

Федеральное агентство по образованию
Красноярский государственный технический университет

А. Э. Бобров
А. М. Дяков
В. Б. Зорин

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве
учебного пособия

Красноярск 2006

УДК 621.311.018.782.3(075.8)

Б72

Рецензенты

В. Н. Гиренков, канд. техн. наук, доцент, начальник ПТО ЦЭС ОАО Красноярскэнерго.

В. А. Ермаков, канд. техн. наук, доцент, зам. начальника службы баланса и развития филиала ОАО "СО-ЦДУ ЕЭС" - Красноярского РДУ.

Бобров, А. Э.

Б72 Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / А. Э. Бобров, А. М. Дяков, В. Б. Зорин. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 127 с.

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

Предназначено для студентов направления подготовки дипломированных специалистов 140200 – «Электроэнергетика» спец.140203.65 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» СД.Ф.07, 140204.65 – «Электрические станции» СД.Ф.01, 140205.65 – «Электроэнергетические системы и сети» СД.Ф.01, 140211.65 – «Электроснабжение» СД.Ф.03, при изучении теории электромагнитных переходных процессов, выполнении курсовых и дипломных работ и проектов, подготовке к практическим и лабораторным работам.

УДК 621.311.018.782.3(075.8)

© КГТУ, 2006

© А.Э. Бобров,

А.М. Дяков, В.Б. Зорин

Печатается в авторской редакции

*Посвящается 50-летию
Красноярского государственного
технического университета,
45-летию (электротехнического,
электроэнергетического)
электромеханического факуль-
тета.*

ПРЕДИСЛОВИЕ

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

Содержание учебного пособия соответствует программе дисциплины «Электромагнитные переходные процессы» ГОС ВПО II.

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

В учебном пособии, состоящем из четырех глав, в первой главе даны общие понятия и определения, приведены наиболее вероятные причины возникновения переходных процессов и их последствия, а также упрощающие решения большинства практических задач, допущения.

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

В третьей главе рассматривается расчет и исследование несимметричных электромагнитных переходных процессов при однократной продольной и поперечной несимметрии.

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

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

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

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

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

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

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

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

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

Результатом изучения переходных процессов является: ясное представление причин возникновения и понимание физической сущности явлений; знание основных математических выражений, описывающих эти явления, терминологии и определений; использование практических критериев и методов их количественной оценки с целью прогнозирования и предотвращения опасных последствий этих процессов; умение рассчитать переходный процесс.

Наиболее распространенными переходными процессами являются процессы, вызванные:

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

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

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

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

2) несимметричные КЗ:

- однофазное КЗ – замыкание одной фазы на землю ($K^{(1)}$) при заземлённых нейтралью трансформаторов и автотрансформаторов, вероятность возникновения составляет 60–92 %; замыкание одной фазы на землю при изолированных нейтралью называют простым замыканием на землю ($3^{(1)}$);

- двухфазное КЗ – замыкание двух фаз между собой ($K^{(2)}$), вероятность возникновения 2–13 %;

- двухфазное КЗ на землю – замыкание двух фаз между собой и в той же точке на землю ($K^{(1,1)}$), вероятность возникновения 5–20 %.

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

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

Короткие замыкания вызывают снижение напряжений в отдельных узлах ЭЭС и увеличение токов в цепях электроустановок, примыкающих к месту возникновения КЗ, до значений, превосходящих наибольший допустимый ток продолжительного режима. Кроме того, происходит искажение симметрии трехфазной системы напряжений, особенно вблизи КЗ. Последствиями КЗ являются дополнительный нагрев токоведущих элементов и проводников, а также значительные электромеханические (электродинамические) усилия между проводниками. При задержке отключения КЗ сверх допустимой продолжительности может произойти нарушение устойчивости ЭЭС, что является одним из наиболее опасных последствий короткого замыкания, так как оно отражается на работе всей ЭЭС.

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

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

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

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

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

5. Приближенный учет нагрузок индуктивными сопротивлениями.

6. Неучет емкостных проводимостей ЛЭП до 220 кВ включительно при отсутствии установок продольной емкостной компенсации (УПК) и сетей напряжением 6 – 35 кВ.

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

2. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ТРЁХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

2.1. Трёхфазное короткое замыкание в простейшей неразветвлённой цепи

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

Рассмотрим установившийся режим простейшей трёхфазной цепи, схема замещения которой представлена на рис. 2.1.

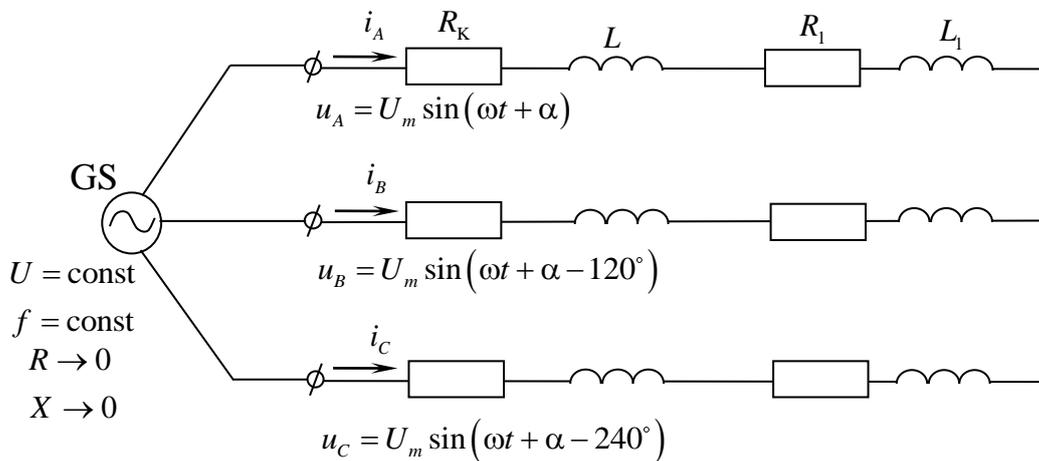


Рис. 2.1. Простейшая трехфазная цепь

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

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

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

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

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

где f_0 – синхронная частота 50 Гц промышленного тока.

Фрагмент векторной диаграммы, характеризующей нагрузочный установившийся режим фазы A этой цепи для момента времени, предшествующего началу КЗ, представлен на рис. 2.2.

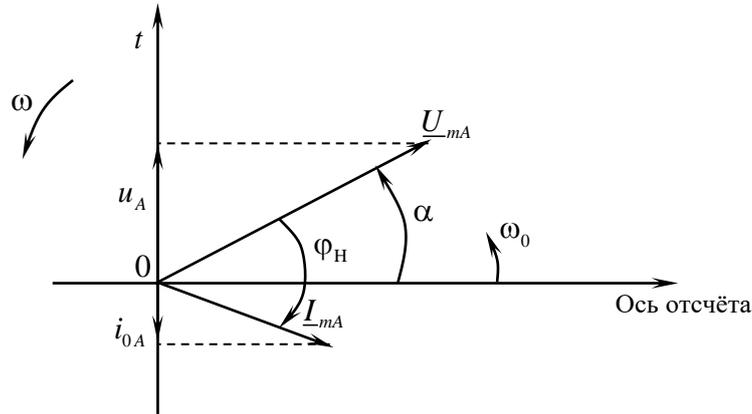


Рис. 2.2. Фрагмент векторной диаграммы установившегося режима

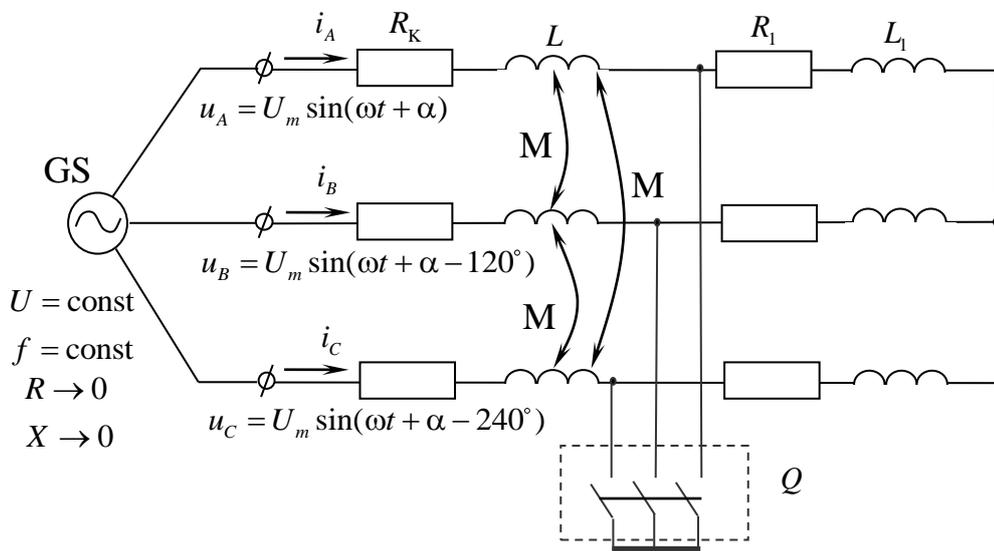


Рис. 2.3. Трёхфазная цепь с выключателем Q

На рис. 2.3 показана схема замещения, в которой внезапным включением выключателя Q на коротку создаётся трёхфазное КЗ, векторная диаграмма режимных параметров при котором представлена на рис. 2.4. Участок с сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 оказывается зашунтированным вы-

ключателем, напряжение в узле замыкания трёх фаз становится равным нулю. Для этого участка дифференциальное уравнение равновесия имеет вид (2.1).

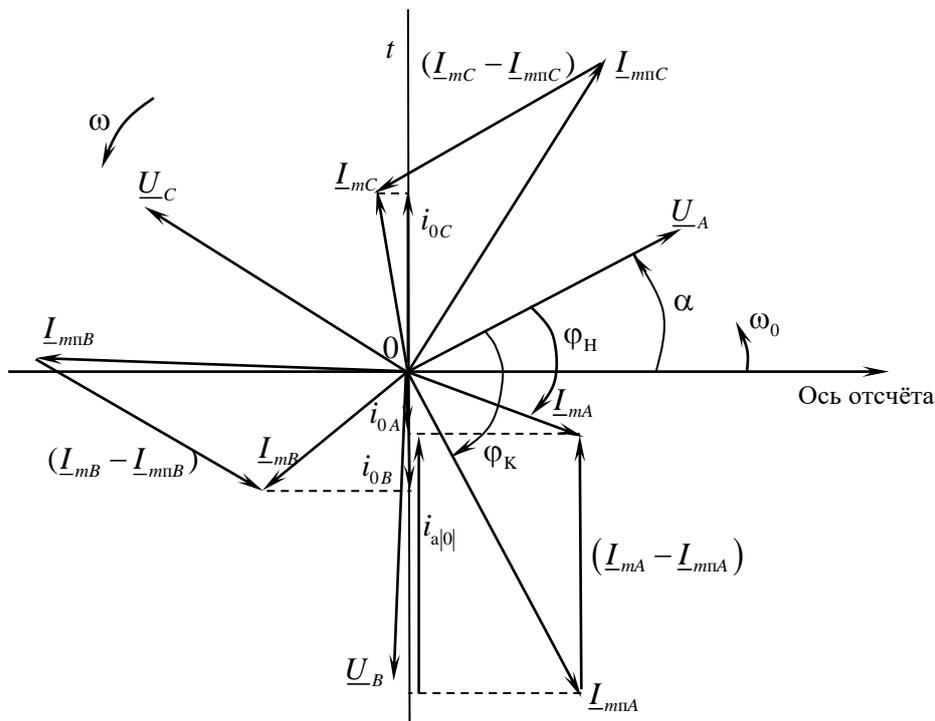


Рис. 2.4. Векторная диаграмма для начального момента трёхфазного КЗ

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

Решение этого дифференциального уравнения

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

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

$$\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1},$$

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

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

в индуктивности L_1 не перейдет в тепло, выделяемое на активном сопротивлении R_1 .

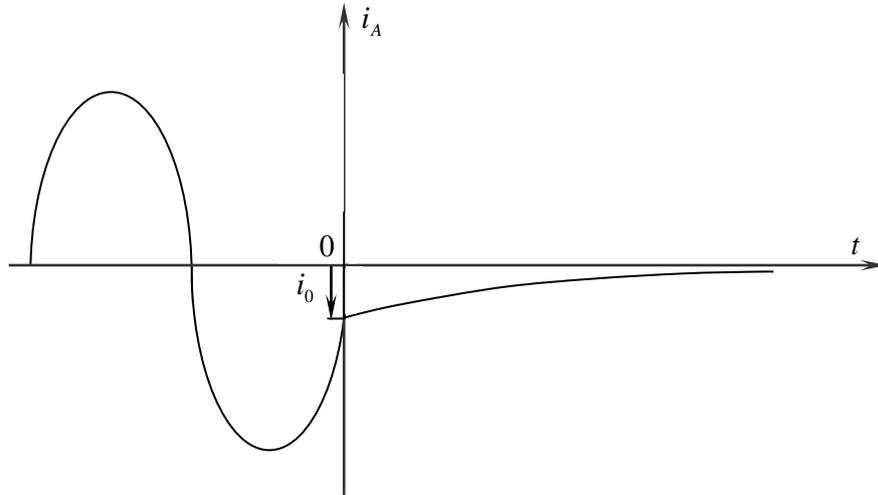


Рис. 2.5. Характеристика изменения тока в зашунтированной части цепи фазы A

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

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

Поскольку система токов уравновешенная

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

и, следовательно,

$$i_B + i_C = -i_A,$$

то

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

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

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

$$u = iR_K + L_K \frac{di}{dt}. \quad (2.2)$$

Решение дифференциального уравнения (2.2) представляется в виде

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

где

$$\begin{aligned} i_{п} &= I_{mп} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K); \\ i_a &= i_{a|0} e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad Z_K = R_K + j\omega L_K; \\ T_a &= \frac{L_K}{R_K} = \frac{X_K}{\omega R_K}; \\ I_{mп} &= \frac{U_m}{Z_K}; \end{aligned}$$

здесь $I_{mп}$ – амплитудное значение периодической составляющей тока.

При $t = 0$

$$\begin{aligned} i|0-| &= i|0+|, \\ i|0-| &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_H) = I_m \sin(\alpha - \varphi_H), \\ i|0+| &= I_{mп} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + i_{a|0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{mп} \sin(\alpha - \varphi_K) + i_{a|0}, \\ I_m \sin(\alpha - \varphi_H) &= I_{mп} \sin(\alpha - \varphi_K) + i_{a|0}, \\ i_{a|0} &= I_m \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{mп} \sin(\alpha - \varphi_K). \end{aligned}$$

Уравнение полного тока КЗ

$$i_k = i_{п} + i_a = I_{mп} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + [I_m \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{mп} \sin(\alpha - \varphi_K)] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2.4)$$

2.2. Ударный ток короткого замыкания

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

$$i_y = i_n + i_a = \sqrt{2}I_{n0} + \sqrt{2}I_{n0}e^{\frac{-0.01}{T_a}},$$

$$i_{n|0|} + i_{a|0|} = 0,$$

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

где i_y – ударный ток КЗ; I_{n0} – начальное значение периодической составляющей тока КЗ; T – период промышленного синусоидального тока.

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

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

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

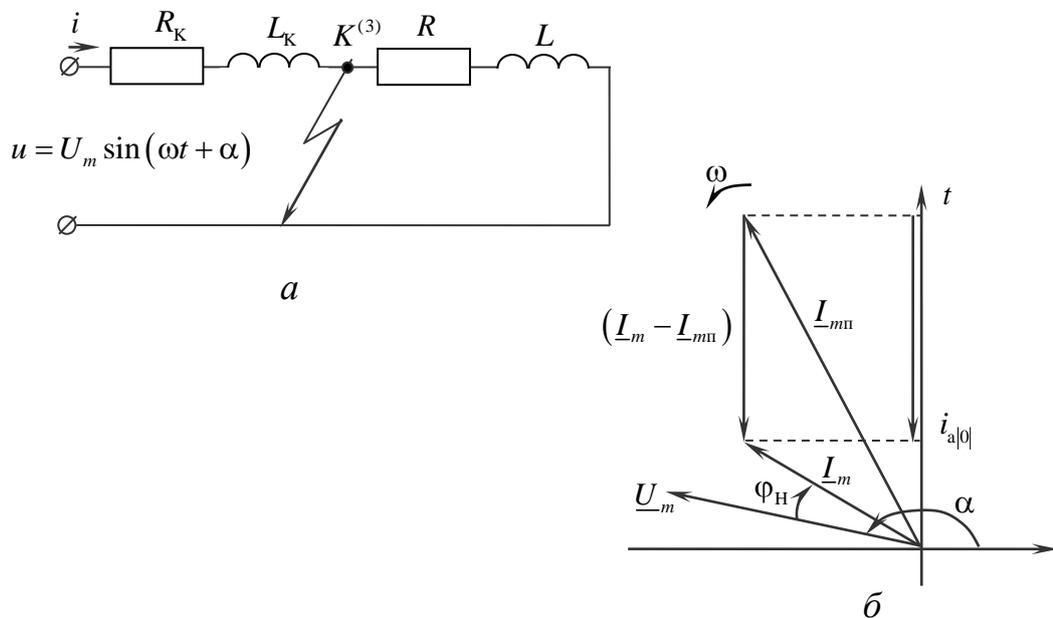


Рис. 2.6. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б)

В случае, представленном на рис. 2.6, значение аperiodической составляющей тока наибольшее при рассматриваемом положении векторов токов.

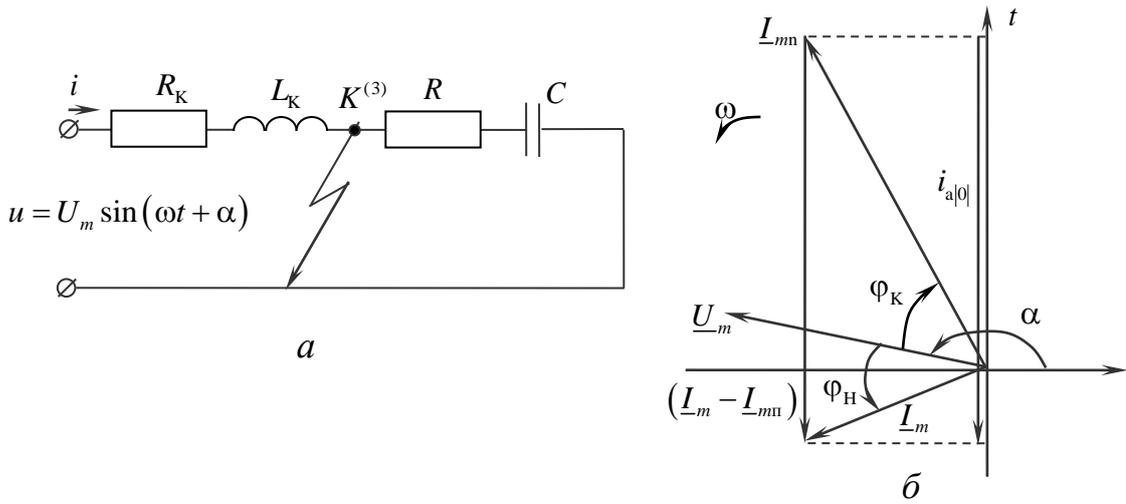


Рис. 2.7. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б)

В случае, представленном на рис. 2.7, начальное значение аperiodической составляющей больше амплитуды периодической составляющей тока.

