{вн}$ - внешнее сопротивление по отношению к синхронной машине), пренебрегая активными сопротивлениями; получим действующее значение тока в любой момент времени

$$I_t = I_{dt} = (I'_0 - I_\infty) \exp(-t/T'_d) + I_\infty = I'_{cb.0} \exp(-t/T'_d) + I_\infty \quad (5.11)$$

где $I'_{cb.0} = I'_0 - I_\infty$ - начальный свободный переходный ток.

Начальный переходный ток КЗ определяется из формулы

$$I'_0 = \frac{E'_q}{x'_d + x_{BH}},$$

установившейся ток, соответствующий принужденной ЭДС E_{qe}

$$I_\infty = \frac{E_{qe}}{x_d + x_{BH}}.$$

Выражение (5.11) определяет обобщенный ток трехфазной системы токов статора. Кривая действующего значения тока, соответствующая (5.11) приведена на рис.5.4. С течением времени в следствии реакции статора происходит размагничивание магнитной системы машины, что приводит к уменьшению тока в обмотке возбуждения L_f и пропорциональных ему E'_q и I_t .

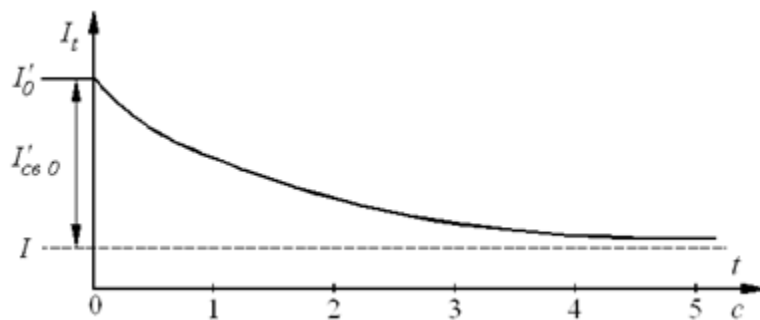


Рис.5.4. Действующего значение тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины без демпферных обмоток

Следует дополнительно отметить появление небольших токов второй гармоники в статоре явнополюсной машины (гидрогенератора) вследствие несимметрии ротора по продольной и поперечной осям. Благодаря демпферной обмотке вторая гармоника практически уничтожается.

5.4.2. Влияние демпферных обмоток на ток короткого замыкания. Упрощенно можно считать, что демпферная обмотка приводит к возникновению дополнительного свободного сверхпереходного тока

$$I''_{cb} \approx I''_{dcb} = (I'' - I') \exp(-t/T''_d)$$

где T''_d - постоянная времени демпферной обмотки при замкнутой обмотке статора, $I''_0 = E''_q / (x''_d + x_{BH})$ - начальный сверхпереходный ток.

Ток КЗ в любой момент времени

$$I_t = I''_{cb.0} \exp(-t/T''_d) + I'_{cb.0} \exp(-t/T'_d) + I_\infty. \quad (5.12)$$

Выражение (5.12) с двумя постоянными времени с допустимой для практики погрешностью (10-15%) позволяет определить периодический ток. В действительности процесс протекает сложнее. Демпферные обмотки и тело ротора имеют много контуров, свободные токи вначале протекают по поверхности, постепенно проникая внутрь. Магнитная связь между продольной демпферной обмоткой и обмоткой возбуждения исключает независимое изменение тока в любой из них.

В начальный момент ответная реакция ротора проявляется благодаря демпферной обмотке. Затем апериодический ток проникает в демпферную обмотку. Демпферная обмотка несколько увеличивает свободный переходный ток (выражение 5.12), но уменьшает его постоянную времени.

Кривая тока в соответствии с выражением (5.12) приведена на рис.5.5.

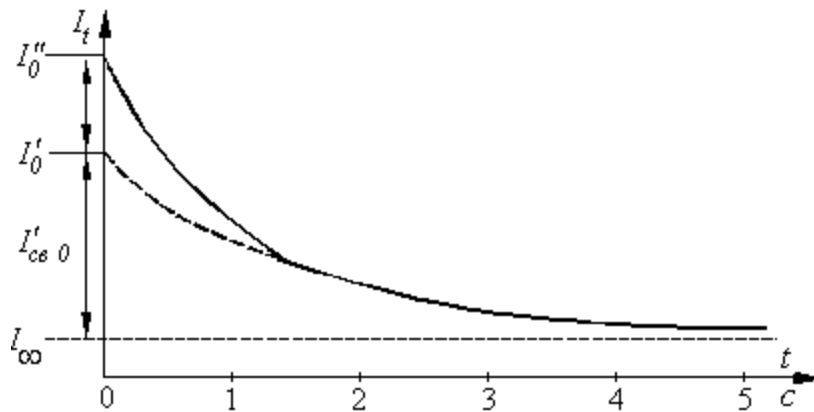


Рис.5.5. Действующего значение тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины без демпферных обмоток

5.4.3. Учет и влияние автоматического регулятора возбуждения. Под устройством автоматического регулирования возбуждения (АРВ) в данном разделе будем понимать простейшее устройство релейной форсировки возбуждения, которое приходит в действие при определенном снижении напряжения генератора (например, при КЗ). Релейная форсировка является простой, но эффективной мерой повышения устойчивости работы генераторов, а также потребителей электроэнергии. Последняя характеризуется предельным (потолочным) током возбуждения, скоростью нарастания напряжения и вынужденного тока возбуждения.

Существенной особенностью данного режима работы является нелинейность характеристики возбудителя и машины (вследствие насыщения зубцов ротора и других элементов пути магнитного потока).

Для упрощения решения задачи расчета тока КЗ характеристики машины будем считать линейными, соответствующими некоторому среднему насыщению. При этом можно считать, что действие АРВ заключается в увеличении тока КЗ (независимо от наличия демпферных обмоток). Выражение для тока КЗ можно представить в виде

$$I_t = I_{t \text{ без АРВ}} + \Delta I_{np} F(t) \quad (5.13)$$

где ΔI_{np} - предельное приращение установившегося тока КЗ за счет АРВ, $F(t)$ – функция, определяющая закон приращения во времени синхронной ЭДС вследствие форсировки возбуждения машины (зависит от постоянных времени сверхпереходного тока и обмотки возбуждения); $I_{t \text{ без АРВ}}$ - периодическая слагающая тока КЗ при отключенном АРВ (вычисляется по формулам (5.11) или (5.12) в зависимости от наличия демпферных обмоток). Кривая тока КЗ при

наличии АРВ приведена на рис.5.6. Действие АРВ начинает проявляться спустя некоторое время после КЗ (около 0,5 с) вследствие инерции магнитных потоков, сцепленных с обмотками.

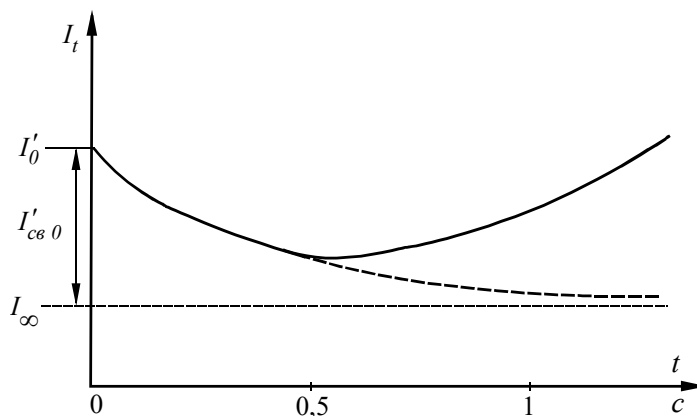


Рис.5.6. Действующего значение тока КЗ при замыкании на выводах статора синхронной машины с АРВ

Выражение (5.13) предполагает увеличение тока возбуждения до предельного значения, что соответствует близким КЗ. При удаленных КЗ напряжение генератора через 1-5 с может достигнуть номинального U_H , после чего АРВ поддерживает ток возбуждения на достигнутом уровне. При этом ток КЗ в генераторе, также неизменный

$$I_t = \frac{U_H}{x_{BH}}.$$

При включенном АРВ затухание свободных оков, возникших при КЗ, компенсируется увеличением токов от действия АРВ.