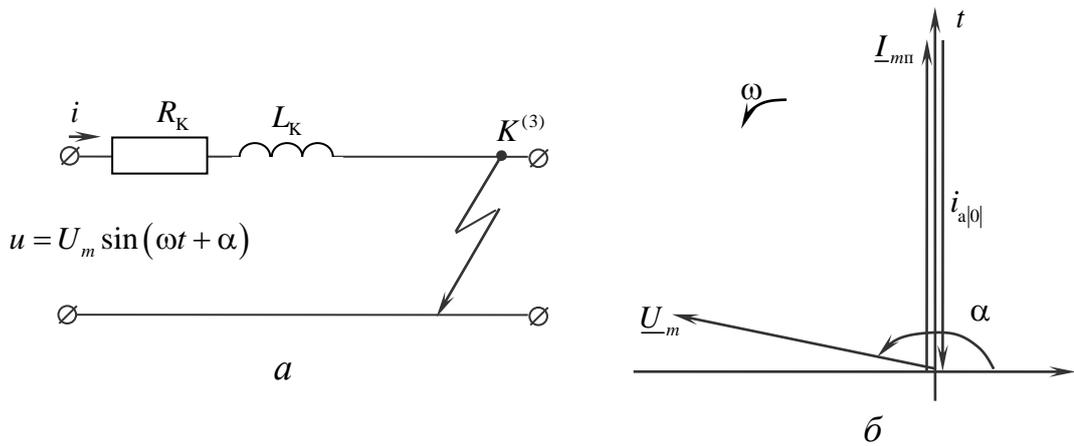


Рис. 2.8. Возникновение КЗ на холостом ходу цепи (а) и векторная диаграмма (б)

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

$$i_y = \sqrt{2}I_{n0} \left(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) = \sqrt{2}I_{n0}k_y,$$

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

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

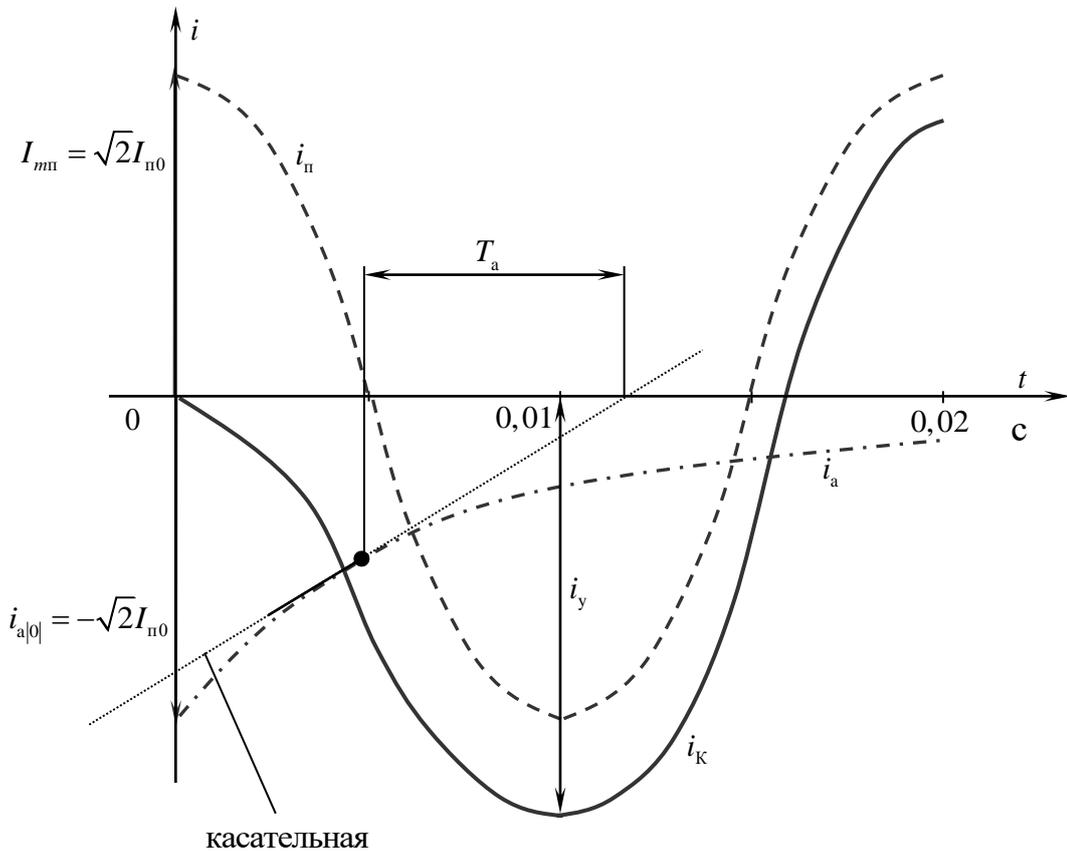


Рис. 2.9. Осциллограмма тока короткого замыкания

Ударный коэффициент показывает во сколько раз ударный ток* больше амплитуды периодической составляющей аварийного тока; учитывает наличие в полном токе апериодической составляющей тока КЗ. Ударный ток возникает только в одной фазе. По кривой апериодической составляющей можно найти постоянную времени T_a (рис. 2.9). За время $t = T_a$ апериодическая составляющая тока КЗ уменьшается в $e = 2,718$ раз или, что то же, до $e^{-1} = 0,368$ своего значения. Кривая апериодической составляющей тока КЗ является криволинейной осью симметрии кривой полного тока $i = f(t)$.

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

2.3. Действующее значение полного тока короткого замыкания

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I_{ur} = \frac{I_{mur}}{\sqrt{2}}$$

и

$$I_{ar} = i_{ar}.$$

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

Действующее значение полного тока

$$I_{Kt} = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}.$$

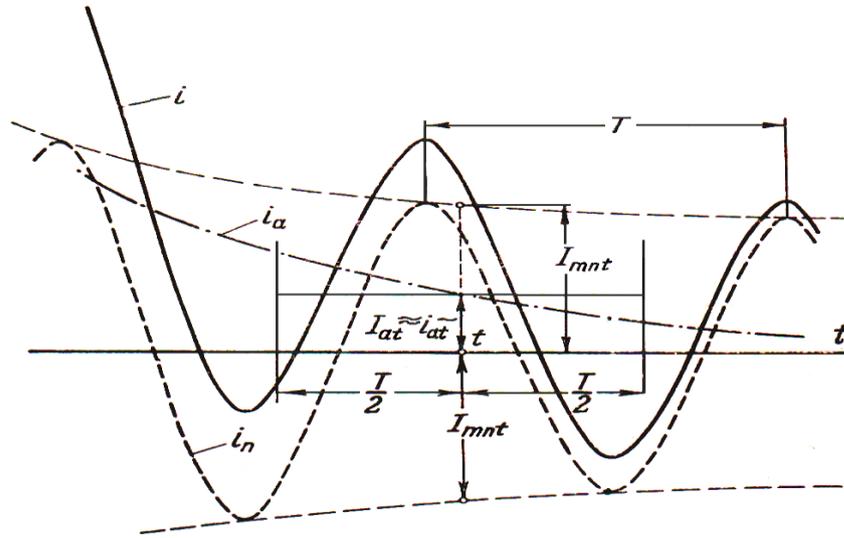


Рис. 2.10. Кривая изменения тока $i_k = f(t)$ для определения действующего значения тока короткого замыкания

Наибольшее действующее значение полного тока КЗ I_y по аналогии с ударным током определится нижеследующим способом

$$\begin{aligned} i_y &= \sqrt{2}I_n + I_a = \sqrt{2}I_n k_y, \\ I_a &= \sqrt{2}I_n k_y - \sqrt{2}I_n = \sqrt{2}I_n (k_y - 1), \\ I_y &= \sqrt{I_n^2 + 2I_n^2 (k_y - 1)^2} = I_n \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}. \end{aligned}$$

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

$$I_y = \sqrt{1 + 50 \cdot T_a}.$$

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

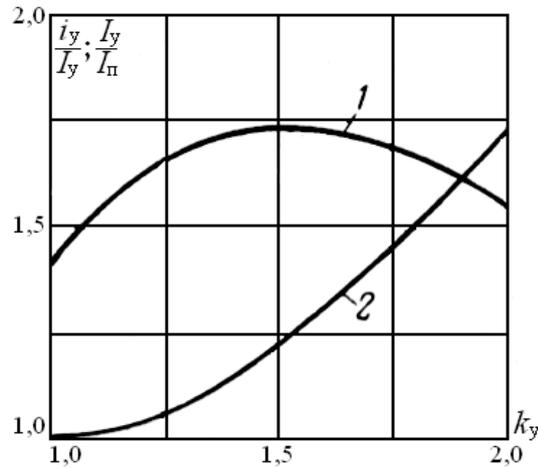


Рис. 2.11. Кривые изменения отношений i_y/I_y (кривая 1) и I_y/I_n (кривая 2) в зависимости от ударного коэффициента k_y

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

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

Различие в поведении синхронных двигателей (СД) в начальный момент переходного процесса определяется в сущности величинами их сверхпереходных ЭДС E'' . У перевозбужденного СД, когда он выдает реактивную мощность, сверхпереходная ЭДС выше подведенного напряжения ($E'' > U_0$). Поэтому при любом резком снижении напряжения, вызванном, например, коротким замыканием в сети, от которой питается двигатель, посылаемый им реактивный ток непременно возрастает. В режиме недовозбуждения, когда двигатель потребляет реактивную мощность, сверхпереходная ЭДС ниже подводимого напряжения ($E'' < U_0$). Здесь в зависимости от степени снижения напряжения возможно как продолжение потребления реактивного тока из сети (при $E'' < U_{|0|}$), так и генерирование реактивного тока (при $E'' > U_{|0|}$). В частном случае, когда $E'' = U_{|0|}$, этот ток будет отсутствовать в начальный момент переходного процесса.

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

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

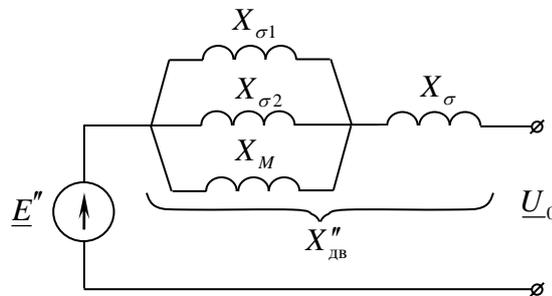


Рис. 2.12. К определению сверхпереходной реактивности АД:

X_{σ} , $X_{\sigma 1}$, $X_{\sigma 2}$ – сопротивления рассеяния обмоток статора и двух обмоток ротора;

X_M – сопротивление взаимоиנדукции между статором и ротором

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

$$X''_{дв} = 1 / K_I .$$

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

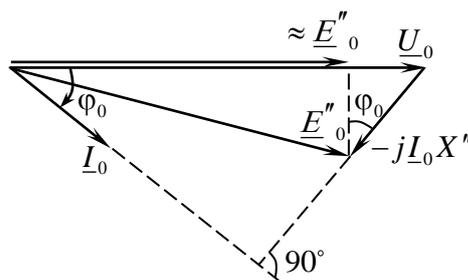


Рис. 2.13. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

В соответствии с векторной диаграммой

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

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

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

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

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

Исходя из вышесказанного, в начальный момент переходного процесса обобщенную нагрузку приближенно характеризуют величинами

$$X''_{\text{нагр}} = 0,35$$

и

$$E''_{\text{нагр}} = 0,85,$$

выраженными в относительных единицах при полной рабочей мощности нагрузки в мегавольтамперах и среднем номинальном напряжении той ступени, где она присоединена.

2.5. Приближённый учёт системы

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

$$S_K = \sqrt{3} I_{п0} U_{ср.ном},$$

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

Тогда его сопротивление определится по выражению

$$X_{GS} = \frac{I_6}{I_{п0}} = \frac{S_6}{S_K} \quad \text{или} \quad X_{GS} = \frac{U_{ср.ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{п0}} = \frac{U_{ср.ном}^2}{S_K},$$

где $U_{ср.ном}$ — среднее номинальное междуфазное напряжение системы GS , которое принимают неизменным за сопротивлением X_{GS} ; I_6 - базисный ток на той же ступени, что и ток $I_{п0}$.

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

Реактивность системы также можно приближённо оценить из условия предельного использования выключателя, установленного или намечаемого к установке в данном узле ЭЭС, то есть считая, что ток и мощность при трёхфазном КЗ непосредственно за этим выключателем равны соответственно его номинальному (симметричному) отключаемому току $I_{откл.ном}$ или номинальной отключаемой мощности $S_{откл.ном}$ при напряжении данной ступени. В этом случае под $I_{п0}$ и S_K следует понимать $I_{откл.ном}$ и $S_{откл.ном}$.

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

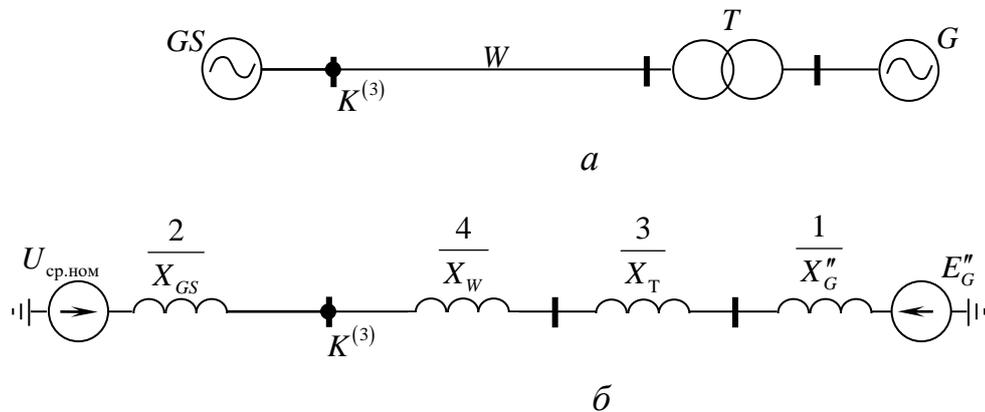


Рис. 2.14. К определению сопротивления GS : *а* — электроэнергетическая система; *б* — схема замещения системы

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

$$\begin{aligned} X_5 &= X_1 + X_3 + X_4, \\ X_\Sigma &= X_2 \parallel X_5, \\ E_\Sigma &= \frac{E_G'' X_2 + U_{\text{ср.ном}} X_5}{X_2 + X_5}, \end{aligned}$$

где X_Σ и E_Σ – эквивалентные (суммарные) сопротивление и ЭДС.

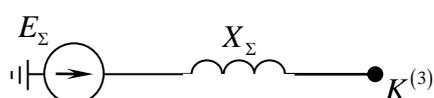


Рис. 2.15. Эквивалентная схема замещения электроэнергетической системы

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

$$\frac{S_6}{S_{\text{кз}}} = X_\Sigma, \quad (2.5)$$

где S_6 – базисная мощность, к которой отнесены сопротивления схемы замещения; $S_{\text{кз}}$ – мощность КЗ в узле замыкания.

Таким образом, X_Σ с одной стороны можно определить по формуле (2.5), а с другой стороны – схемным преобразованием

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

Преобразуя выражение (2.6), получим

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

откуда неизвестное сопротивление X_{GS} эквивалентной системы GS определится из уравнения (2.7), где сопротивление X_Σ найдено по выражению (2.5).

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

2.6. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания

2.6.1. Общие замечания

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

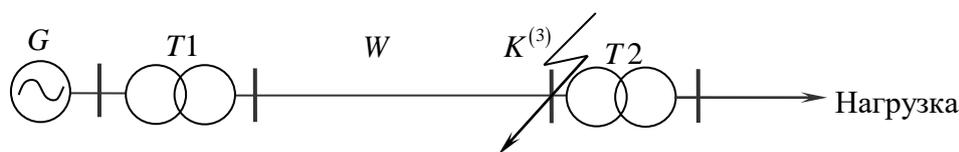


Рис. 2.16. Схема простейшей электроэнергетической системы

Задача определения тока КЗ даже в простейшей схеме, представленной на рис. 2.16, представляет определенные трудности. При наличии же в схеме нескольких генераторов задача резко усложняется. Даже неучет качаний роторов синхронных генераторов и поведения присоединенных нагрузок мало упрощает задачу, так как изменения аperiodических составляющих токов генераторов взаимосвязаны между собой. При наличии на генераторах автоматического регулирования возбуждения (АРВ) взаимосвязь имеет место и в изменениях периодических составляющих токов отдельных генераторов. Сложность задачи дополнительно усугубляется несимметрией роторов генераторов, поскольку машина характеризуется различными индуктивными сопротивлениями в продольной и поперечной осях ротора. В связи с этим, для решения многих практических задач, когда не требуется знания особенно точных результатов, разработаны приближённые методы расчетов. Практический метод расчета должен удовлетворять требованию простоты выполнения расчета переходного процесса, что предотвращает возможность ошибок. Однако, чем проще практический метод, тем на большем количестве допущений он основан и тем меньше его точность. Самые простые методы позволяют оценить только порядок искомых величин, но и этого часто бывает достаточно, чтобы обоснованно решить некоторые практические задачи. При решении практических задач расчета токов КЗ, помимо принятых ранее допущений, дополнительно принимаются следующие:

1. Закон изменения периодической составляющей тока короткого замыкания, установленный для схемы с одним генератором, можно использовать

для приближённой оценки этой составляющей в схеме с произвольным числом генераторов.

2. Аperiodическую составляющую тока короткого замыкания во всех практических расчётах определяют приближённо.

3. Принимают, что роторы всех синхронных генераторов симметричны, то есть сопротивления в продольной и поперечной осях полагают равными и опускают индексы d и q (X''). Это позволяет оперировать электродвижущими силами, напряжениями и токами без разложения их по продольной и поперечной осям.

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

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

Для определения начального значения периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания необходимо составить схему замещения электроэнергетической системы, представленной совокупностью схем замещения элементов при заданных условиях. В схеме замещения системы синхронные генераторы и компенсаторы, крупные синхронные и асинхронные электродвигатели, обобщённые нагрузки достаточно мощных узлов ЭЭС должны быть представлены своими приведёнными сверхпереходными сопротивлениями X'' . Синхронный явнополюсный генератор с демпферными обмотками на роторе представляется в схеме замещения сверхпереходным сопротивлением X''_d . При отказе от учёта демпфирования используется переходное сопротивление X'_d . За сопротивлениями X''_d приложены сверхпереходные ЭДС E'' . Если для рассматриваемых источников не заданы ЭДС, используются значения E_0'' , представленные в табл. 2.1.

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

Таблица 2.1

Значения сверхпереходных ЭДС в относительных единицах при номинальных условиях

| Тип элемента | E_0'' |
|---|---------|
| Турбогенератор мощностью до 100 МВт | 1,08 |
| Турбогенератор мощностью 100 МВт и более | 1,13 |
| Гидрогенератор с демпферными обмотками | 1,13 |
| Гидрогенератор без демпферных обмоток | 1,18 |
| Синхронный компенсатор | 1,20 |
| Синхронный электродвигатель | 1,10 |
| Асинхронный электродвигатель | 0,90 |
| Обобщенная нагрузка | 0,85 |
| Эквивалентная электроэнергетическая система | 1,00 |

Составленную схему замещения преобразовывают относительно места короткого замыкания, представляя её в конечном итоге одним сопротивлением X_Σ и ЭДС E_Σ (рис. 2.17).

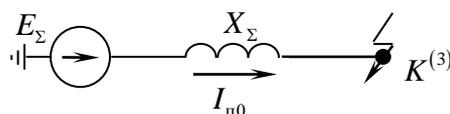


Рис. 2.17. Эквивалентная схема замещения электроэнергетической системы

Начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания

$$I_{n0} = \frac{E_\Sigma - U_K^{(3)}}{X_\Sigma}.$$

Определение ударного тока КЗ производят по выражению

$$i_y = \sqrt{2} I_{n0} k_y,$$

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

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

иначе

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

эквивалентная постоянная времени

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

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

Таблица 2.2

Соотношения индуктивных и активных сопротивлений элементов ЭЭС

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

Например, для синхронного генератора мощностью 100 МВт

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

После оценки активных сопротивлений тех же элементов, что и в схеме с индуктивными сопротивлениями, схема с резистивными элементами преобразуется аналогично схеме с индуктивными сопротивлениями. В результате преобразований получают R_Σ , с учётом которого получают T_a , k_y и i_y . При

расчётах в относительных базисных единицах искомый ток $I_{п0}$ в именованных единицах, кА, определяется по выражению

$$I_{п0} = I_{п0*(6)} I_6,$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6},$$

где $I_{п0*(6)}$ – значение периодической составляющей тока КЗ в относительных единицах при базисных условиях; I_6 – базисный ток; U_6 – базисное напряжение на ступени КЗ.

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

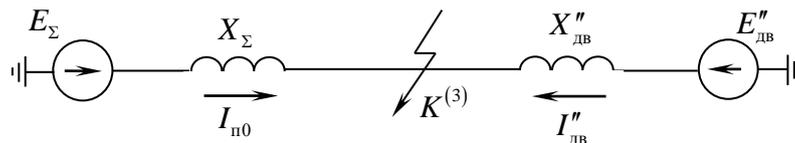


Рис. 2.18. Схема замещения ЭЭС для определения величины ударного тока от двигателя

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

Аварийный ток от АД

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

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

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

Ударный коэффициент для асинхронного электродвигателя определяется

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

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

где $T_{п}$ и $T_{а,дв}$ определяются

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

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

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

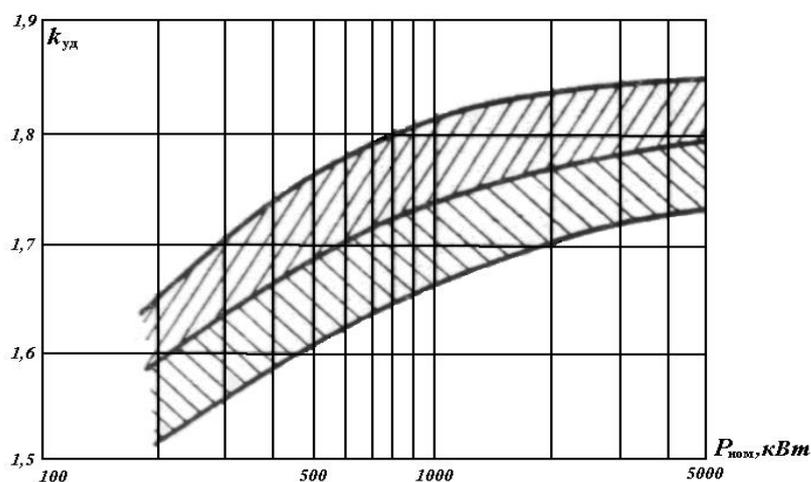


Рис. 2.19. Зависимость ударного коэффициента для асинхронного электродвигателя от его активной мощности

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

Для схемы, представленной на рис. 2.18, ударный ток может быть оценён как сумма двух ударных токов

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

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

2.6.3. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания

1. Составляется схема замещения для начального момента времени переходного процесса, в которой все синхронные генераторы и компенсаторы, крупные синхронные и асинхронные электродвигатели, обобщённые нагрузки мощных узлов электроэнергетических систем вводятся в схему замещения своими сверхпереходными сопротивлениями X'' с приложенными за ними сверхпереходными ЭДС E''_0 . Остальные элементы вводятся своими обычными сопротивлениями установившегося режима. Обобщённые нагрузки, примыкающие к узлу короткого замыкания, в схеме замещения необходимо учесть, а нагрузки, связанные с этим узлом через трансформаторы, воздушные и кабельные линии, допускается в схему замещения не включать, так как их влияние будет незначительно, а следовательно, и трансформаторы полностью или только некоторые обмотки трансформаторов, за которыми расположены такие нагрузки, можно исключить из схемы замещения.

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

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

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

и величина ударного тока

$$i_y = \sqrt{2} I_{п0} k_y,$$

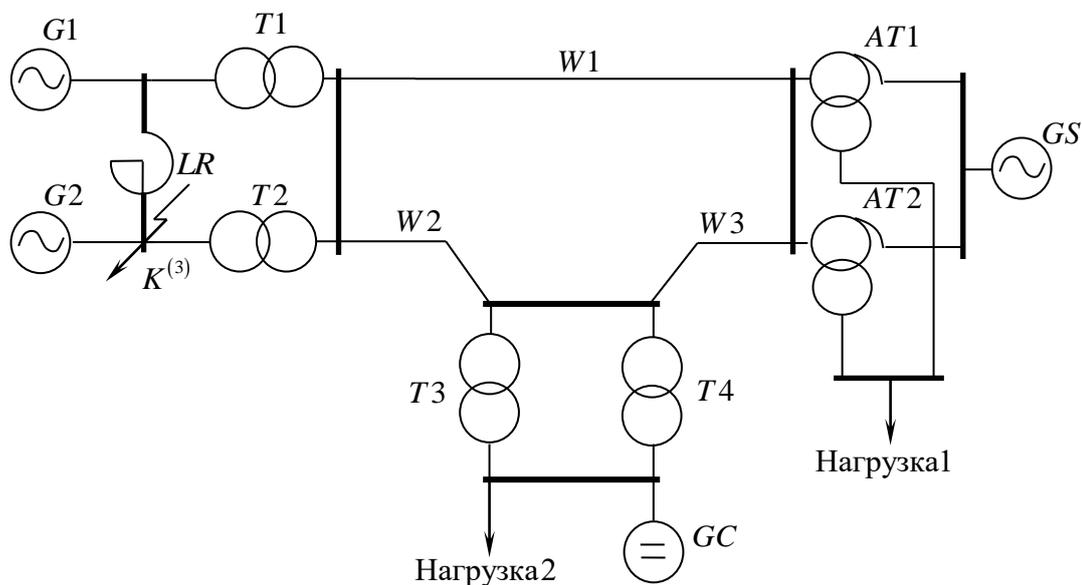
$$k_y = f(T_a).$$

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

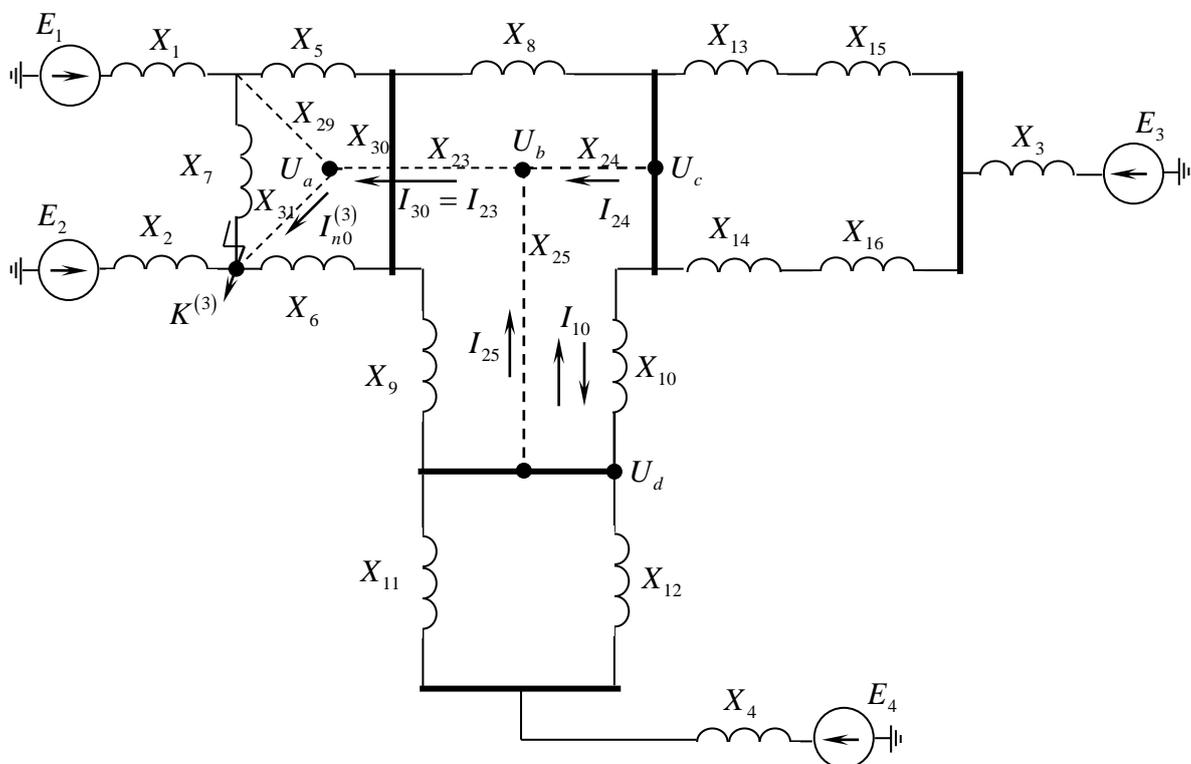
Пример. При трёхфазном коротком замыкании на выводах генератора G2

электроэнергетической системы, представленной на рис. 2.20,а, определить начальное значение периодической составляющей тока короткого замыкания и ток в линии W3.

Представим схему замещения электроэнергетической системы на рис. 2.20,б.



а



б

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

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

Преобразуем схему замещения

$$\begin{aligned} X_{17} &= X_{13} + X_{15}, \\ X_{18} &= X_{14} + X_{16}, \\ X_{19} &= X_{17} \parallel X_{18}, \\ X_{20} &= X_3 + X_{19}, \\ X_{21} &= X_{11} \parallel X_{12}, \\ X_{22} &= X_4 + X_{21}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} X_{23} &= \frac{X_8 X_9}{X_8 + X_9 + X_{10}}, \\ X_{24} &= \frac{X_8 X_{10}}{X_8 + X_9 + X_{10}}, \\ X_{25} &= \frac{X_9 X_{10}}{X_8 + X_9 + X_{10}}, \\ X_{26} &= X_{22} + X_{25}, \\ X_{27} &= X_{20} + X_{24}, \\ X_{28} &= X_{26} \parallel X_{27}. \end{aligned}$$

Эквивалентная ЭДС

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

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

$$\begin{aligned} X_{32} &= X_{23} + X_{28} + X_{30}, \\ X_{33} &= X_1 + X_{29}, \\ X_{34} &= X_{32} \parallel X_{33}, \\ E_6 &= \frac{E_1 X_{32} + E_5 X_{33}}{X_{32} + X_{33}}, \\ X_{35} &= X_{31} + X_{34}. \end{aligned}$$

Эквивалентные суммарные сопротивление и ЭДС

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

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

Начальное значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания

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

Найдём ток в линии W3

$$I_{31} = I_{35} = \frac{E_6 - U_{\text{к}}^{(3)}}{X_{35}},$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

либо при $U_c < U_d$

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

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

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

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

$$\gamma_t = \frac{I_{m,G}}{I_{n0,G}} = f(t).$$

Типовые кривые 1975 г. как основные, так и дополнительные представлены на рис. 2.21.

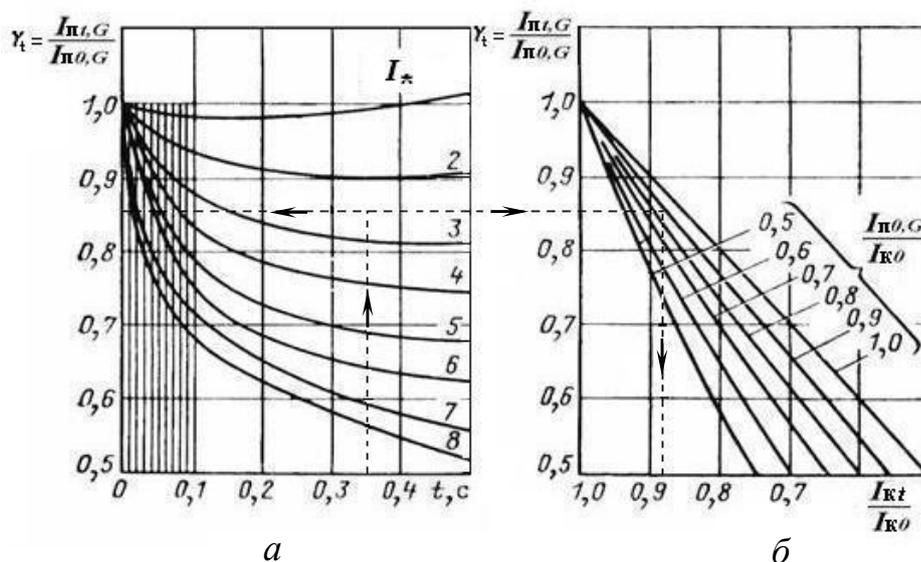


Рис. 2.21. Типовые кривые для определения периодической составляющей тока короткого замыкания: *а* – основные типовые кривые, *б* – дополнительные типовые кривые

Основные кривые (рис. 2.21, *а*) – это кривые в следующих координатах: по оси ординат – отношение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в ветви генератора к действующему значению тока в этой же ветви в момент времени $t=0$, $I_{m,G}/I_{n0,G}$. Аналогично для дополнительных кривых (рис. 2.21, *б*). По оси абсцисс: для основных кривых – время, для дополнительных кривых – отношение тока в узле короткого замыкания в произвольный момент времени к току в этом же узле в момент времени $t=0$, I_{kt}/I_{k0} .

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

Значение тока генератора $I_{ном,G}^{\circ}$ определится в виде, кА

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

Здесь $S_{ном,G}$ – номинальная мощность генератора, МВА;

$U_{ср.ном}$ – среднее номинальное напряжение ступени короткого замыкания, выбранное по шкале средних номинальных напряжений, кВ.

Значение тока к заданному моменту времени от начала короткого замыкания

$$I_{пт,G} = I_{п0,G} \gamma_t$$

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

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

$$I_{пт} \leq I_{откл.ном}$$

$$\tau = t_{св} + 0,01$$

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

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

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

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

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}^{\circ}} = 8$$

Для этой кривой принята постоянная времени, равная 0,25 с.
Типовые кривые определяются удалённостью короткого замыкания

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}} = I_*$$

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

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

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

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{ном,G}} < 1.$$

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

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

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

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

$$\frac{I_{kt}}{I_{k0}} = f\left(\frac{I_{шт,G}}{I_{п0,G}}\right).$$

В том случае, когда

$$\frac{I_{п0,G}}{I_{k0}} < 0,5$$

ток КЗ не затухает

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

Метод типовых кривых применяется в тех случаях, когда узел короткого замыкания находится у выводов генератора (синхронного компенсатора) или на небольшой электрической удалённости от них, например за трансформаторами связи электростанции с электроэнергетической системой. Все генераторы (синхронные компенсаторы), значительно удалённые от узла короткого замыкания (находящиеся за большим сопротивлением) и остальную часть энергосистемы, в частности эквивалентную электроэнергетическую систему GS , следует заменять одним источником и считать напряжение на его зажимах неизменным по амплитуде, то есть считать источником неограниченной мощности. Если такой источник GS связан с местом короткого замыкания непосредственно, то есть независимо от генераторов, расположенных вблизи места короткого замыкания, то его действующее значение периодической составляющей тока в этих условиях также следует принимать неизменным.

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

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

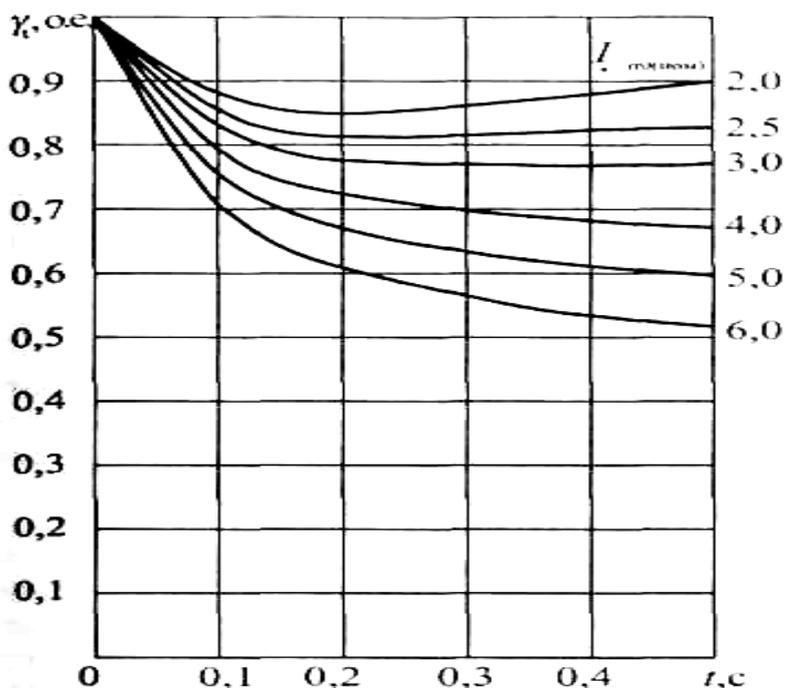


Рис. 2.22. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

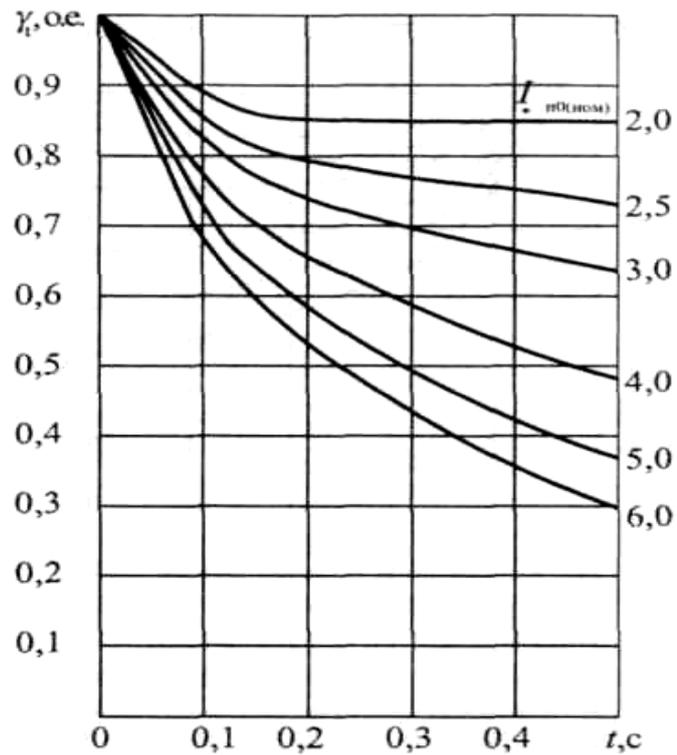


Рис. 2.23. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с тиристорной системой самовозбуждения

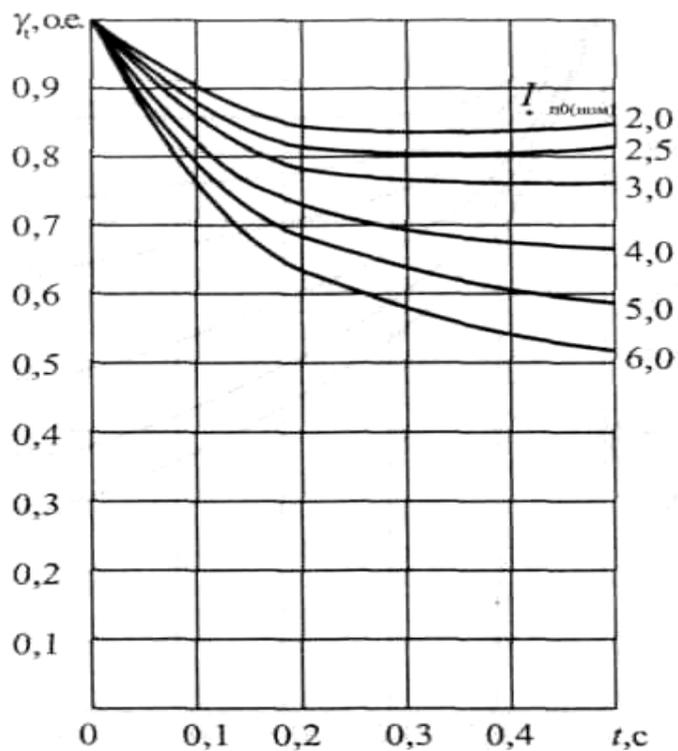


Рис. 2.24. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока короткого замыкания от турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения

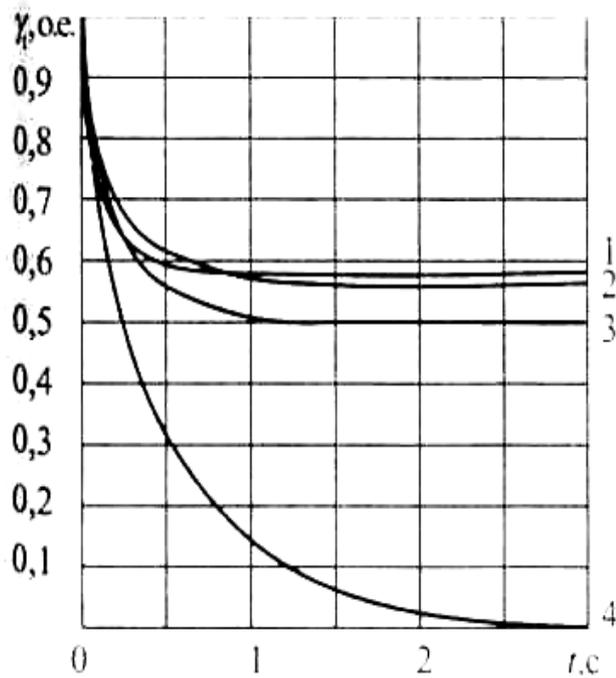


Рис. 2.25. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока при трёхфазных коротких замыканиях на выводах турбогенераторов с различными системами возбуждения: 1 – диодной бесщеточной; 2 – тиристорной независимой; 3 – диодной независимой; 4 – тиристорной самовозбуждения

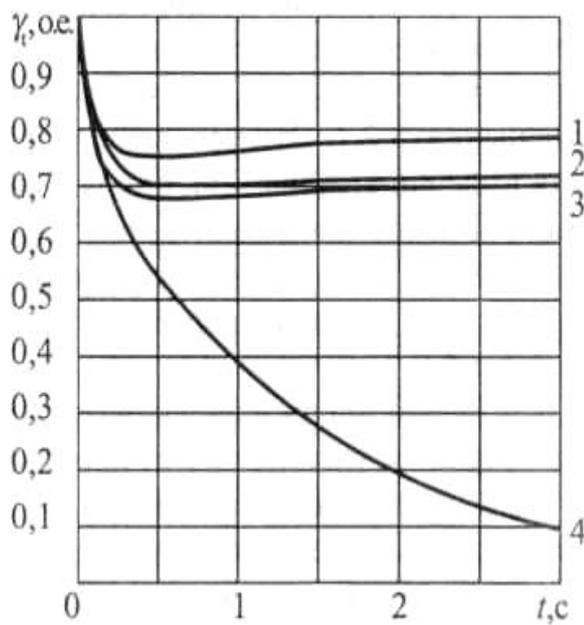


Рис. 2.26. Типовые кривые изменения периодической составляющей тока при трёхфазных коротких замыканиях на стороне высшего напряжения блочных трансформаторов, подключенных к турбогенераторам с различными системами возбуждения: 1 – диодной бесщеточной; 2 – тиристорной независимой; 3 – диодной независимой;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

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

1. Определяется вариант использования основных или дополнительных типовых кривых.