5.4.4. Расчет периодической составляющей тока короткого замыкания методом типовых кривых.

Наиболее важным и характерным является начальное значение периодической слагающей тока КЗ. В ряде случаев требуется учитывать изменение периодической слагающей тока КЗ: для проверки термической устойчивости аппаратов, отключаемого тока, анализа действия релейной защиты.

Для расчета периодической слагающей тока КЗ в разные моменты времени переходного режима используется инженерный метод типовых кривых (рис. 5.7., а, в.). Известно, что параметры турбо- и гидрогенераторов различны, поэтому характер изменения тока во времени различен даже при одинаковой удаленности КЗ. Авторами метода типовых кривых на основании многочисленных расчетов по уравнениям Парка-Горева с использованием ЭВМ удалось получить средние кривые изменения тока для турбо- и гидрогенераторов. Они выражены в относительных единицах. Максимальная погрешность усреднения не превышает 10%, что является приемлемым для практических расчетов. Использование типовых кривых рекомендуется для турбогенераторов мощностью 12,5 – 800 МВт, гидрогенераторов до 500 МВт и всех крупных синхронных компенсаторов.

Типовые кривые представляют собой относительные значения токов (отнесены к сверхпереходным токам генератора) для различных моментов времени t . Для учета удаленности КЗ введено отношение начального тока КЗ генератора $I''_{кГ}$ к его номинальному току $I^{\circ}_{ном}$, т.е. $I_{H.G*} = I''_{кГ} / I^{\circ}_{ном}$, характеризующие кратность тока КЗ к номинальному току.

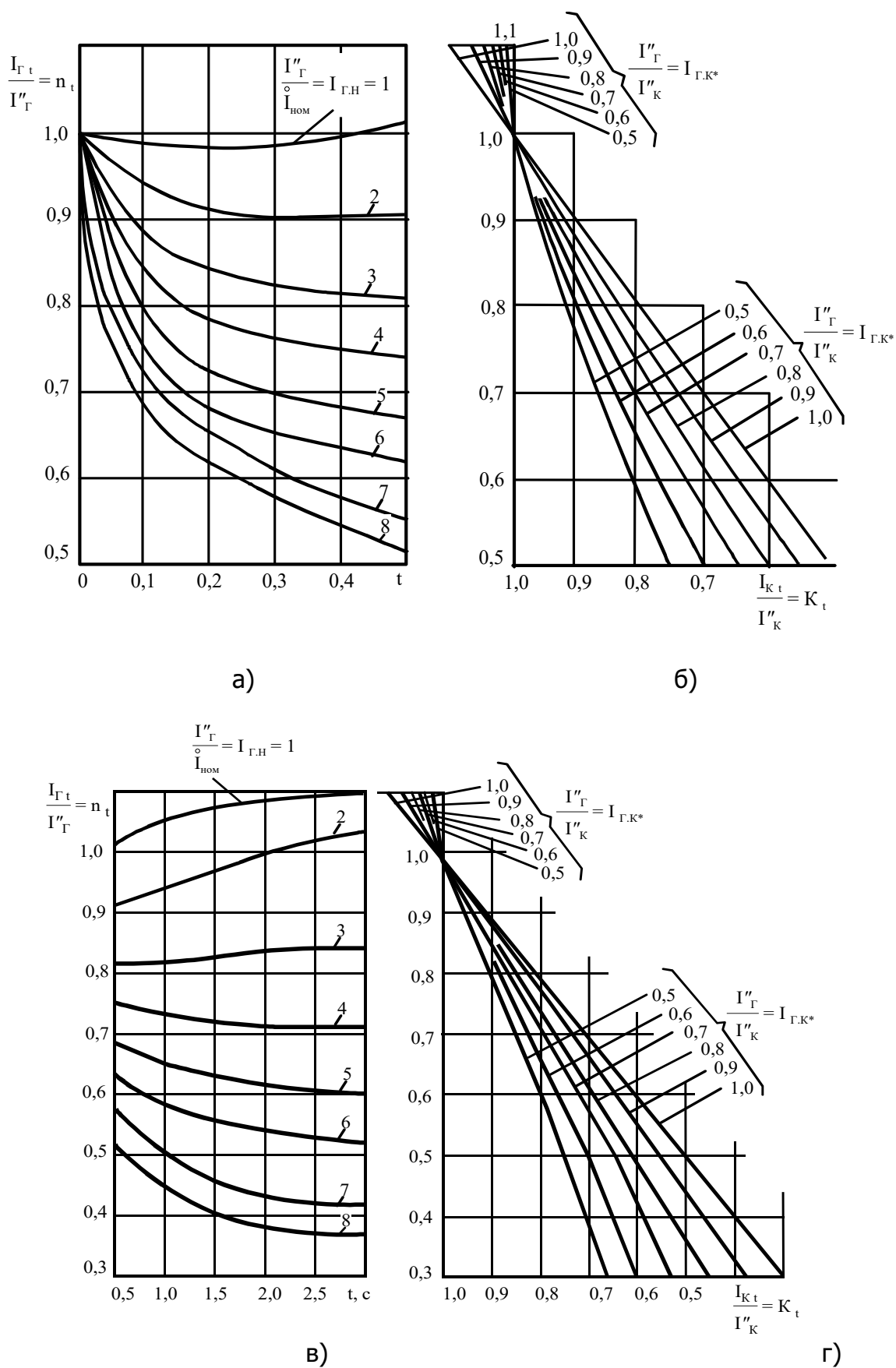


Рис.5.7. Типовые кривые синхронной машины

Таким образом, типовые кривые представляют собой семейство кривых $f(t) = I_{\Gamma t}''/I_{\Gamma}''$ при различных значениях $I_{\Gamma t}''/I_{\text{НОМ}}'' = \text{const}$, которые характеризуют изменение во времени относительного тока.

Во многих случаях систему нельзя представить одним генератором, так как многие электрические станции имеют различную удаленность от места КЗ и, следовательно, различную скорость затухания периодической слагающей. В этом случае схему замещения представляют в виде двух источников: эквивалентного генератора станции и системы бесконечной мощности, у которой периодическая слагающая тока КЗ постоянна (рис.5.8).

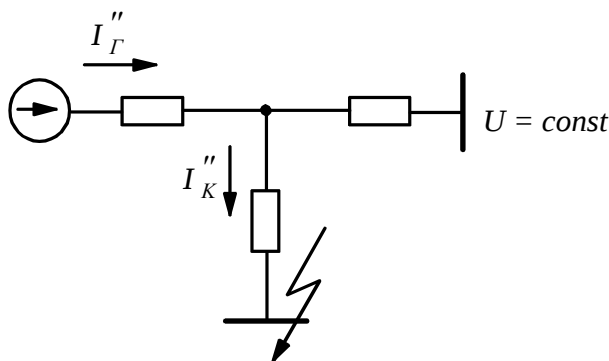


Рис.5.8. Схема замещения системы с двумя источниками: эквивалентный генератор станции и система бесконечной мощности

Для учета влияния системы Ульянов С.А. предложил ввести еще одну зависимость $I_{\Gamma, \text{КЗ}}'' = I_{\Gamma}''/I_K''$ (рис. 5.7,б,г), удобную для непосредственного определения тока в месте КЗ. Кривые на рис. 5,7,а, б построены для диапазона времен 0-0,5 с; кривые на рис.5.7, в, г – для диапазонов времен 0,5-3 с.

Расчет токов КЗ с помощью типовых кривых при отсутствии системы бесконечной мощности производится в следующей последовательности.

1. Составляется схема замещения для начального сверхпереходного режима. Все генераторы и нагрузки вводятся своими сверхпереходными ЭДС.

2. Схема замещения преобразуется (упрощается) относительно точки КЗ и определяются эквивалентные ЭДС E_{Σ}'' и сопротивление x_{Σ}'' .

3. С помощью найденных значений ЭДС и сопротивления определяется начальный ток КЗ от обобщенного генератора I_{Γ}'' (при расчете без учета нагрузок он равен току в месте КЗ).