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

Дополнительные типовые кривые применяют, если электроэнергетическая система представлена генераторами (генератором) и шинами неизменного напряжения GS (генераторы находятся в различных условиях и связаны с местом короткого замыкания через общее для них сопротивление), рис. 2.28.

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

3. Схема замещения преобразовывается к одному из нижеследующих видов.

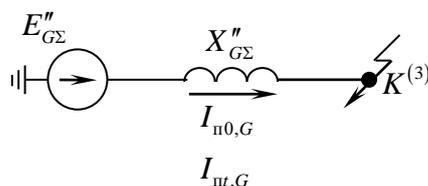


Рис. 2.27. Схема замещения электроэнергетической системы, представленной одиночным или эквивалентным генератором

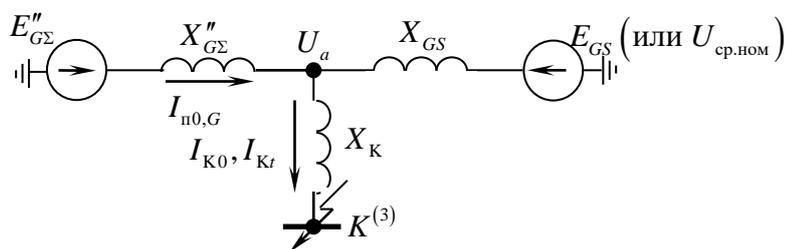


Рис. 2.28. Схема замещения электроэнергетической системы

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

- для основных типовых кривых

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

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

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

- для дополнительных типовых кривых

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

$$X_{\Sigma} = X_{\text{К}} + X_{G\Sigma} \parallel X_{G\Sigma}'',$$

$$I_{\text{К0}} = \frac{E_{\Sigma} - U_{\text{К}}^{(3)}}{X_{\Sigma}},$$

$$U_a = U_{\text{К}}^{(3)} + I_{\text{К0}} X_{\text{К}},$$

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

5. Определяется отношение $I_{\text{п0},G} / I_{\text{НОМ},G}^{\circ}$.

В том случае, если $I_{\text{п0},G} / I_{\text{НОМ},G}^{\circ} < 1$, то для:

- основных типовых кривых

$$I_{\text{пт},G} = I_{\text{п0},G};$$

- дополнительных типовых кривых

$$I_{\text{Кт}} = I_{\text{К0}}.$$

6. Определяется отношение $I_{\text{п0},G} / I_{\text{К0}}$ (только для дополнительных типовых кривых).

В том случае, если $I_{\text{п0},G} / I_{\text{К0}} < 0,5$, то

$$I_{\text{Кт}} = I_{\text{К0}}.$$

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

$$\frac{I_{nr,G}}{I_{n0,G}} = \gamma_t.$$

При заданном времени восстанавливается вертикаль до одной из основных типовых кривых (с применением интерполяции, см. рис. 2.21) с номером, определяемым отношением $I_{n0,G} / I_{ном,G}^o$; от точки пересечения движением вправо на одну из дополнительных типовых кривых находится отношение $I_{n0,G} / I_{к0}$. Точка пересечения с дополнительной кривой проектируется на горизонтальную ось, определяя величину коэффициента k_t .

$$k_t = \frac{I_{кt}}{I_{к0}}.$$

8. Определяются действующие значения токов:

- для основных типовых кривых

$$I_{nr,G} = I_{n0,G} \gamma_t;$$

- для дополнительных типовых кривых

$$I_{кt} = I_{к0} k_t.$$

2.9. Установившийся режим короткого замыкания

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

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

В этих условиях переходный процесс характеризуется затуханием только апериодической составляющей тока короткого замыкания, см. формулу (2.3).

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

С увеличением тока в цепи статора генератора при КЗ увеличивается магнитный поток продольной реакции статора, который направлен навстречу

основному магнитному потоку, созданному током возбуждения, что приведёт к размагничиванию машины; поток в воздушном зазоре между статором и ротором уменьшится, а, соответственно, напряжение на зажимах генератора будет снижаться до уровня, зависящего от удалённости короткого замыкания и параметров синхронного генератора. Для того, чтобы компенсировать снижение напряжения в цепи, на генераторах предусмотрены автоматические устройства (автоматические регуляторы возбуждения – АРВ), которые увеличивают ток возбуждения синхронной машины при снижении напряжения, тем самым удаётся частично или полностью компенсировать снижение напряжения.

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

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

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

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

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

Основными характеристиками и параметрами, которыми характеризуется генератор в установившемся режиме короткого замыкания ($t = \infty$), являются:

характеристика холостого хода синхронной машины; синхронные ненасыщенные индуктивные сопротивления по продольной оси X_d и по поперечной оси X_q ; индуктивное сопротивление рассеяния статора X_σ ; предельный ток возбуждения $I_{f\text{пр}}$ (или "потолок" возбуждения).

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

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

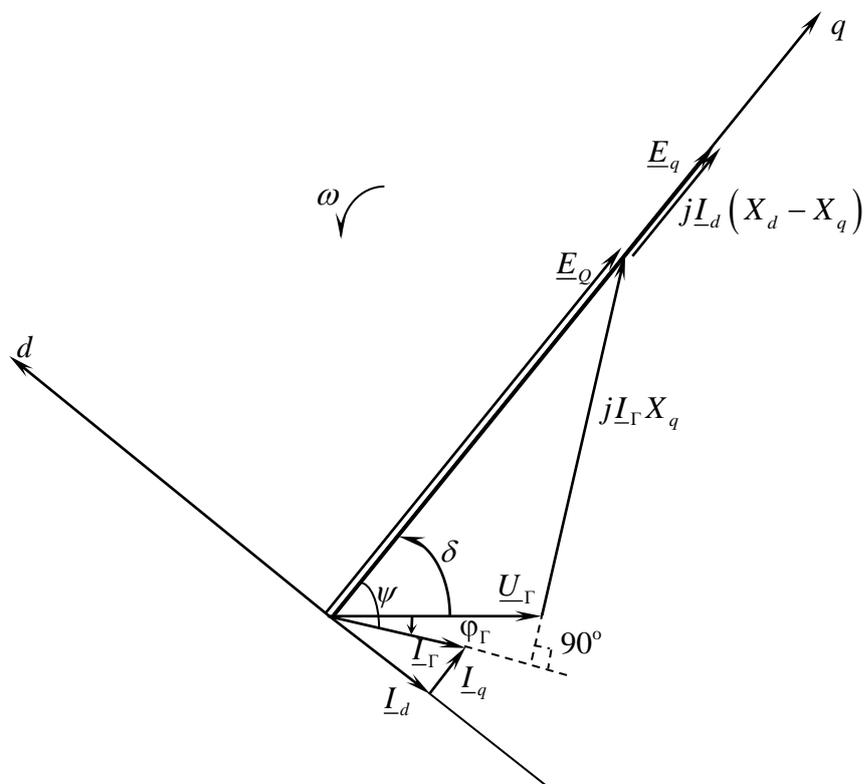


Рис. 2.29. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

В первом приближении относительную величину тока возбуждения можно определить из выражения

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

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

Для неявнополюсного генератора синхронные индуктивные сопротивления в обеих осях одинаковы $X_d = X_q$ и поэтому в относительных единицах

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

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

2.10. Влияние АРВ генераторов на установившийся режим короткого замыкания

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

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

Точка $K_2^{(3)}$ – короткое замыкание в конце линии. При коротком замыкании в этом узле ток возбуждения необходимо увеличивать в большей степени, нежели при коротком замыкании на шинах нагрузки. Однако в данном случае всё ещё возможно поддержание номинального напряжения при помощи АРВ.

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

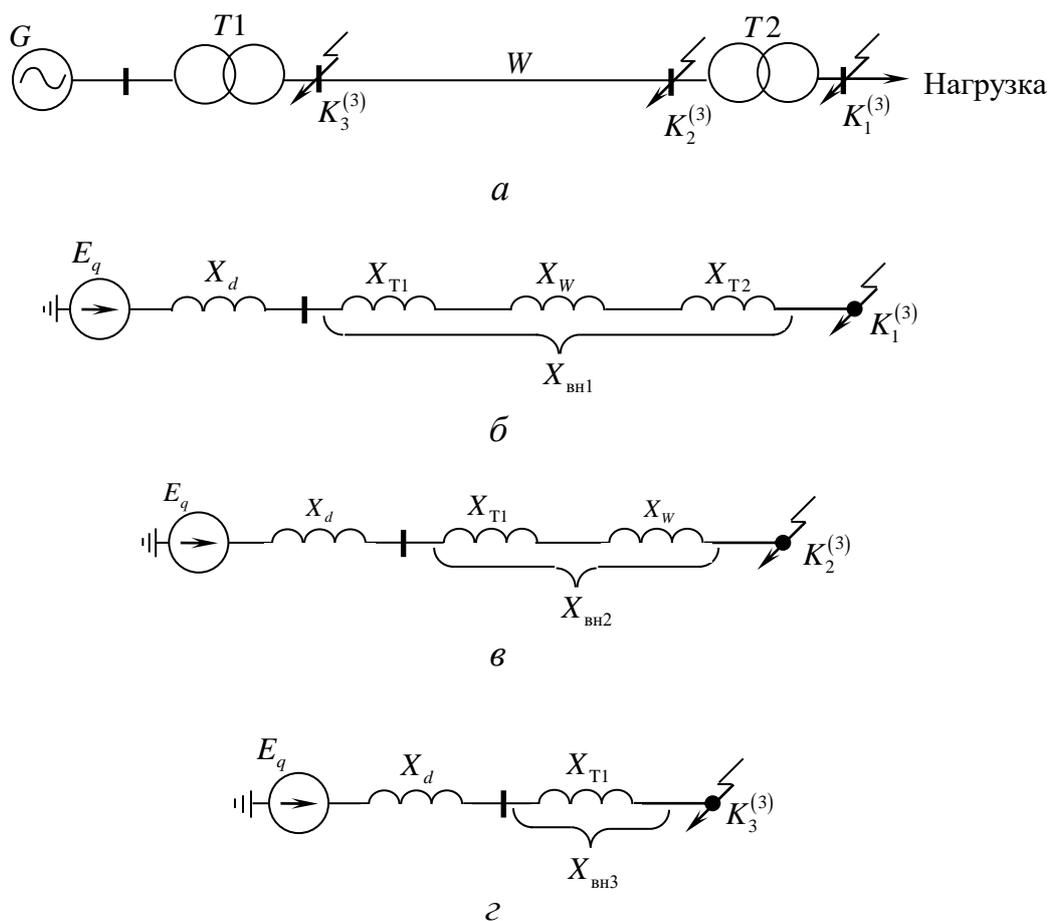


Рис. 2.30. Электроэнергетическая система (а) и схемы замещения (б, в, г) при различной удалённости КЗ

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

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

$$I_{кр} = \frac{U_{норм}}{X_{кр}}.$$

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

Режимы генератора с устройством АРВ

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

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

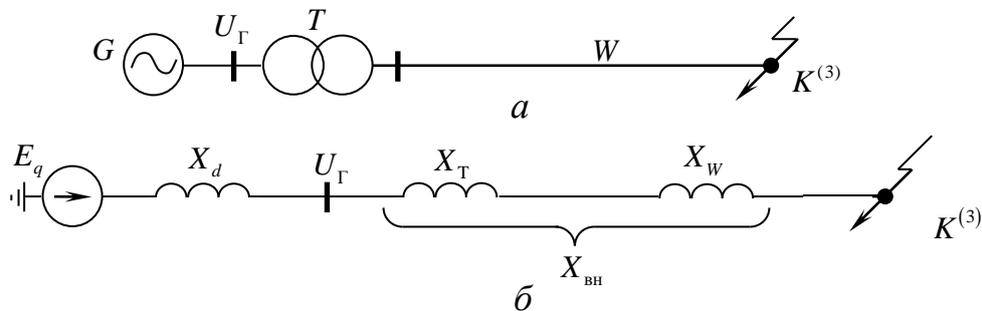


Рис. 2.31. Электроэнергетическая система (а), схема замещения электроэнергетической системы (б)

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

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

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

Эти выражения позволяют построить две характеристики:

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

Представим характеристики генератора на рис. 2.32.

Пусть прямая $F_{\Pi}M_{\Pi}$ соответствует внешней характеристике генератора при его предельном возбуждении.

Точка К, получаемая при проведении горизонтали на уровне $U_{\text{норм}}$, определяет критический режим.

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

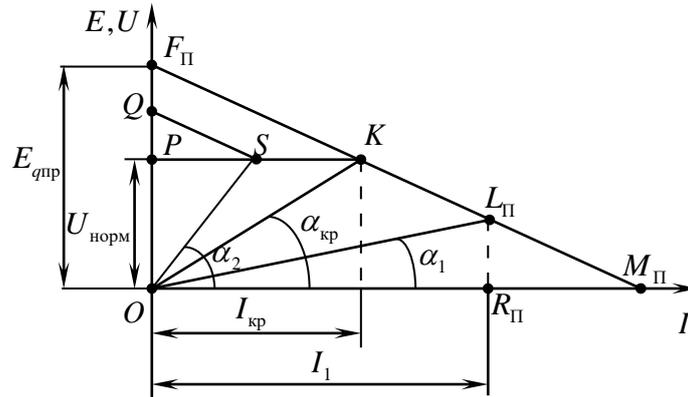


Рис. 2.32. Внешняя и нагрузочная характеристики генератора

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

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

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

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

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

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

2.11. Основные уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины и уравнения Горева – Парка

Из электромеханики известны дифференциальные уравнения равновесия ЭДС и падений напряжений в каждой из обмоток трёхфазной синхронной

машины

$$\begin{cases} u_\eta = -\frac{d\Psi_\eta}{dt} - Ri_\eta, \\ u_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + R_f i_f, \end{cases} \quad (2.11)$$

где $\eta = A, B, C$; Ψ_η и Ψ_f – результирующие потокосцепления трёх фазных обмоток и обмотки возбуждения (включая их потокосцепления рассеяния); R и R_f – активные сопротивления соответственно контуров каждой фазы и цепи возбуждения.

Проблема решения уравнений (2.11) в фазных координатах заключается в том, что потокосцепления Ψ зависят от индуктивностей и взаимоиндуктивностей

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f, \\ \Psi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f, \\ \Psi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f, \\ \Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f. \end{cases}$$

Поскольку ротор синхронной машины непрерывно изменяет свое положение относительно обмоток статора, являясь функцией времени, то коэффициенты, входящие в это уравнение (все индуктивности L_η , кроме L_f , и взаимоиндуктивности M), будут переменными. Следовательно, дифференциальные уравнения (2.11) содержат переменные коэффициенты, являющиеся функциями времени. Решение уравнений в фазных координатах затруднено и поэтому осуществляют замену фазных переменных их составляющими в координатах $d, q, 0$ (рис.2.33).

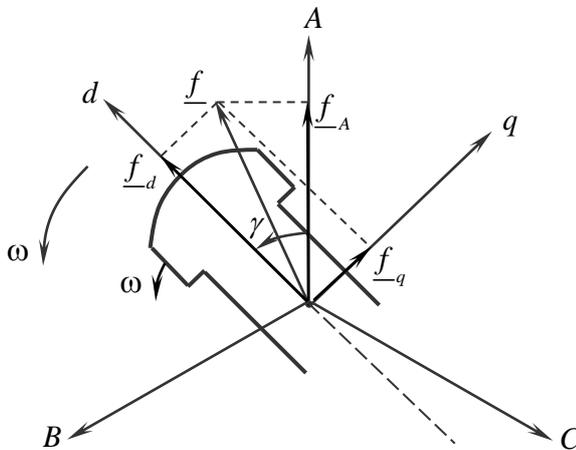


Рис. 2.33. Переход от фазных координат к координатам $d, q, 0$

Сущность такого преобразования состоит в том, что:

1) переход от трёхосной к двухосной ортогональной системе координат соответствует тому, что трёхфазная машина заменена эквивалентной двухфазной; тем самым сокращены число уравнений (2.11) и коэффициенты взаимоиנדукции M ;

2) двухосная система координат предполагается жёстко связанной с ротором, где её оси совмещают соответственно с продольной d и поперечной q осями ротора.

Когда условие $f_A + f_B + f_C = 0$, где f_A , f_B и f_C – любые фазные переменные, не соблюдается, к координатам d , q добавляется третья координата 0 , которая определяет нулевую составляющую переменных величин.

Поскольку фазные обмотки эквивалентной машины, расположенные в осях d и q , неподвижны относительно ротора (вращаются вместе с ротором), все индуктивности такой машины постоянны. Это позволяет уравнения (2.11) преобразовать в соответствующие уравнения с постоянными коэффициентами.

Связь между фазными координатами и координатами d , q , 0 следующая (см. рис. 2.33)

$$\begin{cases} f_A = f_d \cos \gamma + f_q \sin \gamma + f_0, \\ f_B = f_d \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + f_q \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + f_0, \\ f_C = f_d \cos \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) + f_q \sin \left(\gamma - \frac{4\pi}{3} \right) + f_0. \end{cases} \quad (2.12)$$

Здесь фазовый сдвиг γ – угол между продольной осью ротора d и магнитной осью фазы A .

В соответствии с (2.12) выразим напряжение, ток и потокосцепление фазы A через новые переменные

$$u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0,$$

$$i_a = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0,$$

$$\Psi_A = \Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0.$$

Подставив их в первое уравнение (2.11), получим

$$u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + u_0 = -\frac{d}{dt} (\Psi_d \cos \gamma + \Psi_q \sin \gamma + \Psi_0) - R (i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0) =$$

$$= -\frac{d\Psi_d}{dt} \cos \gamma + \Psi_d \sin \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_q}{dt} \sin \gamma - \Psi_q \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\Psi_0}{dt} - Ri_d \cos \gamma - Ri_q \sin \gamma - Ri_0.$$

После переноса всех слагаемых в левую часть и перегруппировки это выражение можно представить в виде

$$\left(u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} + Ri_d \right) \cos \gamma + \left(u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} + Ri_q \right) \sin \gamma + \left(u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + Ri_0 \right) = 0. \quad (2.13)$$

Из математики известно, что равенство нулю уравнения (2.13) возможно только в том случае, если нулю равны выражения, заключенные в скобки. Таким образом, данное уравнение распадается на три уравнения с постоянными коэффициентами

$$\begin{cases} u_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - Ri_d, \\ u_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - Ri_q, \\ u_0 = -\frac{d\Psi_0}{dt} - Ri_0. \end{cases} \quad (2.14)$$

Уравнение для обмотки возбуждения сохраняется таким же, что и в (2.11).

Полученные уравнения (2.14) выражают основу теории двух реакций синхронной машины при электромагнитном переходном процессе; их называют уравнениями Горева – Парка. Эти уравнения показывают, что в переходном процессе в обмотке статора наводятся две дополнительные ЭДС. Одна из них связана с изменением угловой скорости машины ($\Psi \cdot d\gamma/dt$), не зависит от изменения магнитного потока во времени и называется ЭДС вращения. Другая, напротив, определяется изменением магнитного потока во времени ($d\Psi/dt$), не зависит от частоты вращения ротора и называется ЭДС трансформации. Принято говорить, что расчёты, основанные на таком подходе, выполняются по полным уравнениям Горева – Парка.

При неучёте электромагнитных переходных процессов в цепях статора, т.е. $d\Psi/dt = 0$, получим одну из упрощённых форм уравнений Горева – Парка для анализа переходных процессов

$$\begin{cases} u_d = -\Psi_q \frac{d\gamma}{dt} - Ri_d, \\ u_q = \Psi_d \frac{d\gamma}{dt} - Ri_q, \\ u_0 = -Ri_0. \end{cases}$$

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

3.1. Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов

3.1.1. Общие сведения. Образование высших гармоник

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

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

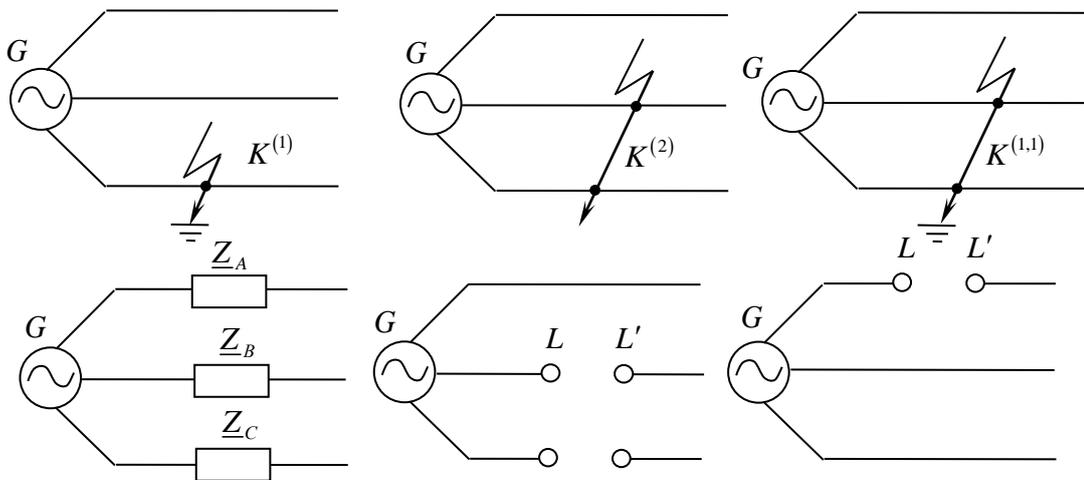


Рис. 3.1. Принципиальные схемы несимметрий в ЭЭС

Аналитическое исследование несимметричных переходных процессов сложнее, чем исследование симметричных режимов, так как уравнения процесса должны быть составлены не для одной фазы, а для каждой фазы исследуемой цепи. Дополнительные трудности анализа связаны с возникновением пульсирующего магнитного поля ротора синхронной машины вследствие нарушения симметрии статорной цепи. Предположим, что в одной из фаз статора явнополюсного синхронного генератора без демпферных обмоток, принципиальная модель которого представлена на рис. 3.2, протекает

ток синхронной частоты f_0 . Образующийся при этом пульсирующий магнитный поток остается в пространстве в одном и том же положении. Этот магнитный поток можно представить двумя магнитными потоками, вращающимися навстречу друг другу с угловой синхронной частотой $\pm\omega_0$. Знак «+» означает вращение против часовой стрелки, а знак «-» – по часовой стрелке (рис. 3.2).

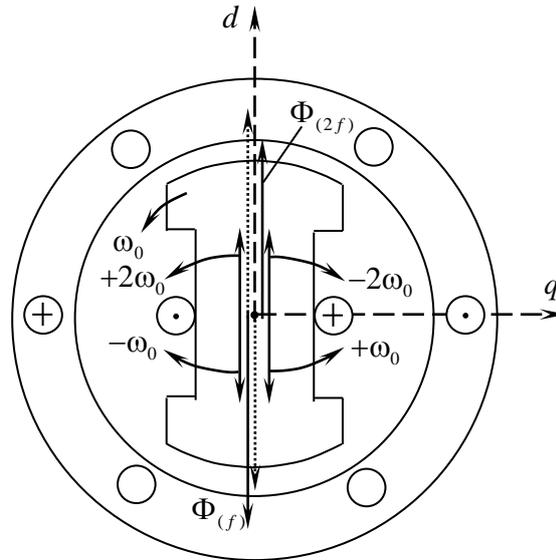


Рис. 3.2. – Принципиальная модель явнополюсного синхронного генератора без демпферных обмоток при несимметричном режиме статора

Поток, вращающийся синхронно с ротором, относительно последнего неподвижен и соответственно взаимодействует с магнитным потоком обмотки возбуждения. Другой магнитный поток, вращающийся навстречу ротору, будет иметь по отношению к нему двойную угловую частоту $2\omega_0$, поэтому в обмотке возбуждения наводит ЭДС двойной синхронной частоты $2f_0$. Обусловленный этой ЭДС ток частоты $2f_0$ создает пульсирующий с частотой $2f_0$ магнитный поток $\Phi_{(2f)}$, вращающийся вместе с ротором. Разложение магнитного потока $\Phi_{(2f)}$ на два потока, вращающихся в противоположные стороны с угловой частотой $2\omega_0$ относительно ротора, показывает, что один из них, вращаясь по отношению к статору с угловой частотой $(2\omega_0 - \omega_0) = \omega_0$ в сторону, противоположную вращению ротора, оказывается неподвижным относительно потока, вызвавшего пульсирующий с частотой $2f_0$ поток ротора, и стремится его компенсировать. Другой поток вращается относительно статора с угловой частотой $(2\omega_0 + \omega_0) = 3\omega_0$. Данный поток наводит в статоре ЭДС и

ток тройной синхронной частоты $3f_0$. Этот ток создает в расточке статора пульсирующий магнитный поток этой же частоты.

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

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

3.1.2. Некоторые положения метода симметричных составляющих

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

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

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

ными (векторная сумма равна нулю). Система нулевой последовательности является симметричной, но неуравновешенной.

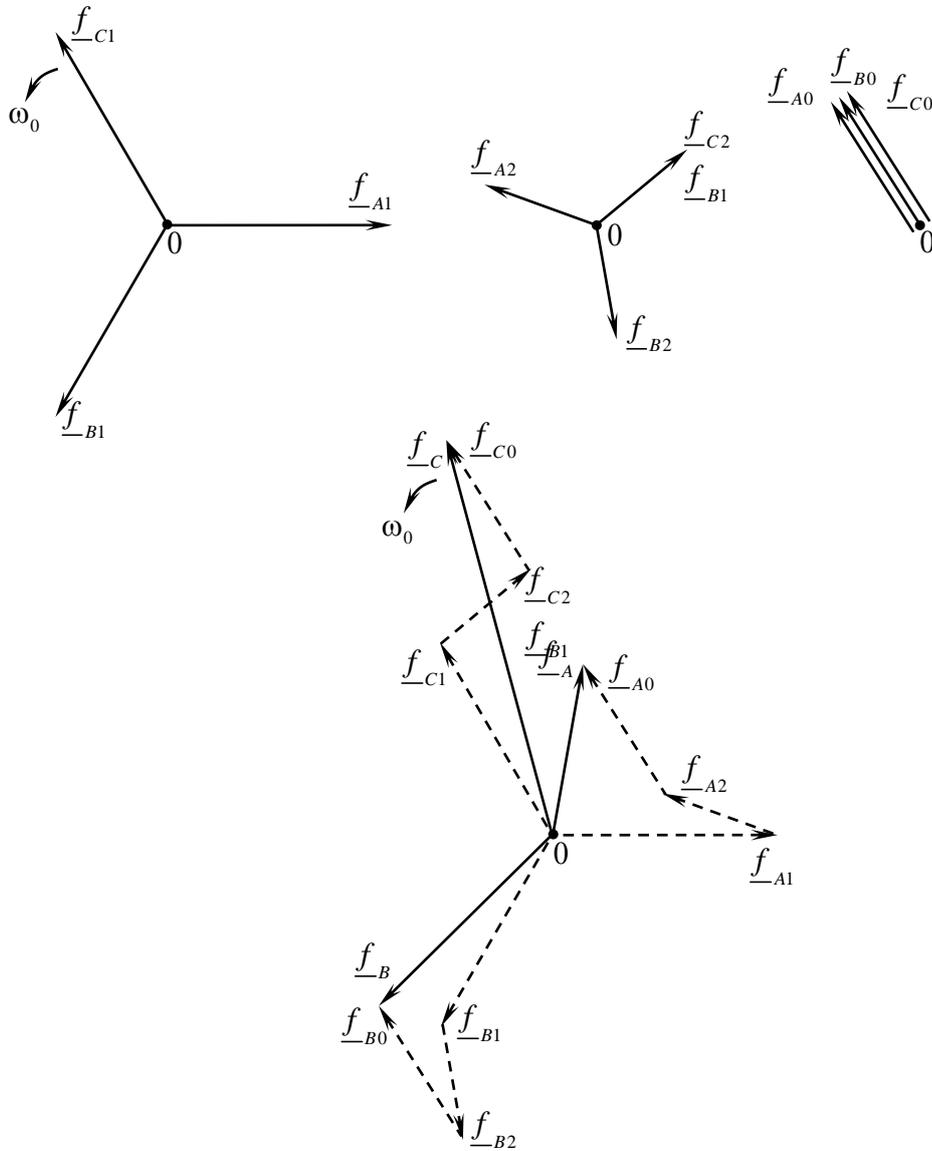


Рис. 3.3. Системы прямой, обратной и нулевой последовательностей и несимметричная система $\underline{f}_A, \underline{f}_B, \underline{f}_C$

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

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

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

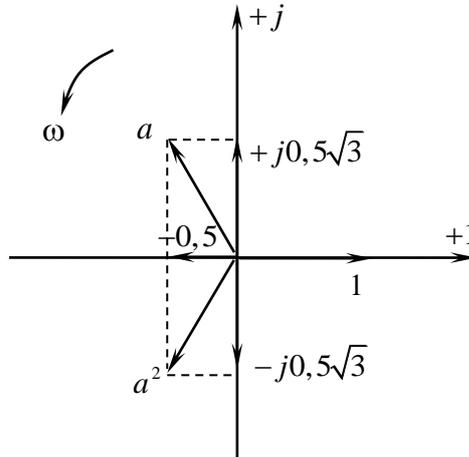


Рис. 3.4. Система единичных векторов

$$\begin{aligned}
 1 &= e^{j^0} = e^{j360^\circ}, \\
 a &= e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ} = -0,5 + j0,5\sqrt{3}, \\
 a^2 &= e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -0,5 - j0,5\sqrt{3}.
 \end{aligned}$$

Сумма этих трех единичных векторов равна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

то

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

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

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

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

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

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

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

а затем по аналогии с предыдущим получаем

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

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

3.1.3. Применение метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов

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

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

$$\Delta \underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1,$$

$$\Delta \underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_2,$$

$$\Delta \underline{U}_0 = \underline{I}_0 \underline{Z}_0.$$

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

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

Установленные на генераторах АРВ (независимо от конструкции этих устройств) реагируют только на отклонение напряжения прямой последовательности, тем самым полагаем, что АРВ включены через фильтры

напряжения прямой последовательности, и поддерживают напряжения прямой последовательности на выводах генератора на номинальном уровне.

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

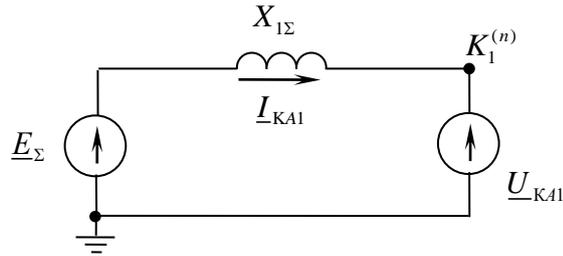


Рис. 3.5. Эквивалентная схема замещения прямой последовательности

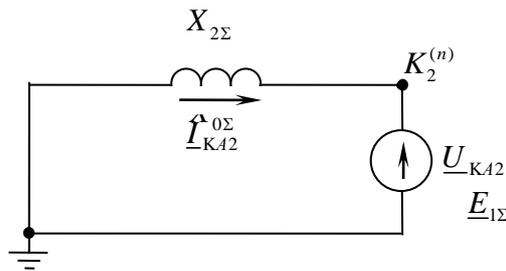


Рис. 3.6. Эквивалентная схема замещения обратной последовательности

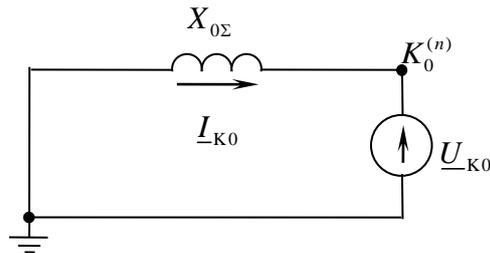


Рис. 3.7. Эквивалентная схема замещения нулевой последовательности

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

$$\underline{U}_{KA1} = \underline{E}_{\Sigma} - \underline{I}_{KA1} jX_{1\Sigma}, \quad (3.3)$$

$$\underline{U}_{KA2} = 0 - \underline{I}_{KA2} jX_{2\Sigma}, \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_{K0} = 0 - \underline{I}_{K0} jX_{0\Sigma}. \quad (3.5)$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_0, \\ X_1 &= X_2 = X_0, \\ \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_2 = \underline{Z}_0. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2, \\ X_1 &= X_2, \\ \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_2. \end{aligned}$$

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

3.2.1. Параметры синхронных машин

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

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

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

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

При неучете нечетных гармоник

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

Для этой же машины при учете третьей гармоники

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

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

При учете всего спектра нечетных гармоник сопротивление X_2 определяется в виде

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

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

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

При необходимости учета высших гармоник применяют более точное выражение:

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

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

Токи нулевой последовательности синхронных машин создают только магнитные потоки рассеяния обмотки статора. Они, как правило, меньше, чем при токах прямой или обратной последовательности, причем это умень-

шение сильно зависит от типа обмотки. Величина сопротивления токам нулевой последовательности находится в пределах

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

3.2.2. Параметры асинхронных электродвигателей

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

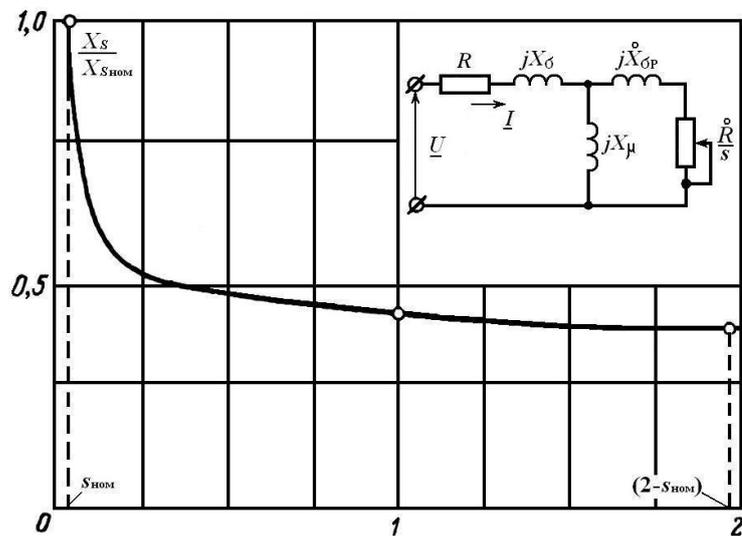


Рис. 3.8. Относительное изменение индуктивного сопротивления асинхронного электродвигателя в зависимости от скольжения

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

$$X_{s=1} = X_K'' = \frac{1}{I_{п*}}.$$

Поскольку $X_{(2-s_{ном})} \approx X_{s=1}$, то принимаем

$$X_2 = X_1 = X_K''.$$

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

3.2.3. Параметры обобщенной нагрузки

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

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

$$X_{2нагр} = X_{нагр}'' = 0,35.$$

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

3.2.4. Схемы замещения и параметры трансформаторов и автотрансформаторов

Схемы замещения и параметры трансформаторов и автотрансформаторов зависят от схем соединения обмоток и их конструкций. Для циркуляции токов нулевой последовательности в какой-либо обмотке трансформатора или

автотрансформатора (АТ) при появлении на ее выводах напряжения нулевой последовательности относительно земли необходима заземленная нейтраль.

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

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

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

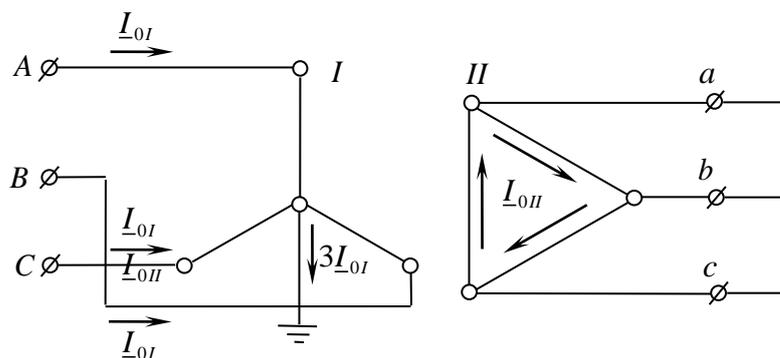


Рис. 3.9. Схема соединения обмоток трансформатора Y_0/Δ

T-образная схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности включает в себя сопротивление рассеяния первичной X_1 , вто-

ричной X_{II} обмоток и сопротивление ветви намагничивания X_{μ_0} (рис. 3.10), где точка, соответствующая линейным выводам обмотки II , соединяется с точкой нулевого потенциала (с землей); таким образом, сопротивление рассеяния обмотки, соединённой в треугольник, является крайним элементом схемы замещения нулевой последовательности, независимо от других элементов, подключенных к этой обмотке, то есть сопротивлением X_{II} заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

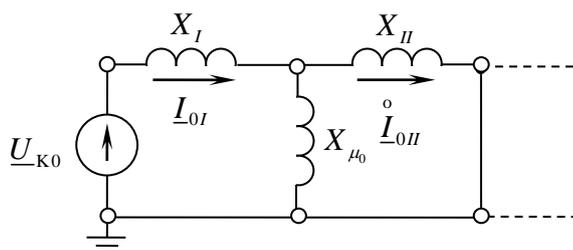


Рис. 3.10. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0/Δ для токов нулевой последовательности

Для двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 (рис. 3.11) циркуляция токов нулевой последовательности в обмотке II возможна лишь в том случае, когда фазы этой обмотки по отношению к указанным токам являются частью замкнутого контура, включающего в себя и землю. Путь для токов нулевой последовательности обеспечивается через заземленную нейтраль какого-либо внешнего элемента, например трансформатора, электрически связанного с обмоткой II .