4. Определяется номинальный ток генераторов, приведенный к ступени КЗ

$$I_{\text{НОМ}}'' = \frac{P_{\text{Э.НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}\cos\varphi_{\text{Н}}},$$

где $P_{\text{Э.НОМ}}$ - номинальная мощность всех генераторов станции, $U_{\text{НОМ}}$ - напряжение генератора, приведенное к ступени КЗ (среднее номинальное напряжение ступени КЗ), $\cos\varphi_{\text{Н}}$ - коэффициент мощности.

5. По найденным в п.п. 3 и 4 значениям I_{Γ}'' и $I_{\text{НОМ}}''$ определяется кратность начального тока КЗ генератора

$$I_{\Gamma, \text{НЗ}}'' = I_{\Gamma}''/I_{\text{НОМ}}''.$$

Для заданных моментов времени определяются действующие значения периодической составляющей тока КЗ, используя найденные по кривым значения n_t

$$I_{\Gamma t} = I_{\Gamma}''n_t.$$

Пример 5.1.

Построение кривых изменения тока КЗ.

Для схемы рис.1.7 произвести расчет тока электростанции при КЗ в точках К1 и КЗ по методу расчетных кривых. Построить изменение токов и напряжений на шинах станции во времени.

5.1.1. Расчеты для точки К1.

Используем схему на рис 1.7. с приведенными параметрами для приближенного расчета в именованных единицах:

$$X_{\text{шн10}} = 0.187 \Omega$$

$$X_{\text{шн11}} = 0.012 \Omega$$

$$X_{\text{шн5}} = 0.032 \Omega$$

Преобразуем схему замещения к виду с независимыми ветвями для источников, преобразуя звезду в треугольник

$$X_{\text{шнк1}} := X_{\text{шн10}} + X_{\text{шн5}} + \frac{X_{\text{шн10}} \cdot X_{\text{шн5}}}{X_{\text{шн11}}} = 0.72 \Omega$$

Другие стороны многоугольника не понадобятся.

Определяем расчетное сопротивление в относительных номинальных единицах:

$$X_{\text{расчк1}} := X_{\text{шнк1}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{нГ}}}{\cos \varphi_{\text{Г}} \cdot U_{\text{срнГ2}}^2} = 1.996$$

По аппроксимированным расчетным кривым для турбогенераторов определяем токи КЗ для различных моментов времени:

$$vt := \begin{pmatrix} 0 \cdot s \\ 0.2 \cdot s \\ 1 \cdot s \\ 2 \cdot s \\ 4 \cdot s \\ 10 \cdot s \end{pmatrix}$$

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в относительных номинальных и номинальных единицах при t=0 сек:

$$I_{\text{шк10}} := 1.051 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-1.04} = 0.512$$

при t=0.2 сек:

$$I_{\text{шк11}} := 1.01 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-1} = 0.506$$

при t=1 сек:

$$I_{\text{шк12}} := 1.026 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-0.95} = 0.532$$

при $t=2$ сек:

$$I_{\text{ПК1}_3} := 1.086 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-0.94} = 0.567$$

при $t=4$ сек:

$$I_{\text{ПК1}_4} := 1.148 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-0.97} = 0.587$$

при $t=10$ сек (установившийся режим):

$$I_{\text{ПК1}_5} := 1.178 \cdot X_{\text{расчк1}}^{-0.97} = 0.602$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в относительных номинальных единицах

$$I_{\text{ПК1}} = \begin{pmatrix} 0.512 \\ 0.506 \\ 0.532 \\ 0.567 \\ 0.587 \\ 0.602 \end{pmatrix}$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в номинальных единицах

$$I_{\text{ПК1}} := I_{\text{ПК1}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{нг}}}{\cos \varphi_{\Gamma} \cdot U_{\text{срнг2}}^2} = \begin{pmatrix} 8.941 \\ 8.833 \\ 9.289 \\ 9.9 \\ 10.25 \\ 10.518 \end{pmatrix} \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах станции при КЗ в точке К1.

Резльтирующее сопротивление в относительных номинальных единицах от шин до точки короткого замыкания К1:

$$X_{\text{ншк1}} := X_{\text{расчк1}} - X_{\text{шт"1}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{нг}}}{\cos \varphi_{\Gamma} \cdot U_{\text{срнг2}}^2} = 1.766$$

Массив остаточных напряжений в относительных номинальных единицах

$$U_{\text{нш1}} := X_{\text{ншк1}} \cdot I_{\text{ПК1}} = \begin{pmatrix} 0.905 \\ 0.894 \\ 0.94 \\ 1.002 \\ 1.037 \\ 1.064 \end{pmatrix}$$

5.1.2. Расчеты при коротком замыкании в точке КЗ

Используем схему на рис. 1.7. Расчет сопротивлений генераторов:

$$X_{\text{гг1}} := X_{\text{дг}} \cdot \frac{\cos \varphi_{\text{г}} \cdot U_{\text{срвт1}}^2}{2 \cdot P_{\text{нг}}} = 49.588 \Omega$$

трансформаторов Т1:

$$X_{\text{тг2}} := \frac{u_{\text{кт1}}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{срвт1}}^2}{2 \cdot S_{\text{т1}}} = 29.645 \Omega$$

Определяем результирующее сопротивление до точки КЗ

$$X_{\text{сгкз}} := X_{\text{гг1}} + X_{\text{тг2}} = 79.233 \Omega$$

Определяем расчетное сопротивление до точки КЗ:

$$X_{\text{расчкз}} := X_{\text{сгкз}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{нг}}}{\cos \varphi_{\text{г}} \cdot U_{\text{срвт1}}^2} = 0.368$$

По аппроксимированным расчетным кривым для турбогенераторов определяем токи КЗ в точке КЗ для различных моментов времени:

Периодическая составляющая тока короткого замыкания в относительных номинальных и номинальных единицах при t=0 сек:

$$I_{\text{пкз0}} := 1.051 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-1.04} = 2.977$$

при t=0.2 сек:

$$I_{\text{пкз1}} := 1.01 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-1} = 2.748$$

при t=1 сек:

$$I_{\text{пкз2}} := 1.026 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-0.95} = 2.656$$

при t=2 сек:

$$I_{\text{пкз3}} := 1.086 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-0.94} = 2.783$$

при t=4 сек:

$$I_{\text{пкз4}} := 1.148 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-0.97} = 3.031$$

при t=10сек (установившийся режим):

$$I_{\text{пкз5}} := 1.178 \cdot X_{\text{расчкз}}^{-0.97} = 3.111$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в относительных номинальных единицах

$$I_{\text{ПКЗ}} = \begin{pmatrix} 2.977 \\ 2.748 \\ 2.656 \\ 2.783 \\ 3.031 \\ 3.111 \end{pmatrix}$$

Массив периодической составляющей тока короткого замыкания в номинальных единицах

$$I_{\text{ПКЗ}} := I_{\text{ПКЗ}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{НГ}}}{\cos \varphi_{\text{Г}} \cdot U_{\text{срВТ1}}} = \begin{pmatrix} 2.126 \\ 1.963 \\ 1.897 \\ 1.988 \\ 2.165 \\ 2.222 \end{pmatrix} \cdot \text{kA}$$

Остаточное напряжение на шинах станции при КЗ в точке К1.

Сопротивление в относительных номинальных единицах от шин до точки короткого замыкания K_3 :

$$X_{\text{НШКЗ}} := X_{\text{ШП2}} \cdot \frac{2 \cdot P_{\text{НГ}}}{\cos \varphi_{\text{Г}} \cdot U_{\text{срВТ1}}^2} = 0.138$$

Массив остаточных напряжений в относительных номинальных единицах

$$U_{\text{НШКЗ}} := X_{\text{НШКЗ}} \cdot I_{\text{ПКЗ}} = \begin{pmatrix} 0.409 \\ 0.378 \\ 0.365 \\ 0.383 \\ 0.417 \\ 0.428 \end{pmatrix}$$

5.1.3. Построение графиков изменений токов и напряжений

На одном рисунке совмещаем графики изменений токов при КЗ в точках К1 и КЗ (рис. 5.9).