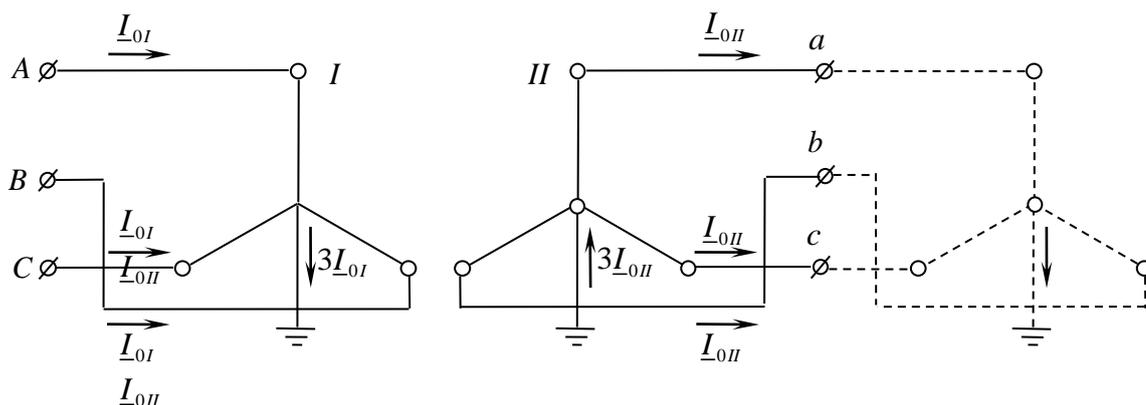


Рис. 3.11. Схема соединения обмоток двухобмоточного трансформатора Y_0/Y_0

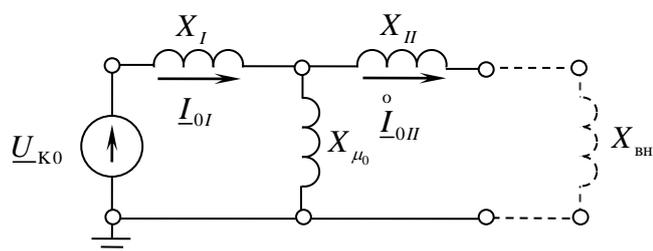


Рис. 3.12. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0/Y_0 для токов нулевой последовательности

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

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

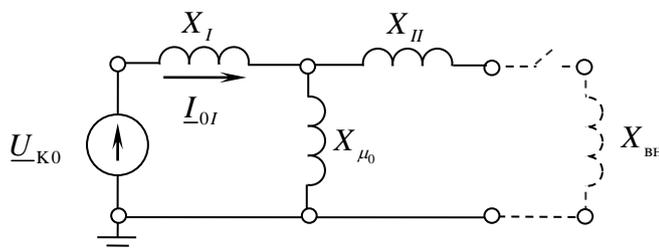


Рис. 3.13. Схема замещения двухобмоточного трансформатора Y_0/Y для токов нулевой последовательности

Величина X_{μ_0} зависит от конструкции трансформатора.

Для группы из трех однофазных трансформаторов, а также трехфазных четырех- и пятистержневых (броневых) ток намагничивания нулевой последовательности очень мал, так как в этом случае условия для замыкания магнитного потока нулевой последовательности практически те же, что и для магнитных потоков, создаваемых токами прямой (обратной) последовательности. В этом случае, как и в симметричных режимах, пренебрегаем ветвью намагничивания ($X_{\mu_0} = \infty$).

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

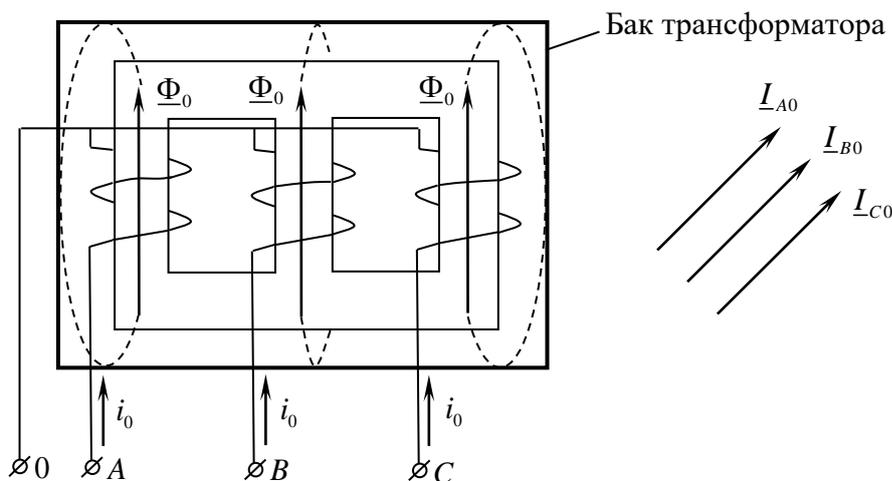


Рис. 3.14. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном трехстержневом трансформаторе

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

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

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

Таблица 3.1

Сопротивления X_0 токам нулевой последовательности

| Тип трансформатора и схема соединения обмоток | X_0 |
|--|-------------------|
| Трансформатор любого типа с соединением обмоток Y_0/Δ | X_1 |
| Трехфазная группа однофазных трансформаторов, трехфазные четырех- и пятистержневой трансформаторы: с соединением обмоток Y_0/Y , то же Y_0/Y_0 | ∞ X_1 |

| | |
|--|--|
| <p>Трехфазный трехстержневой трансформатор: с соединением обмоток Y_0/Y, то же Y_0/Y_0</p> | <p>$X_I + X_{\mu_0}$ Т-образная схема (рис. 3.12)</p> |
|--|--|

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

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

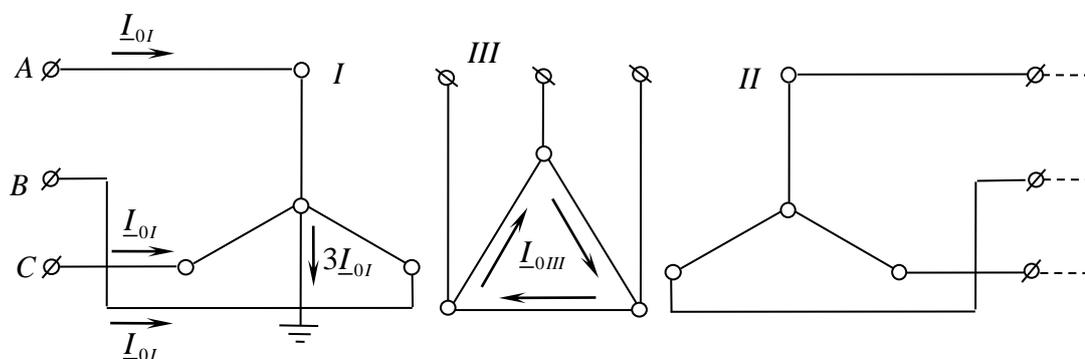


Рис. 3.15. Схема соединения обмоток трехобмоточного трансформатора $Y_0/Y/\Delta$

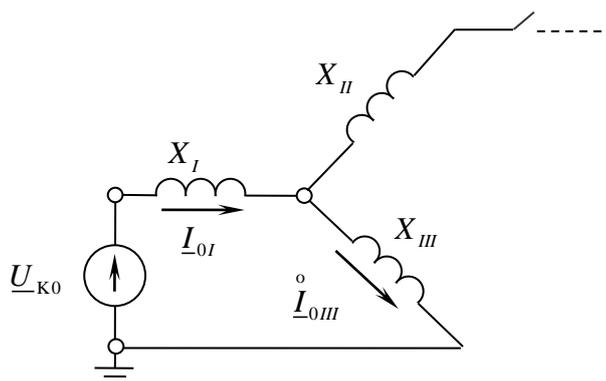
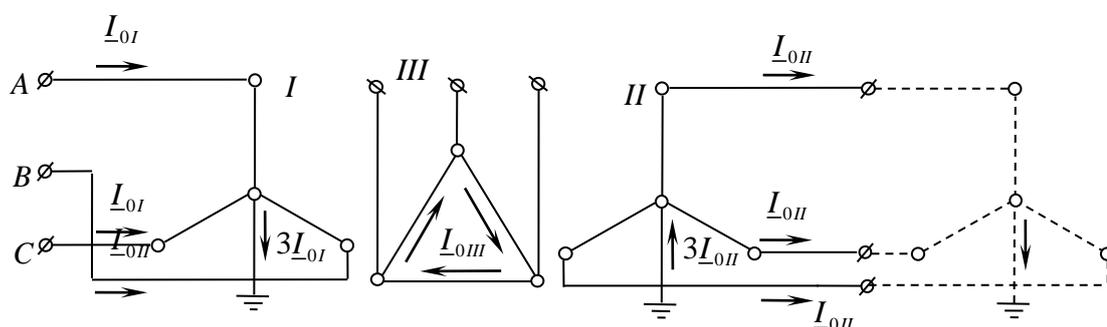


Рис. 3.16. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0/Y/\Delta$ для токов нулевой последовательности



\underline{I}_{0I}

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

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

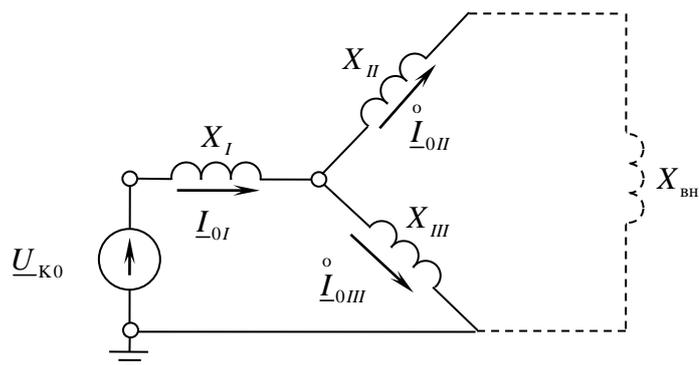


Рис. 3.18. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0/Y_0/\Delta$ для токов нулевой последовательности

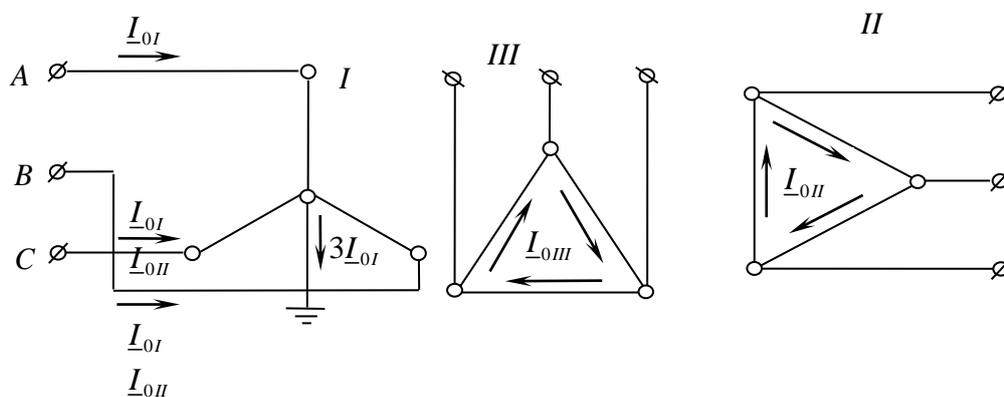


Рис. 3.19. Схема соединения обмоток трехобмоточного трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$

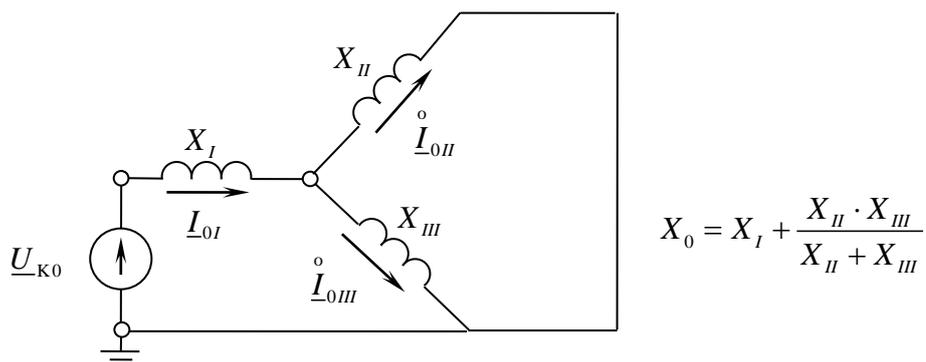


Рис. 3.20. Схема замещения трехобмоточного трансформатора $Y_0/\Delta/\Delta$ (двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой, $Y_0/\Delta-\Delta$) для токов нулевой последовательности

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

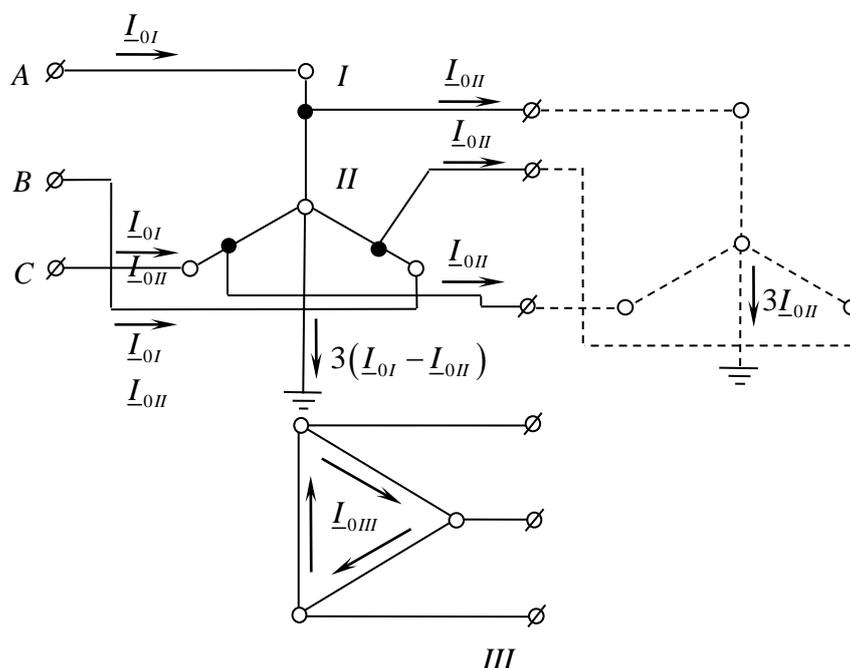


Рис. 3.21. Схема соединения обмоток автотрансформатора $Y_{0 \text{ авто}}/Y_0/\Delta$

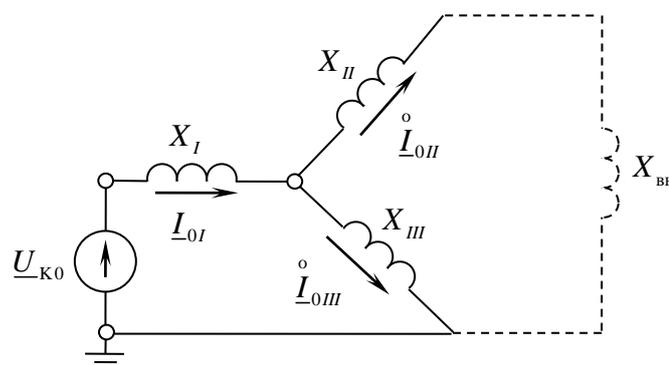


Рис. 3.22. Схема замещения автотрансформатора $Y_{0 \text{ авто}}/Y_0/\Delta$ для токов нулевой последовательности

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

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

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

3.2.5. Параметры воздушных линий электропередачи

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

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

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

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

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

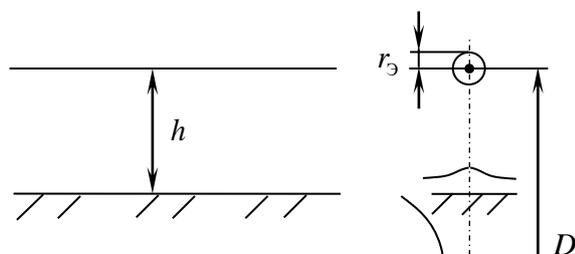


Рис. 3.23. Однопроводная линия «провод – земля»
и характеристика распределения плотности тока в земле

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сопротивление R_3 может быть определено из приближенного выражения

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

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

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

Сопротивление, обусловленное взаимной индукцией между двумя парами петель «провод – земля» с расстоянием d между осями проводов (рис. 3.24), можно определить из выражения (3.7).

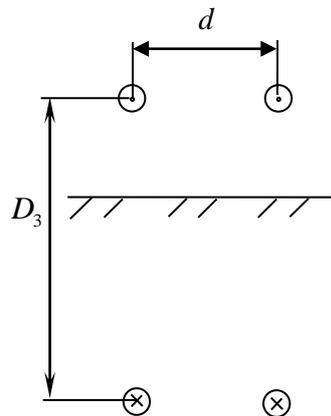


Рис. 3.24. Две пары петель «провод – земля»

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

Для трехфазной одноцепной ЛЭП с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимной индукции между фазами определяется по выражению (3.7) при замене расстояния d на D_{cp}

$$\underline{Z}_{Mcp} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{D_3}{D_{cp}},$$

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

Зная $\underline{Z}_L = R + jX_L$ и \underline{Z}_{Mcp} , нетрудно определить сопротивление \underline{Z}_0 токам нулевой последовательности рассматриваемой трехфазной одноцепной линии. Оно численно равно эффективному (действующему) значению напряжения, которое должно быть приложено к каждому проводу данной линии, чтобы покрыть падение напряжения при протекании в каждой фазе токов нулевой последовательности с эффективным значением $I_{A0} = I_{B0} = I_{C0} = 1$ А.

$$\begin{aligned} 1 \cdot \underline{Z}_0 &= 1 \cdot \underline{Z}_L + 1 \cdot \underline{Z}_{Mcp} + 1 \cdot \underline{Z}_{Mcp}, \\ \underline{Z}_0 &= \underline{Z}_L + \underline{Z}_{Mcp} + \underline{Z}_{Mcp} = \underline{Z}_L + 2 \cdot \underline{Z}_{Mcp}. \end{aligned}$$

С учетом вышеприведенных выражений и потерь мощности в земле

$$\underline{Z}_0 = R_{II} + 0,15 + j0,435 \lg \frac{D_3}{R_{cp}},$$

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

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

$$\begin{aligned} 1 \cdot \underline{Z}_1 &= 1 \cdot \underline{Z}_L + a^2 \underline{Z}_{Mcp} + a \underline{Z}_{Mcp}, \\ \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_L + (a^2 + a) \underline{Z}_{Mcp} = \underline{Z}_L - \underline{Z}_{Mcp}. \end{aligned}$$

После подстановки и преобразования имеем

$$\underline{Z}_1 = R_{II} + j0,145 \lg \frac{D_{cp}}{r_3}.$$

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

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_L - \underline{Z}_{Mcp}, \\ \underline{Z}_0 &= \underline{Z}_L + 2\underline{Z}_{Mcp}. \end{aligned}$$

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

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

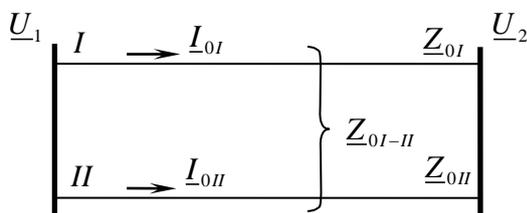


Рис. 3.25. Принципиальная схема двухцепной ЛЭП

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

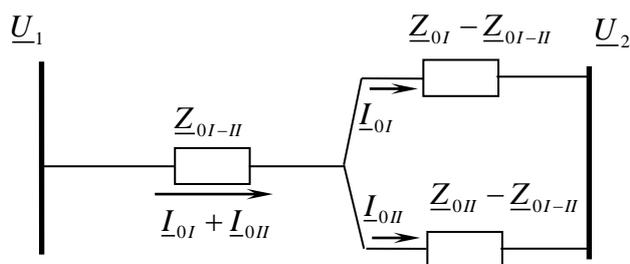


Рис. 3.26. Схема замещения двухцепной ЛЭП

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

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

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

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

Таблица 3.2

Средние значения соотношений между X_0 и X_1

| Характеристика воздушной линии | X_0 / X_1 |
|--------------------------------|-------------|
|--------------------------------|-------------|

| | |
|------------------------------------|-----|
| Одноцепная линия без тросов | 3,5 |
| То же со стальными тросами | 3,0 |
| То же с хорошо проводящими тросами | 2,0 |
| Двухцепная линия без тросов | 5,5 |
| То же со стальными тросами | 4,7 |
| То же с хорошо проводящими тросами | 3,0 |

Примечание. В ориентировочных расчетах для трехжильных кабелей можно принимать сопротивления токам нулевой последовательности

$$R_0 \approx 10R_1,$$

$$X_0 \approx (3,5 - 4,6) X_1.$$

3.3. Схемы отдельных последовательностей

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

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

3.3.1 Схемы прямой и обратной последовательностей

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

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

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

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

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

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

Рассмотрим пример составления схем прямой и обратной последовательностей при несимметричном коротком замыкании на линии W1 в схеме, представленной на рис. 3.27.