Диапазон индексов массива

$$i := 0 \dots 5$$

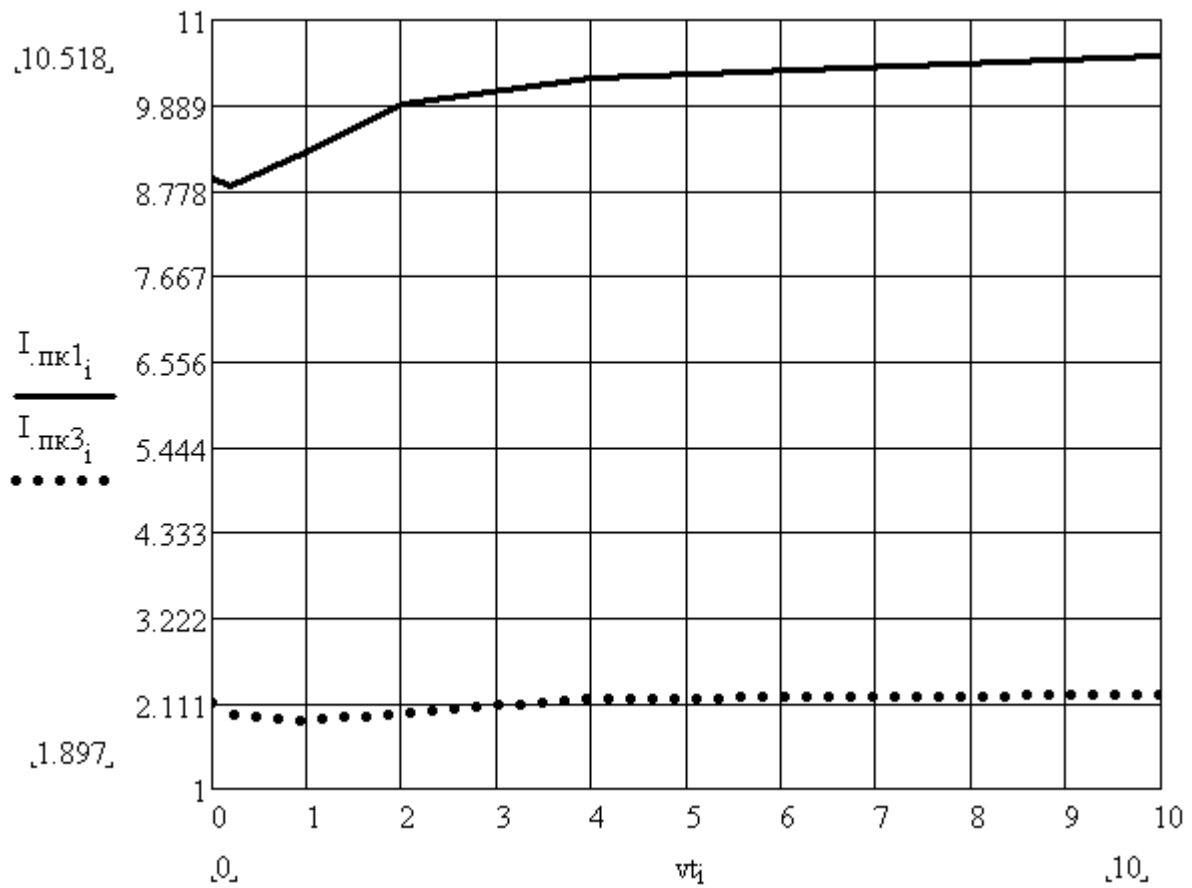


Рис. 5.9. Графики изменений токов во времени

На одном рисунке совмещаем графики изменений напряжений при КЗ в точках К1 и К3 (рис. 5.10).

Диапазон индексов массива

$i := 0..5$

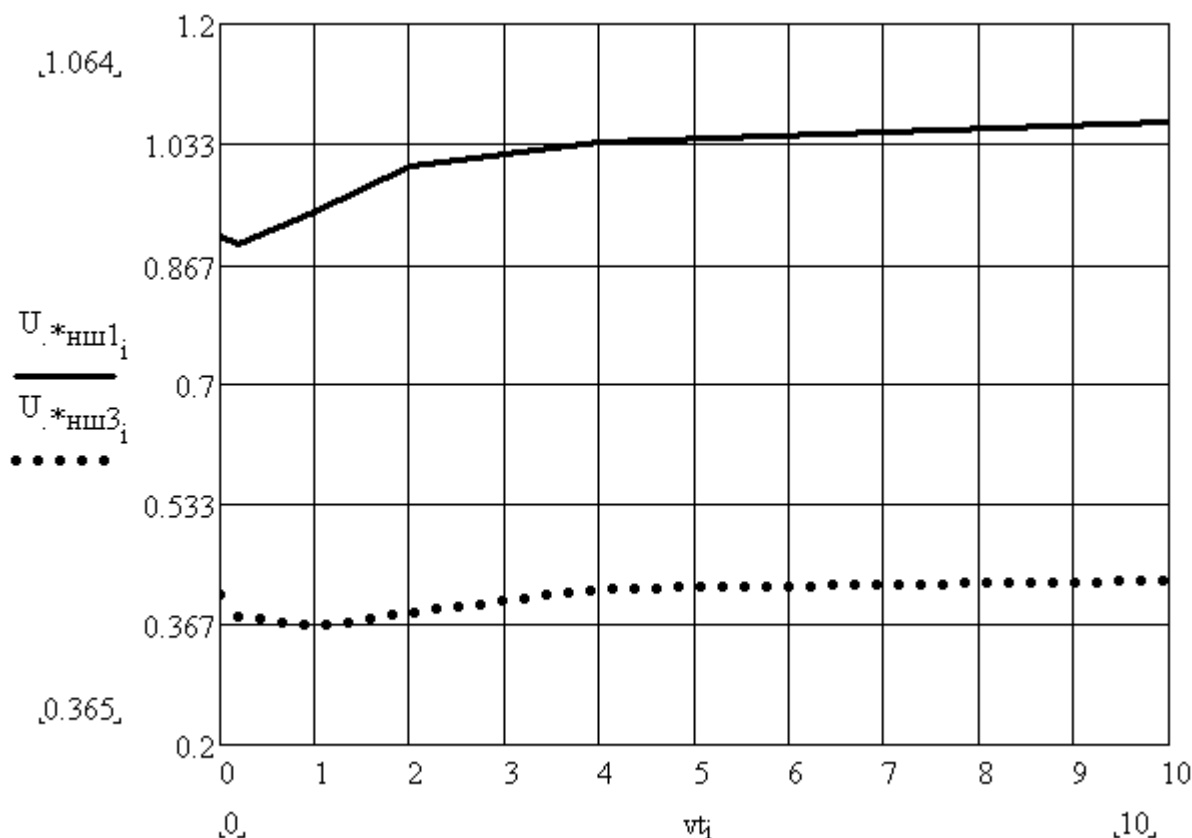


Рис. 5.10. Графики изменений напряжений во времени

5.5. Переходные процессы в электрических двигателях

Изложенное выше, относится не только к синхронным генераторам, но и синхронным двигателям и компенсаторам, так как последние вследствие инерции в первые периоды КЗ заметно не снижают скорость вращения ротора.

Синхронный двигатель и компенсатор являются дополнительными источниками тока КЗ, так как их сверхпереходная (или переходная) ЭДС больше подведенного напряжения (U_c), которое при возникновении КЗ в любой точке сети уменьшается. Схема замещения синхронного двигателя такая же, как и синхронного генератора. Параметры схемы замещения синхронного двигателя находятся, используя параметры предшествующего режима. При отсутствии справочных данных для синхронного двигателя можно приближенно принять $E''_{сд} = 1,1$ и $x''_{сд} = 0,2$.

Для определения ударного тока от синхронного двигателя, необходимо предварительно определить постоянную времени, для нахождения которой находится его активное сопротивление

$$R_{сд*} = 0,25 (1 - \eta_n) \eta_n \cos \varphi,$$

где η_n - КПД двигателя.

Недовозбужденный синхронный двигатель также работает в режиме генератора при значительных снижениях напряжения, возникающих при КЗ (при малой удаленности КЗ). При малых снижениях напряжения, когда сохраняется неравенство $E'' < U_c$, он по-прежнему будет потреблять ток из сети.