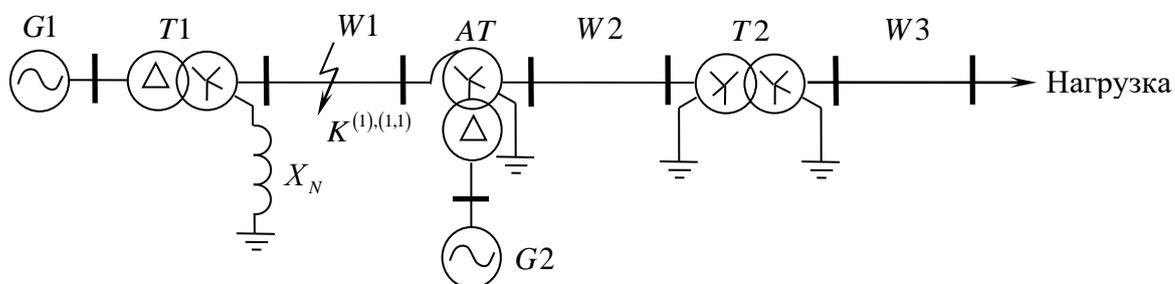


Рис. 3.27. Электрическая схема ЭЭС

Схема прямой последовательности представлена на рис. 3.28.

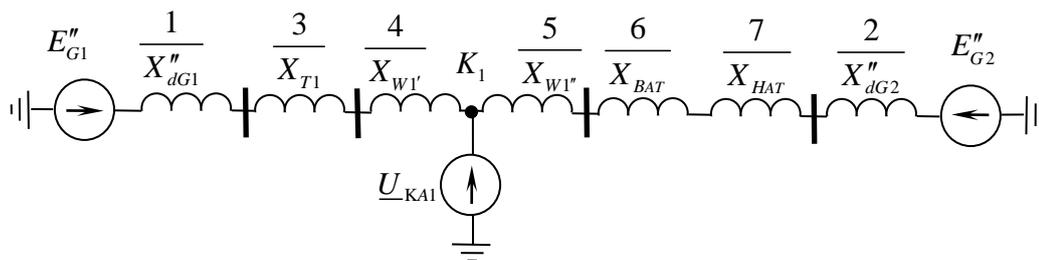


Рис. 3.28. Схема замещения прямой последовательности

Суммарное сопротивление прямой последовательности

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

ЭДС эквивалентного источника

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

По такому алгоритму рассчитывается только поперечная несимметрия. Схема обратной последовательности представлена на рис. 3.29.

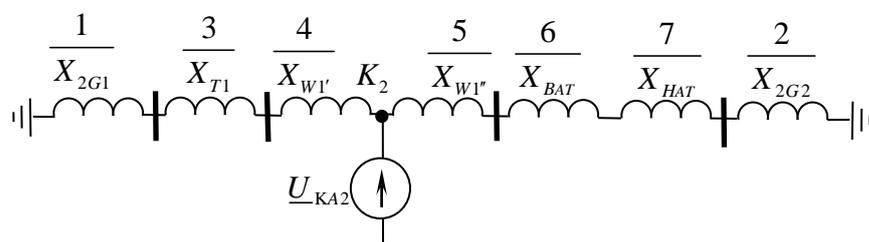


Рис. 3.29. Схема замещения обратной последовательности

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

3.3.2. Схема замещения нулевой последовательности

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

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

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

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

все элементы, по которым циркулируют токи нулевой последовательности с обеих сторон (авто)трансформатора.

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

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

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

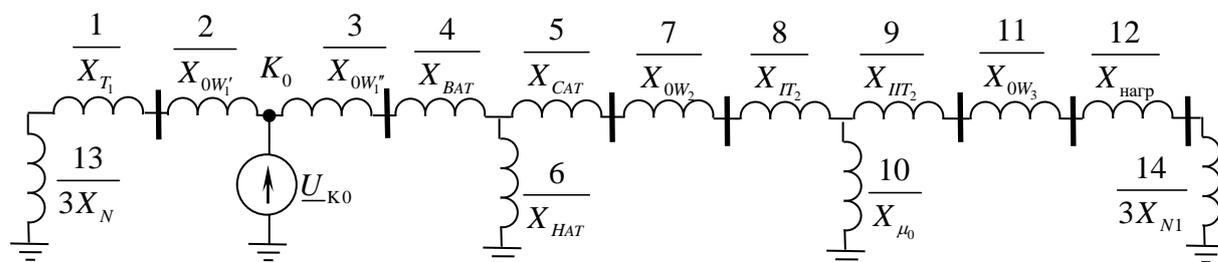


Рис. 3.30. Схема замещения нулевой последовательности

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

Суммарное сопротивление нулевой последовательности

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

3.4. Распределение и трансформация токов и напряжений

Фазные токи и напряжения при несимметричных режимах проще всего находить суммированием симметричных составляющих. Поскольку рассматриваемые схемы или устройства ЭЭС предполагаются выполненными симметрично, распределение токов и напряжений в каждой последовательности

находим в схеме одноименной последовательности, руководствуясь правилами и законами распределения токов и напряжений в линейных электрических цепях. При определении фазных величин токов и напряжений через их симметричные составляющие за трансформаторами или автотрансформаторами следует иметь в виду, что симметричные составляющие токов и напряжений при переходе через них изменяются не только по величине, в соответствии с коэффициентом трансформации, но и по фазе в зависимости от соединения обмоток.

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

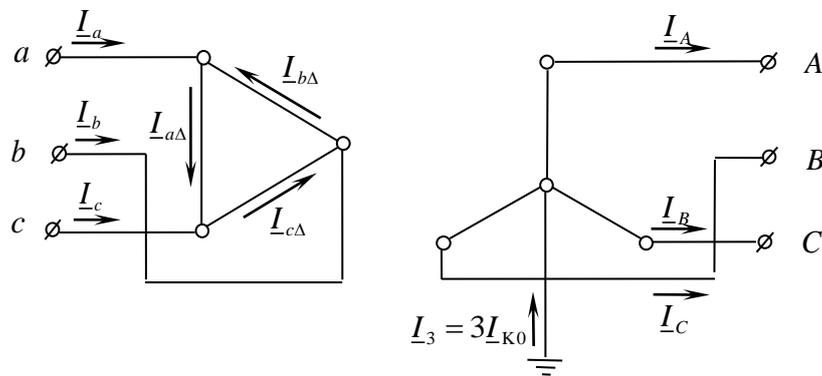


Рис. 3.31. Схема трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

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

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

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

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{a\Delta} - \underline{I}_{b\Delta} = (\underline{I}_A - \underline{I}_B) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_A - \underline{I}_B}{\sqrt{3}} k, \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{b\Delta} - \underline{I}_{c\Delta} = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_B - \underline{I}_C}{\sqrt{3}} k, \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{c\Delta} - \underline{I}_{a\Delta} = (\underline{I}_C - \underline{I}_A) \frac{w_Y}{w_\Delta} = \frac{\underline{I}_C - \underline{I}_A}{\sqrt{3}} k. \end{aligned}$$

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

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

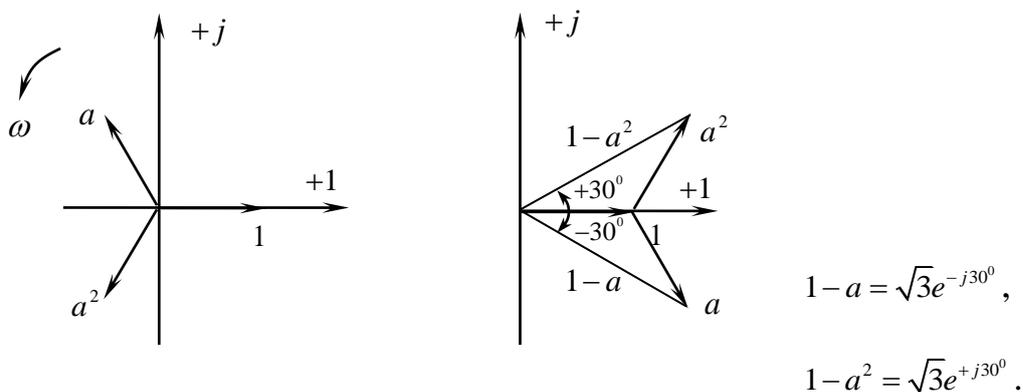


Рис. 3.32. К определению векторов при трансформации симметричных составляющих

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

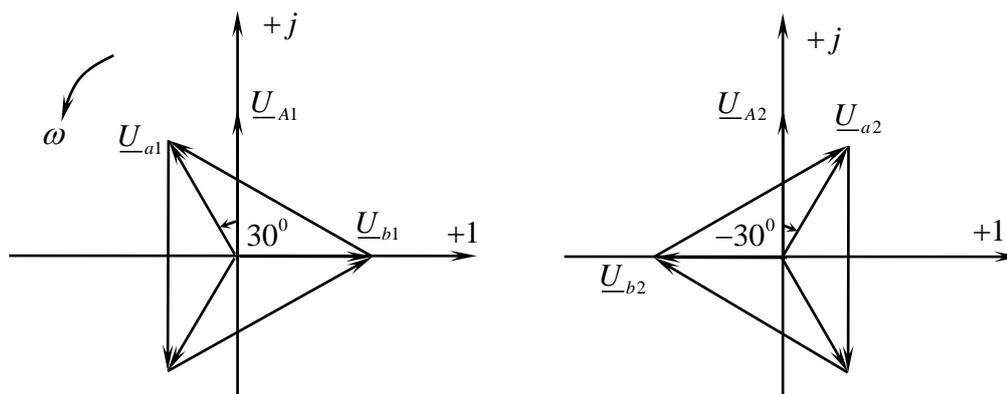




Рис. 3.33. Сдвиг напряжений прямой (*a*) и обратной (*б*) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 11$

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

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

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

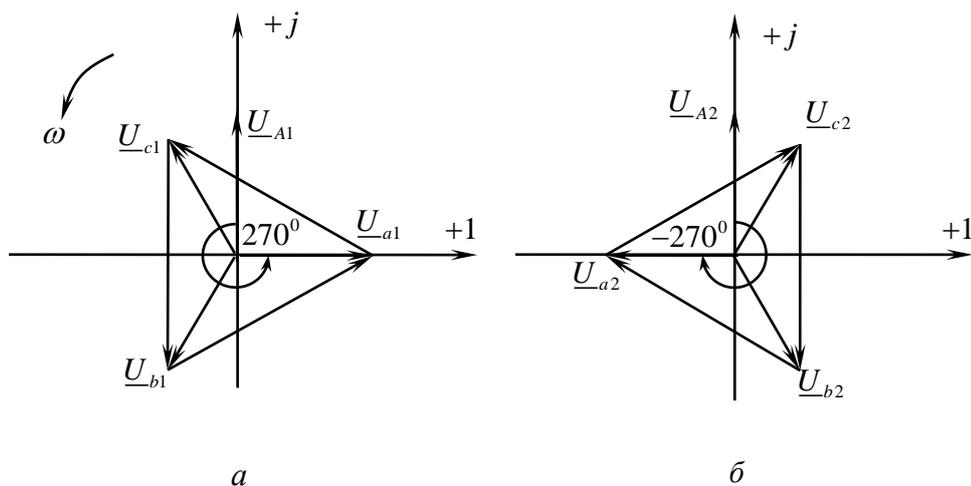


Рис. 3.34. Сдвиг напряжений прямой (*a*) и обратной (*б*) последовательностей при переходе через трансформатор с соединением обмоток $Y_0/\Delta - 3$

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

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

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

3.5. Однократная поперечная несимметрия

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

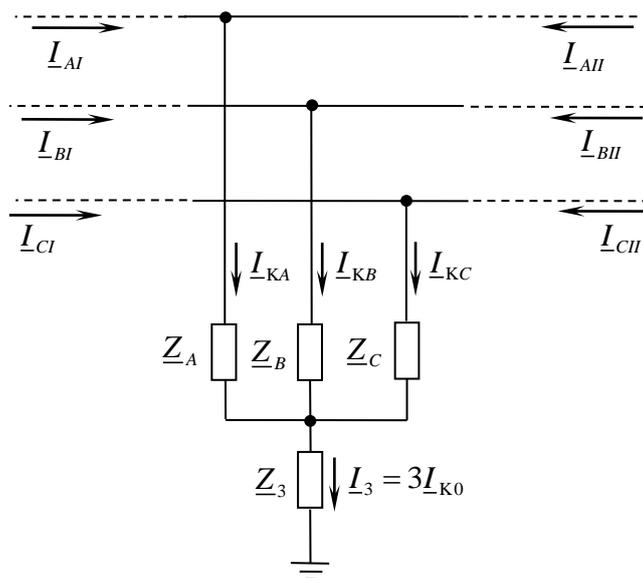


Рис. 3.35. Представление поперечной несимметрии в виде включения в фазы неодинаковых сопротивлений

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

Наиболее просто и наглядно граничные условия для любого несимметричного КЗ записываются, если предположить, что короткое замыкание про-

исходит не в действительном узле заданной схемы, а на некоторых условно сверхпроводящих ответвлениях, подключенных в месте повреждения.

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

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

3.5.1. Однофазное короткое замыкание

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

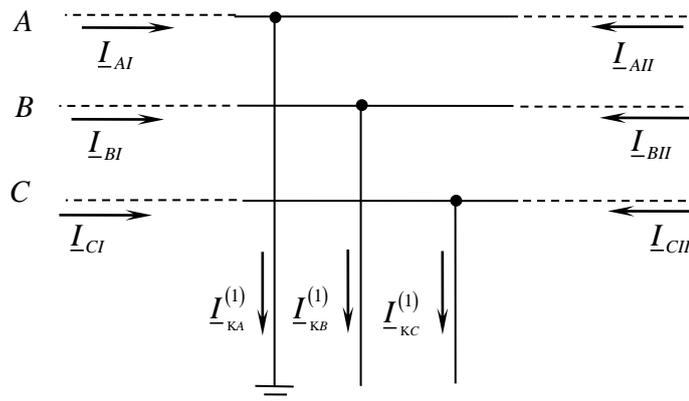


Рис. 3.36. Однофазное короткое замыкание

Оценивая эту схему, можем записать три уравнения граничных условий:

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

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

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

Для определения шести неизвестных – трех симметричных составляющих токов $\underline{I}_{КА1}$, $\underline{I}_{КА2}$, $\underline{I}_{К0}$ и трех симметричных составляющих напряжений $\underline{U}_{КА1}$, $\underline{U}_{КА2}$, $\underline{U}_{К0}$ – основных уравнений второго закона Кирхгофа, связывающих симметричные составляющие напряжений с симметричными составляющими

токов в схемах своих последовательностей, формулы (3.3)–(3.5), решаем систему из шести уравнений (3.8)–(3.13).

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

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

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

Для заземленной фазы в соответствии с (3.8) имеем

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

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

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

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

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

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

Подставляя \underline{I}_{K0} из (3.9, а) в (3.10, а), получим

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

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

$$\underline{I}_{KA1} = \underline{I}_{KA2},$$

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

Искомые соотношения составят

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

На основании выражений (3.8, а), (3.11)–(3.14) получим

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

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

откуда ток прямой последовательности

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

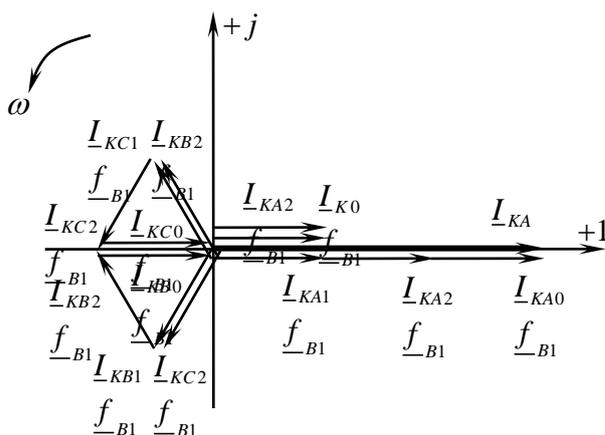


Рис. 3.38. Векторная диаграмма токов при однофазном КЗ

3.5.2. Двухфазное короткое замыкание на землю

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

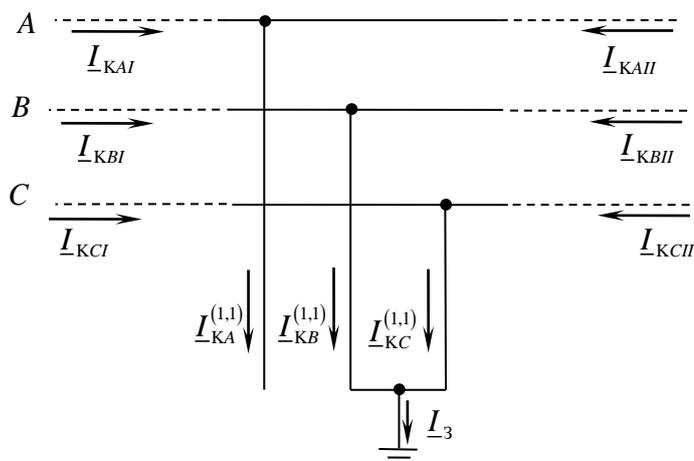


Рис. 3.40. Двухфазное короткое замыкание на землю

Такое повреждение характеризуется следующими граничными условиями:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Соотношения между симметричными составляющими напряжения фазы A в аварийном узле

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

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

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

$$\underline{I}_{KA2} X_{2\Sigma} = \underline{I}_{K0} X_{0\Sigma}. \quad (3.21)$$

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

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

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

откуда

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

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

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

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

откуда

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

Рис. 3.42. Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ на землю
Напряжение фазы *A* в аварийном узле

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

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания

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

Ток в земле

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

3.5.3. Двухфазное короткое замыкание

Принципиальная схема двухфазного КЗ (замыкание двух фаз В и С между собой) представлена на рис. 3.43.