Асинхронные двигатели, составляющие основную часть промышленной нагрузки, работают с малым скольжением $s=2-5\%$. Как показано Щедриным Н.Н., для

практических расчетов можно считать, что они работают с синхронным числом оборотов. Следовательно, в начальный момент КЗ асинхронный двигатель можно рассматривать как недовозбужденный синхронный.

Существенный ток КЗ генерируют только асинхронные двигатели, непосредственно связанные с точкой КЗ или находящиеся в зоне малой удаленности от нее, т.е. те, у которых сверхпереходные ЭДС превышают напряжения сети в точке присоединения двигателей. Этот ток обусловлен электромагнитной энергией, запасенной в обмотках АД до возникновения КЗ.

Ротор асинхронного двигателя в начальный момент КЗ продолжает по инерции вращаться. В цепи ротора протекает остаточный ток, а соответствующий ему поток пронизывает обмотку статора, и, вследствие его изменения в ней наводится ЭДС. Так как цепь обмотки статора замкнута, протекает ток к точке КЗ. После затухания свободного тока ротора (вследствие активного сопротивления цепи ротора) генерирование тока асинхронным двигателем прекращается.

Исходя из неизменности потокоцепления с обмоткой ротора в начальный момент КЗ, для асинхронного двигателя можно установить его сверхпереходные ЭДС и сопротивление. Схема замещения асинхронного двигателя для определения сверхпереходных параметров идентична схеме замещения синхронного генератора. Сверхпереходное сопротивление асинхронного двигателя по существу является сопротивлением КЗ (т.е. когда АД заторможен), относительную величину которого можно определить из выражения $x''_{*АД} = 1/k_{\text{пуск}}$, ($k_{\text{пуск}}$ - кратность пускового тока). Сверхпереходная ЭДС определяется из условий предшествующего режима. При отсутствии справочных данных она приближенно может быть принята равной $E''_{*АД} = 0,9$.

Относительно большие активные сопротивления обмоток статора и ротора АД обуславливают весьма быстрое затухание периодической и апериодической составляющих генерируемого АД тока. На рис.5.12 показана характерная кривая тока, генерируемого АД в начальный момент времени после возникновения КЗ.

Дополнительный ударный ток от АД

$$i_{\text{уд.АД}} = \frac{E''_{\text{АД}}}{x''_{\text{АД}}} \sqrt{2} k_{\text{уд.АД}},$$

где $k_{\text{уд.АД}}$ - ударный коэффициент асинхронного двигателя. Кривые изменения ударного коэффициента в зависимости от мощности АД показаны на рис. 5.12 в виде заштрихованной зоны. Кривые построены с учетом затухания периодической составляющей тока КЗ.

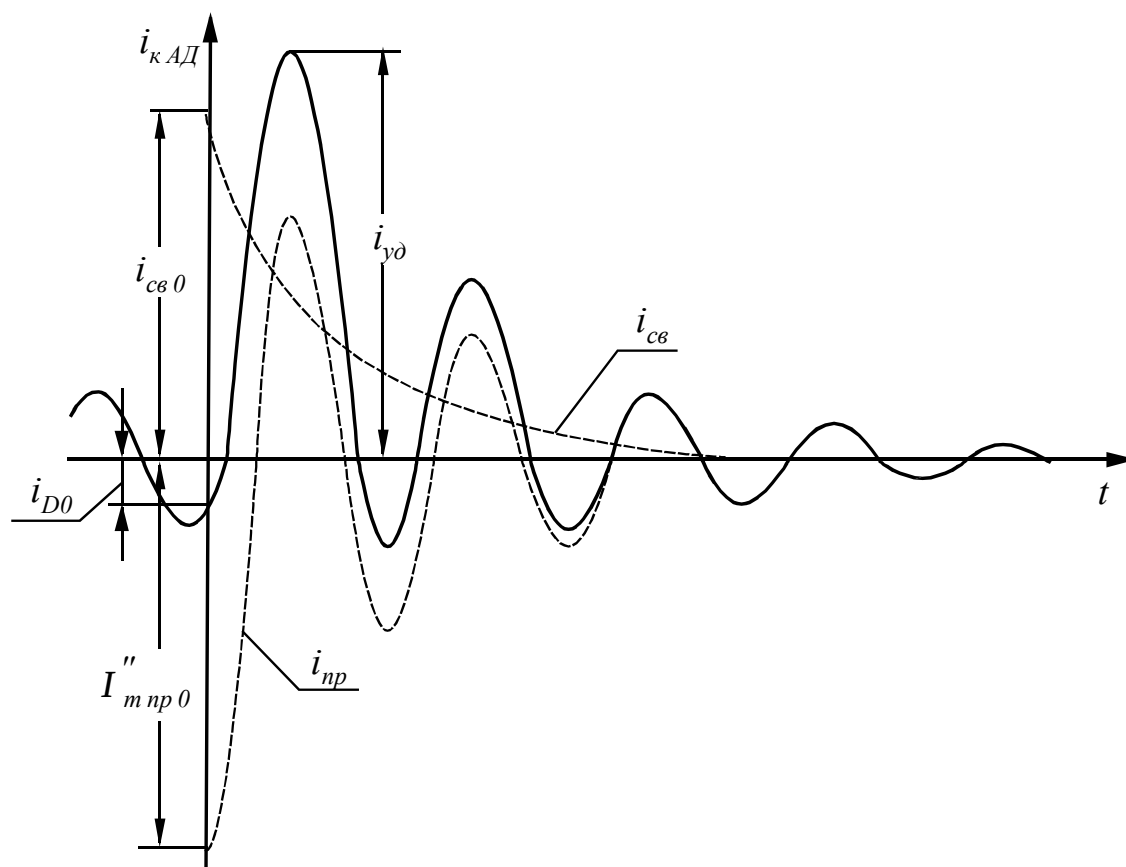


Рис.5.11. Токи генерируемые асинхронным двигателем

Совокупность мелких асинхронных двигателей может быть заменена одним эквивалентным двигателем и называется обобщенной нагрузкой. Аналогично асинхронному двигателю обобщенная нагрузка в начальное время КЗ генерирует ток КЗ. Схема замещения обобщенной нагрузки в начале переходного режима КЗ идентична схеме замещения синхронного генератора.

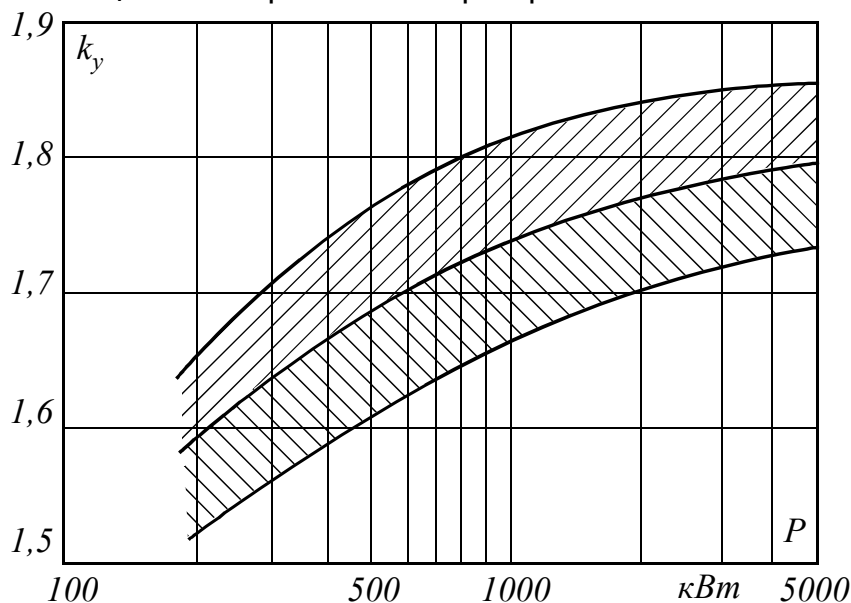


Рис.5.12. Изменение ударного коэффициента мощности в зависимости от мощности АД

Для обобщенной нагрузки рекомендуются следующие параметры, отнесенные к полной рабочей мощности и среднему номинальному напряжению: $E'' = 0,85$; $x'' = 0,35$; $X/R = 2,5$; $k_{уд} = 1$.

Дополнительный ударный ток, генерируемый обобщенной нагрузкой

$$i_{уд.нагр} = k_{уд.нагр} \sqrt{2} I''_{нагр} = 1 \cdot \sqrt{2} \frac{0,85}{0,35} \frac{S_{раб}}{\sqrt{3} U_{ср}}.$$

Контрольные вопросы к главе 5

1. Дифференциальные уравнения синхронной машины в фазных координатах.
2. От чего зависят собственные и взаимные индуктивности синхронной машины.
3. Обобщенный вектор трехфазной системы.
4. Уравнения Парка-Горева для синхронной машины.
5. Объяснить вид кривой зависимости периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора без демпферных обмоток и отключенном АРВ.
6. Объяснить вид кривой зависимости периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора с демпферными обмотками и отключенном АРВ.
7. Влияние АРВ на вид кривой периодической слагающей тока при КЗ на зажимах синхронного генератора.
8. Последовательность расчета периодической слагающей тока КЗ с помощью типовых кривых.
9. Поведение синхронного двигателя в первый момент времени после КЗ на его зажимах.
10. Поведение асинхронного двигателя в первый момент времени после КЗ на его зажимах.
11. Поведение обобщенной нагрузки в первый момент времени после КЗ на ее зажимах.

Задача 5.1.

С помощью типовых кривых произвести расчет периодической слагающей тока КЗ, используя исходные данные задачи №1 (глава 1). Влиянием системы пренебречь. Построить кривую изменения тока во времени.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРАМ

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ

Тип	P_H , МВт	$\cos \varphi$	U_H , кВ	x_d''	x_d'	x_d
ТВС-30	30	0,8	6,3;10,5	0,152	0,257	2,53
ТВ-50-2	50	0,8	10,5	0,135	0,2	1,84
ТВ-100-2	100	0,85	13,8	0,14	0,2	1,8
ТВ2-150-2	150	0,9	18,0	0,122	0,18	1,49
ТВФ-60-2	60	0,8	6,3	0,195	0,28	1,61
ТВФ-100-2	100	0,85	10,5	0,183	0,26	1,79
ТВФ-200-2	200	0,85	11,0	0,165	0,25	1,88
ТВВ-160-2	160	0,85	18,0	0,22	0,329	2,3
ТВВ-200-2	200	0,85	15,75	0,191	0,275	1,88
ТВВ-320-2	320	0,85	20,0	0,173	0,26	1,7
ТВВ-500-2А	500	0,85	20,0	0,24	0,326	2,57
ТВВ-800-2	800	0,9	24,0	0,219	0,307	2,33
ТВВ-1200-2	1200	0,9	24,0	0,247	0,357	2,42
ТГВ-200	200	0,85	15,75	0,19	0,295	1,85
ТГВ-300	300	0,85	20,0	0,195	0,3	2,2
ТГВ-500	500	0,85	20,0	0,243	0,373	2,413
ТВМ-300	300	0,85	20,0	0,2	0,33	2,11

ГИДРОГЕНЕРАТОРЫ

№ п.п.	Тип	S_H , МВА	U_H , кВ	x_d''
1	СВ375/195-12	65,5	10,5	0,16
2	СВ640/170-24	78,8	13,8	0,2
3	СВ795/230-32	134	11,0	0,18
4	СВ1160/180-72	103,5	13,8	0,24
5	СВ1190/250-48	264,7	15,75	0,24
6	СВ1690/175-64	590	15,75	0,3
7	ВГС375/89-28	9,4	6,3	0,2

Приложение 2

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ

Двухобмоточный трансформатор с двумя расщепленными обмотками на низшем напряжении можно рассматривать как трехобмоточный трансформатор, поэтому его схема замещения также представляется в виде трехлучевой звезды. Однофазный и трехфазный двухобмоточный трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения расщеплена на две одинаковые цепи (обмотки), характеризуется сквозным реактивным сопротивлением $x_{скв}$ равным $x_{В-Н}$, где $x_{В-Н}$ - реактивное сопротивление этого трансформатора при параллельной работе расщепленных обмоток, т.е. без расщепления. Условное изображение трансформатора с расщепленными обмотками и схема его замещения приведены на рис.П.2.1.

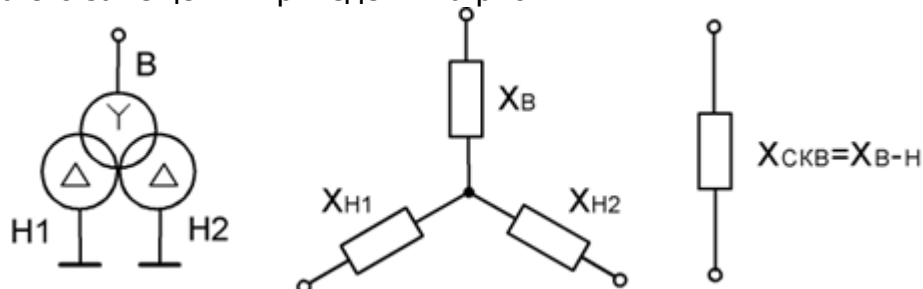


Рис.П.2.1. Трансформатор с расщепленными обмотками и его схемы замещения

При раздельной работе расщепленных обмоток такой трансформатор характеризуется реактивным сопротивлением расщепления $x_{расц}$, определенным по напряжению КЗ между двумя одинаковыми расщепленными обмотками. Из схемы замещения следует $x_{расц} = x_{H1} + x_{H2}$. Так как обмотки H1 и H2 одинаковы, то

$$x_{H1} = x_{H2} = 0,5x_{расц} \quad (П.2.1)$$

Из схемы замещения (рис.П.2.1) с учетом (П.2.1) имеем

$$x_{скв} = x_{В-Н} = x_B + \frac{x_{H1} \cdot x_{H2}}{x_{H1} + x_{H2}} = x_B + 0,25x_{расц}$$

откуда

$$x_B = x_{В-Н} - 0,25x_{расц} \quad (П.2.2)$$

Токоограничивающий эффект двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой характеризуется коэффициентом расщепления

$$k_{расц} = x_{расц} / x_{скв} = x_{расц} / x_{В-Н} \quad (П.2.3)$$

Если в каталоге приводится только значение $x_{В-Н}$, то зная $k_{расц}$ по (П.2.3) определяют $x_{расц}$, а по (П.2.1) и (П.2.2) определяют сопротивления схемы замещения. Для однофазных двухобмоточных трансформаторов (и автотрансформаторов) при расщеплении обмотки низкого напряжения на две цепи (обмотки) $k_{расц} = 4$. Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов классов напряжений 35, 110 и 220 кВ с расщепленными обмотками низкого напряжения на две цепи можно принять $k_{расц} = 3,5$.

Приложение 3

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИЛОВЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ

ДВУХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

№ п.п.	Тип	Мощность, МВА	Напряжение обмотки высокого напряжения, кВ	Напряжение обмотки низкого напряжения, кВ	Напряже-ние короткого замыкания, $U_{k\%}$
1	ТМН-200/110-73У1	2,5	110	6,6; 11,0	10,5
2	ТДН-10000/110-70У1	10	115	6,6; 11,0	10,5
3	ТРДЦН-63000/110-75У1	63	115	6,3; 10,5	10,5
4	ТРДЦН-125000/110-74У1	125	115	10,5	10,5
5	ТДЦ-200000/110-72У1	200	121	13,8; 15,75; 18	10,5
6	ТДЦ-250000/110-70У1	250	121	15,75	10,5
7	ТДЦ-400000/110-71У1	400	121	20,0	10,5
8	ТРДЦН-160000/110-74У1	160	230	11,0; 38,5	12,0
9	ТДЦ-80000/220-78У1	80	242	10,5; 6,3; 13,8	11,0
10	ТДЦ-125000/220-71У1	125	242	10,5; 13,8	11,0
11	ТДЦ-250000/220-71У1	250	242	13,8; 15,75	11,0
12	ТДЦ-400000/220-73У1	400	242	13,8; 15,75	11,0
13	ТДЦ-630000/220-74У1	630	242	15,75; 20,0	12,5
14	ТРДЦ-63000/330-74У1	63	330	6,3; 10,5	12,0
15	ТДЦ-250000/330-76У1	250	347	13,8; 15,75	11,0
16	ТДЦ-400000/330-78У1	400	347	15,75; 20,0	11,0
17	ТДЦ-630000/330-74У1	630	347	15,75; 20,0	11,0
18	ТДЦ-1000000/330-69У1	1000	347	24,0	11,5
19	ОРЦ-53300/500-74У1	533	$525/\sqrt{3}$	15,75; 18,0; 24,0	13,0
20	ТДЦ-250000/500-74У1	250	525	13,8 – 36,75	13,0
21	ТДЦ-400000/500-79У1	400	525	13,8 – 36,75	12,6
22	ТДЦ-630000/330-78У1	630	525	13,8 – 36,75	14,0

ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тип	S_n , МВА	U_B , кВ	U_C , кВ	U_H , кВ	$U_{k,BC\%}$	$U_{k,BH\%}$	$U_{k,CH\%}$
ТДТН-6300/110-76у1	6,3	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-10000/110-76у1	10	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-25000/110-76у1	25	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,0
ТДТН-63000/110-76у1	63	115	11; 38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
ТДТН-80000/110-69у1	80	115	11; 38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
ТДТН-25000/110-76у1	25	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	20,0	6,5
ТДТН-40000/110-76у1	40	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	22,0	9,5
ТДТН-400000/110-76у1	400	230	38,5	6,6; 11,0	12,5	22,0	9,5

ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ

Тип	S_H , МВА	U_B , кВ	U_H , кВ	$U_{k\%}$	$k_{рас}$
ТРДН-25000/110-76у1	25	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5
ТРДН-63000/110-76у1	63	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5
ТРДН-125000/110-76у1	125	115	6,3-6,3; 10,5-10,5	10,5	3,5

Обмотки НН имеют мощность, равную 50%

АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Тип	S_H , МВА	U_B , кВ	U_C , кВ	U_H , кВ	$U_{k,BC\%}$	$U_{k,BH\%}$	$U_{k,CH\%}$
АТДЦТН-125000/110	63	115	38,5	6,6; 11,0	10,5	17,0	6,5
АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	6,3; 10,5;13,8	11,0	34,0	21,0
АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,3; 10,5;13,8	11,0	31,0	19,0
АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	10,5;13,8;38,5	11,0	32,0	20,0
АТДЦТН-250000/220/110	250	230	121	11,0;13,8;15,75;38,5	11,0	32,0	20,0
АТДЦТН-125000/330/110	125	330	115	6,6;11,0;15,75;38,5	10,0	35,0	22,0
АТДЦТН-200000/330/110	200	330	115	6,6	10,0	33,0	22,0
АТДЦТН-250000/330/150	250	330, 347	165	10,5; 38,5	9,5	74,0	60,0
АТДЦТН-240000/330/150	240	330, 347	242	38,5	9,5	74,0	60,0
АТДЦТН-250000/500/150	250	500	121	11,0;38,5	9,5	74,0	60,0

Приложение 4

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОДНОЙ ЦЕПИ ЛЭП И ПРЕДЕЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ ПЕРЕДАЧИ

№ п.п.	U , кВ	P , МВт	длина, км
1	до 1	до 0,1	до 3
2	1-10	1-3	15-3
3	35	5-10	50-60
4	110	25-50	50-150
5	220	100-200	150-250
6	330	300-400	200-300
7	500	700-900	800-1200
8	750	1800-2200	1200-2000

Приложение 5

ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С АЛЮМИНОВЫМИ И СТАЛЕАЛЮМИНОВЫМИ ПРОВОДАМИ

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 1 м

Марка провода	A-16	A-25	A-35	A-50	A-70	A-95	A-120	A-150	A-185
Худ	0,391	0,377	0,366	0,355	0,341	0,332	0,324	0,319	0,313

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 4 м

Марка провода	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120	АС-185	АСО-240
Худ	0,435	0,425	0,414	0,408	0,394	0,376

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 7 м

Марка провода	АСО-240	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
Худ	0,41	0,405	0,396	0,39	0,384	0,378

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 8 м

Марка провода	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
Худ	0,414	0,405	0,399	0,393	0,385

Среднее геометрическое расстояние между проводами – 9 м

Марка провода	АСО-300	АСО-400	АСО-500	АСО-600	АСО-700
Худ	0,422	0,414	0,405	0,4	0,393

Приложение 6

ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ

№ п.п.	Марка провода	Активное сопротивление при температуре +20оС, Ом/км	Наружный диаметр провода, мм
1	A-70	0,46	10,7
2	A-95	0,34	12,4
3	A-120	0,27	14,0
4	A-150	0,21	15,8
5	A-185	0,17	17,5
6	AC-70	0,46	11,4
7	AC-95	0,33	13,5
8	AC-120	0,27	15,2
9	AC-150	0,21	17,0
10	AC-185	0,17	19,0
11	ACO-240	0,13	21,6
12	ACO-300	0,108	23,5
13	ACO-400	0,08	27,2
14	ACO-500	0,065	30,2
15	ACO-600	0,055	33,1
16	ACO-700	0,044	37,1

Приложение 7

АКТИВНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

№ п.п.	Сечение жил, мм2	Активное сопротивление Ом/км		Индуктивное сопротивление Ом/км, при номинальном напряжении		
		Алюминий	Медь	6 кВ	10 кВ	35 кВ
1	70	0,443	0,26	0,08	0,086	0,137
2	95	0,326	0,194	0,078	0,083	0,126
3	120	0,258	0,153	0,076	0,081	0,12
4	150	0,206	0,122	0,074	0,079	0,116
5	185	0,167	0,099	0,073	0,077	0,113
6	240	0,129	0,077	0,071	0,075	-

Приложение 8

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СДВОЕННЫХ РЕАКТОРАХ

Для ограничения токов КЗ применяются также сдвоенные реакторы (СДР). Условное изображение СДР и его схема замещения приведены на рис. П.8.1. Сдвоенный реактор состоит из двух одинаковых катушек (ветвей) с индуктивностями $L_{0,5}$ каждая. Эти катушки магнитно связаны при взаимной индуктивности M .

Для ограничения токов КЗ применяются также сдвоенные реакторы (СДР). Условное изображение СДР и его схема замещения приведены на рис. П.8.1. Сдвоенный реактор состоит из двух одинаковых катушек (ветвей) с индуктивностями $L_{0,5}$ каждая. Эти катушки магнитно связаны при взаимной индуктивности M .

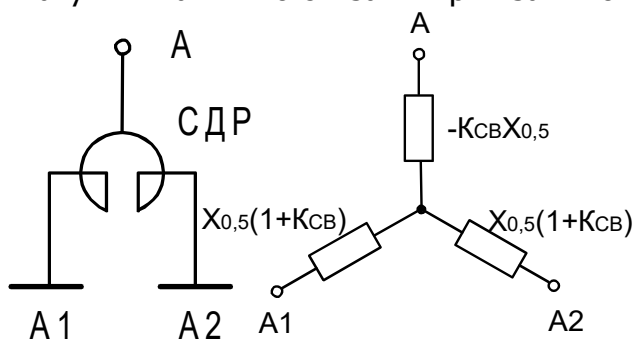


Рис. П.8.1. Сдвоенный реактор и его схема замещения

При протекании тока только по одной ветви (рис. П.8.2,а) сопротивление этой ветви $x_{0,5} = \omega L_{0,5}$. В нормальных условиях (рис. П.8.2,б) через обе катушки протекают одинаковые токи в противоположных направлениях, поэтому сопротивление каждой катушки в этих условиях составляет

$$x_{0,5} = \omega(L_{0,5} - M) \quad (\text{П.8.1})$$

Степень индуктивной связи двух катушек характеризуется коэффициентом связи $k_{св} = M / \sqrt{L_1 L_2}$, где L_1, L_2 - индуктивности катушек. У сдвоенного реактора $L_1 = L_2 = L_{0,5}$, поэтому

$$M = k_{св} L_{0,5}$$

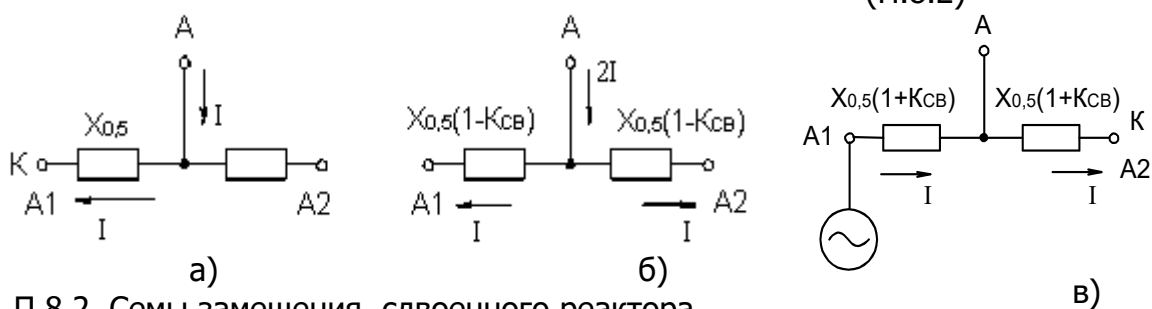


Рис. П.8.2. Семь замещения сдвоенного реактора при различных направлениях токов в ветвях

Подставляя (П.8.2) в (П.8.1) и учитывая, что $x_{0,5} = \omega L_{0,5}$, получаем

$$x'_{0,5} = \omega(L_{0,5} - k_{св} L_{0,5}) = x_{0,5}(1 - k_{св}) \quad (\text{П.8.3})$$

Как видно из (П.8.3), сопротивление каждой ветви в нормальном режиме уменьшается, так как, $k_{св} = 0,4 \div 0,5$. В этом заключается достоинство сдвоенного реактора. При протекании тока в обеих катушках в одном направлении (рис. П.8.3,в) сопротивление каждой катушки

$$x'_{0,5} = \omega(L_{0,5} + M) = \omega(L_{0,5} + k_{ce}L_{0,5}) = x_{0,5}(1 + k_{ce})$$

и для всего реактора для этого случая $x_p = 2x_{0,5}(1 + k_{ce})$.

Приложение 9

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕАКТОРАМ

ОДИНАРНЫЕ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ РЕАКТОРЫ (номинальное напряжение 10 кВ)

№ п.п.	Тип	I_H , кА	$x_{p\%}$, %
1	РБ – 10-400-0,35	0,4	2,5
2	РБУ – 10-630-0,45	0,63	3,0
3	РБГ – 10-1600-0,14	1,6	3,9
4	РБГ – 10-1000-0,14	1,0	4,9
5	РБГ – 10-1600-0,20	1,6	5,5
6	РБГ – 10-1000-0,35	1,0	6,0
7	РБГ – 10-1600-0,25	1,6	7,0
8	РБГ – 10-1000-0,45	1,0	8,0
9	РБГ – 10-1600-0,35	1,6	10,0
10	РБДГ – 10-2500-0,35	2,5	15,0

СДВОЕННЫЕ РЕАКТОРЫ (номинальное напряжение 10 кВ)

Тип	I_H , кА	Индуктивное сопротивление ветви, %	Индуктивное сопротивление при встречном токе, %	Коэффициент связи
РБСГ 10-2×630-0,25	0,63	2,7	0,135	0,46
РБСГ 10-2×630-0,40	0,63	4,4	0,2	0,5
РБСГ 10-2×2500-0,14	2,5	6,1	0,056	0,6

Последняя цифра в обозначении реактора – сопротивление в Омах

Приложение 10

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЯМ СЕРИЙ СД И СДН
(номинальное напряжение 6 кВ; $\cos \varphi = 0,9$; $\eta = 99\%$)

№ п.п.	P_H , МВт	x_d''
1	0,4	0,172
2	1,25	0,158
3	6,3	0,144
4	10,0	0,167

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО СИНХРОННЫМ КОМПЕНСАТОРАМ

№ п.п.	Тип	S_H , МВАр	U_H , кВ	x_d''
1	КС-5000-6	5	6,3	0,16
2	КС-7500-6	7,5	6,6	0,15
3	КС-10000-6	10	6,6	0,22
4	КС-15000-11	15	11	0,165
5	КС-30000-11	30	10,5	0,21
6	КСВ-50000-11	50	11 (10,5)	0,28
7	КСВ-100000-11	100	11(10,5)	0,2
8	КСВ-160000-15	160	15,75	0,205

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (с номинальным напряжением 6 кВ)

№ п.п.	Тип	кВт	$\cos \varphi$	$k_{\text{пуск}}$
1	A2-560М-8	800	0,85	6,0
2	A2-560S-4	1000	0,9	6,0
3	A2-560М-4	1250	0,905	6,6
4	A4-400ХК-4У3	400	0,87	5,7
5	A4-400Х-4У3	500	0,88	5,7
6	A4-400У-4У3	630	0,88	5,7
7	A4-450Х-4У3	800	0,88	5,7
8	A4-450У-4У3	1000	0,89	5,7
9	AB-8000/6000	8000	0,91	5,4
10	АДО-1250/600У3	1250	0,75	6,0
11	АДО-1600/750У1	1600	0,83	5,5
12	АДО-2500/1000У1	2500	0,88	5,7
13	АДО-3150/1000У1	3150	0,89	6,5
14	АН-14-49-6	1000	0,88	6,0
15	АН-14-59-6	1250	0,88	6,0
16	АН-15-41-6	1600	0,88	6,0
17	АН-15-51-6	2000	0,88	6,5
18	АО113-4М	200	0,88	6,6
19	АО114-4М	250	0,88	7,0

20	АО113-6М	160	0,865	7,0
21	АО114-6М	200	0,86	7,3
22	АР-500/6000	500	0,89	6,0
23	АРП-500/6000	630	0,895	6,2
24	АР-630/6000	800	0,905	6,4
25	АРП-1000/6000	1000	0,905	5,7

Приложение 11

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ВЕТВЕЙ

При выполнении преобразований наиболее часто требуется нахождение эквивалентной ЭДС двух параллельно включенных ветвей (рис.П.11.1, а) с различными ЭДС и сопротивлениями (при расчетах токов КЗ значения ЭДС и сопротивлений отличаются незначительно друг от друга). Преобразованная схема приведена на рис. П.11.1, б, при этом

$$E_3 = \frac{E_1 x_2 + E_2 x_1}{x_1 + x_2} \quad \text{и} \quad x_3 = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} + x_3$$

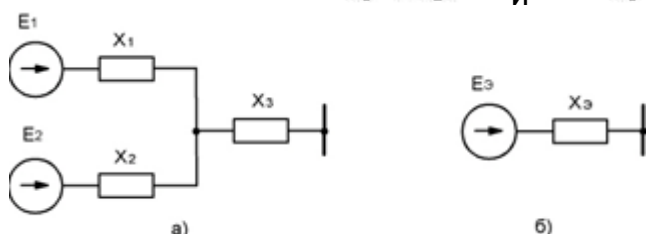


Рис.П.11. Преобразование при двух источниках

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 519 с.
2. Ульянов С.А. Сборник задач по переходным электромагнитным процессам. - М.: Энергия, 1968. – 496 с.
3. Дроздов А.Д. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1976. – 79 с.
4. Дроздов А.Д. Несимметричные переходные режимы в электрических системах и цепях релейной защиты: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1977. – 75 с.
5. Очков В.Ф. Mathcad 14: для студентов и инженеров, русская версия / В.Ф. Очков; Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. 2009. – 498 с.
6. Гармаш В.А., Подгорный Э.В. Методические указания по курсу Электромагнитные переходные процессы. - Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 39 с.
7. Цыгулев Н.И. Токи короткого замыкания в электрических системах: Учебное пособие. - Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 70 с.
8. Цыгулев Н.И. . Основы электромагнитных переходных процессов в электрических системах: учебное пособие / Н.И. Цыгулев, В.А. Шелест, В.К. Хлебников; Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – 98 с.
9. Неклепаев Б.Н. Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков; М.: Энергия, 1978. – 380 с.
10. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей: Учебное пособие/ В.М. Блок, Г.К. Обушев, Л.Б. Паперно, С.А. Гусева и др. – М.: Высшая школа, 1981. – 304 с.