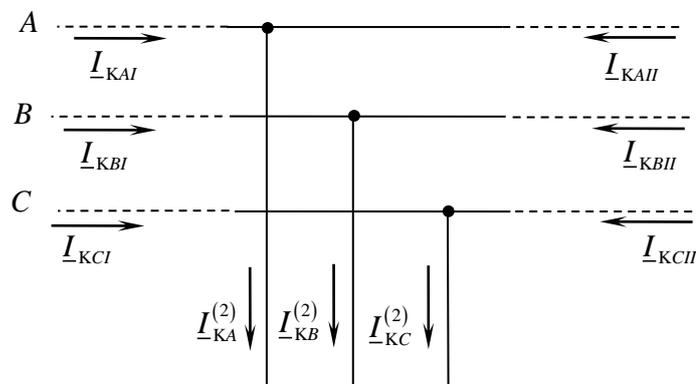


Рис. 3.43. Двухфазное короткое замыкание

Уравнения граничных условий при двухфазном коротком замыкании следующие:

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

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

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

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

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

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

Выразим напряжения $\underline{U}_{KB}^{(2)}$ и $\underline{U}_{KC}^{(2)}$ через симметричные составляющие напряжения фазы A и с учетом (3.28) получим соотношение (3.31).

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

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

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

Ток прямой последовательности при двухфазном коротком замыкании

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

Напряжения прямой и обратной последовательностей фазы *A* в месте замыкания

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

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

Токи поврежденных фаз в месте короткого замыкания

$$\begin{aligned} \underline{I}_{KB}^{(2)} &= a^2 \underline{I}_{KA1} + a \underline{I}_{KA2} = (a^2 - a) \underline{I}_{KA1} = -j \underline{I}_{KA1}^{(2)} \sqrt{3}, \\ \underline{I}_{KC}^{(2)} &= a \underline{I}_{KA1} + a^2 \underline{I}_{KA2} = (a - a^2) \underline{I}_{KA1} = j \underline{I}_{KA1}^{(2)} \sqrt{3}. \end{aligned}$$

Напряжение фазы *A* в аварийном узле

$$\underline{U}_{KA}^{(2)} = 2 \underline{U}_{KA1}^{(2)}.$$

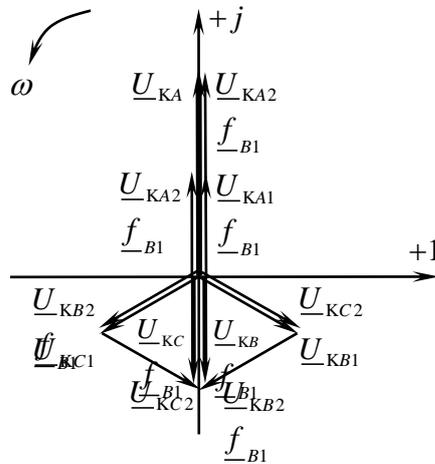
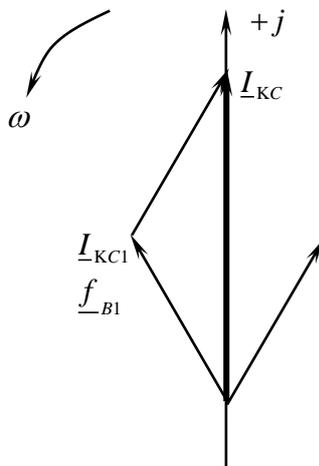


Рис. 3.44. Векторная диаграмма напряжений при двухфазном КЗ



$$\frac{\underline{I}_{KC2}}{\underline{f}_{B1}}$$

92

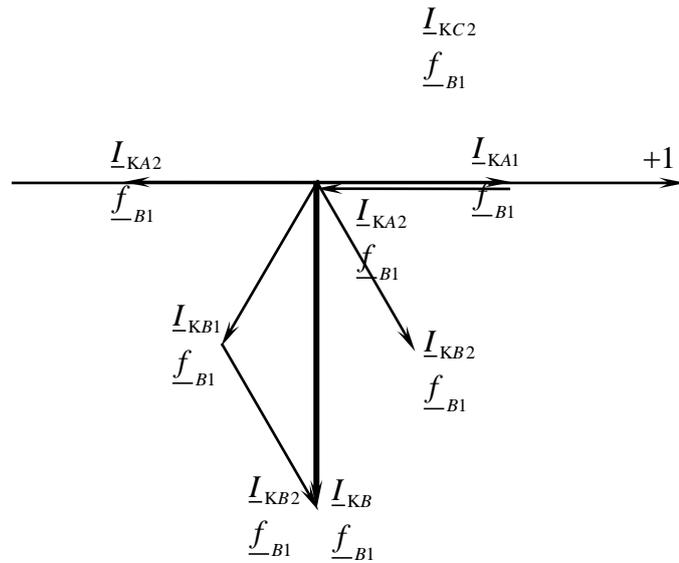


Рис. 3.45. Векторная диаграмма токов при двухфазном КЗ

3.5.4. Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии

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

Таблица 3.3

Основные результаты оценки различных видов КЗ

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

| | | | |
|--|--|------------------------------------|---|
| Напряжение прямой последовательности \underline{U}_{KA1} | $\underline{I}_{KA1} j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})$ | $\underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma}$ | $\underline{I}_{KA1} j \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$ |
| Напряжение обратной последовательности \underline{U}_{KA2} | $-\underline{I}_{KA1} jX_{2\Sigma}$ | \underline{U}_{KA1} | \underline{U}_{KA1} |
| Напряжение нулевой последовательности \underline{U}_{K0} | $-\underline{I}_{KA1} jX_{0\Sigma}$ | — | \underline{U}_{KA1} |

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

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

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

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

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

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

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

Таблица 3.4

Значения $X_{\Delta}^{(n)}$ и $m^{(n)}$ при различных КЗ

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

Обобщённая запись выражения (3.34) позволила Н.Н. Щедрину сформулировать положение, называемое правилом эквивалентности прямой последовательности: ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания определяется как ток некоторого эквивалентного трёхфазного КЗ в точке, удаленной от действительной точки КЗ на дополнительное сопротивление $X_{\Delta}^{(n)}$, или (с учётом активных сопротивлений) $Z_{\Delta}^{(n)}$, величина которого определяется результирующими сопротивлениями схем обратной и нулевой последовательностей и видом КЗ, а также в общем случае сопротивлением возникшей дуги R_d .

На рис. 3.45 иллюстрирован смысл эквивалентного трёхфазного короткого замыкания $K_3^{(3)}$, при котором находятся аварийные ток по формуле (3.34) и напряжение по выражению (3.36) прямой последовательности в месте заданного несимметричного КЗ.

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

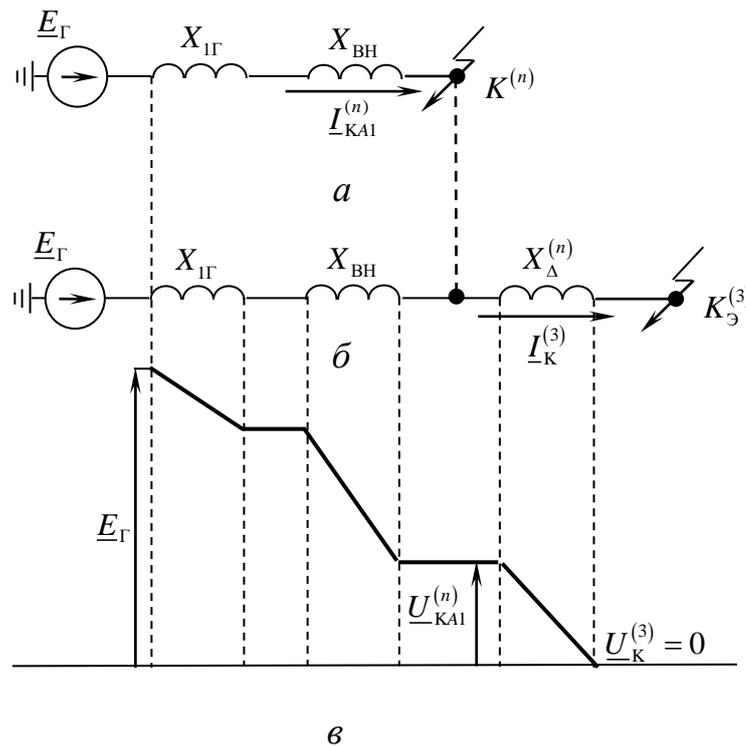


Рис. 3.45. Эпюра напряжения прямой последовательности (ϑ) при несимметричном коротком замыкании (a) и эквивалентном трёхфазном КЗ (b)

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

3.5.5. Комплексные схемы замещения

Установленные ранее соотношения между симметричными составляющими напряжения или тока особой фазы *A* в месте короткого замыкания позволяют для каждого вида несимметричного КЗ соединить вместе схемы отдельных последовательностей, представленных результирующими сопротивлениями $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$, и образовать тем самым комплексную схему замещения для соответствующего вида КЗ (рис. 3.46–3.48). В таких схемах соблюдаются не только соотношения между симметричными составляющими напряжения (между точками H_i и K_i , где $i=1,2,0$), но также и соотношения между симметричными составляющими тока в месте короткого замыкания.

Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы *A*

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

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

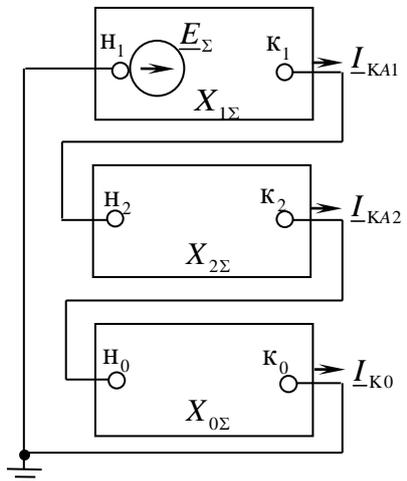


Рис. 3.46. Комплексная схема замещения при однофазном КЗ

Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы *A*

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

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

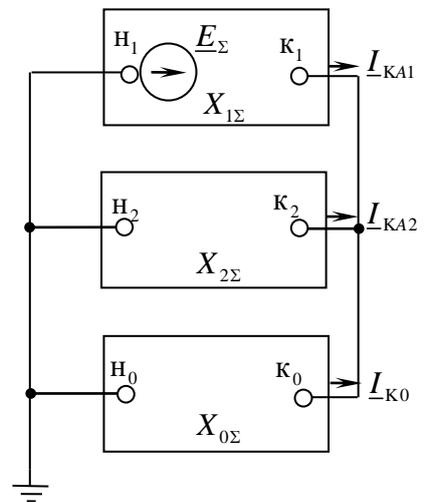
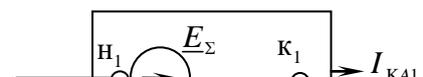


Рис. 3.47. Комплексная схема



Соотношения между симметричными составляющими напряжения и тока фазы A

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

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

Рис. 3.48. Комплексная схема замещения при двухфазном КЗ

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

3.5.6. Сравнение видов короткого замыкания

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

При разных видах КЗ существуют следующие неравенства:

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

соответственно

$$\underline{I}_{KA1}^{(1)} < \underline{I}_{KA1}^{(2)} < \underline{I}_{KA1}^{(1,1)} < \underline{I}_{KA}^{(3)}$$

и

$$\underline{U}_{KA1}^{(1)} > \underline{U}_{KA1}^{(2)} > \underline{U}_{KA1}^{(1,1)} > \underline{U}_{KA}^{(3)} = 0.$$

Далее выясним примерные пределы, в которых могут быть величины токов при несимметричных КЗ по сравнению с величинами токов трёхфазного короткого замыкания в той же точке схемы ЭЭС. Знание этих пределов представляет практический интерес, так как оно позволяет по известной для данной точки величине тока трёхфазного КЗ оценить в первом приближении

возможные наибольшие и наименьшие значения тока при несимметричных коротких замыканиях. Подчеркнём, что устанавливаемые ниже предельные соотношения справедливы только для токов в месте короткого замыкания.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

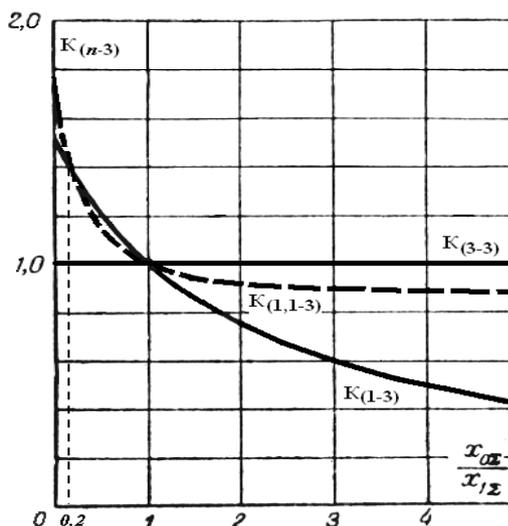


Рис. 3.49. Кривые изменения отношений $K_{(n-3)} = f(X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma})$

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

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

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

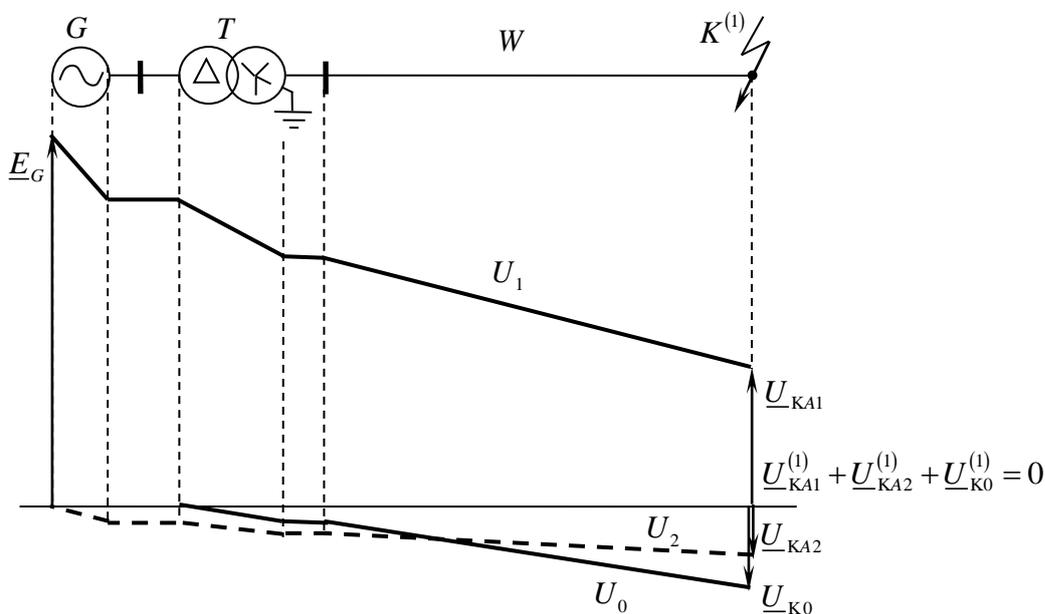


Рис. 3.50. Эпюра напряжений при однофазном КЗ

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

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

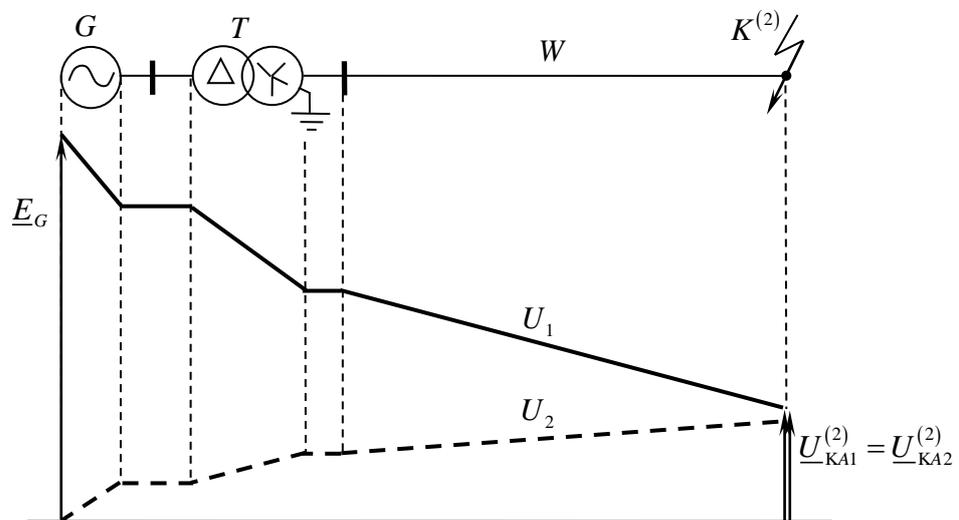


Рис. 3.51. Эпюра напряжений при двухфазном КЗ

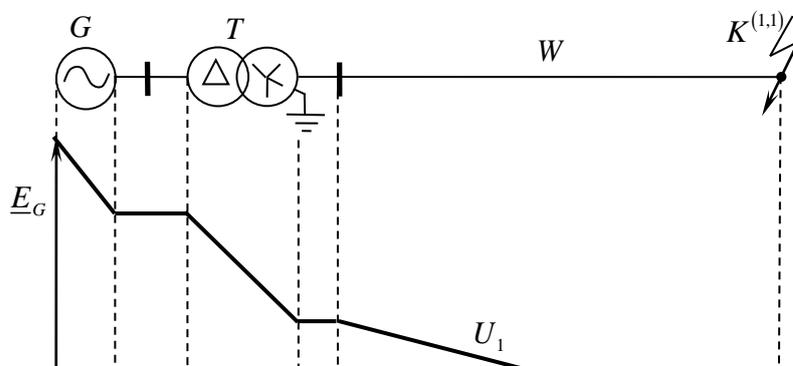


Рис. 3.52. Эпюра напряжений при двухфазном КЗ на землю

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

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

Для расчета любого несимметричного КЗ необходимо выполнение следующих этапов:

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

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

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

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

4) расчёт тока прямой последовательности:

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

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

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

- при однофазном КЗ

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

- при двухфазном КЗ на землю

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

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

- при двухфазном КЗ

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

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

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

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

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

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

3.7. Однократная продольная несимметрия

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

Решение задачи в общем виде позволяет получить расчетные выражения для симметричных составляющих токов и напряжений, но такое решение связано со сложными выкладками. При этом конечный результат представля-

ется громоздкими выражениями. Поэтому, как и при однократной поперечной несимметрии, значительно проще и нагляднее проводить решение для каждого вида продольной несимметрии, используя характеризующие его граничные условия.

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

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

$$\begin{cases} \Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{E}_{L\Sigma} - \underline{I}_{LA1} jX_{L1\Sigma}, & (3.39) \\ \Delta \underline{U}_{LA2} = 0 - \underline{I}_{LA2} jX_{L2\Sigma}, & (3.40) \\ \Delta \underline{U}_{L0} = 0 - \underline{I}_{L0} jX_{L0\Sigma}, & (3.41) \end{cases}$$

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

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

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

3.7.1. Разрыв одной фазы

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

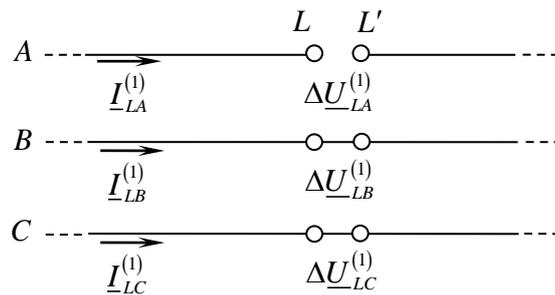


Рис. 3.53. Разрыв одной фазы

Разрыв одной фазы характеризуется граничными условиями:

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

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

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

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

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

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

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

Суммируя равенства (3.45), (3.43, а) и (3.44, а), получаем

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

из условия (3.42) получим

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

тогда

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

откуда

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

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

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

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

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

откуда получим ток прямой последовательности фазы A в месте разрыва

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

Величины симметричных составляющих падения напряжения фазы A

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

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

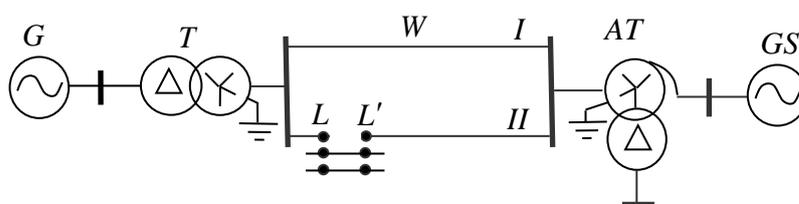


Рис. 3.54. Электрическая схема ЭЭС

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

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

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

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

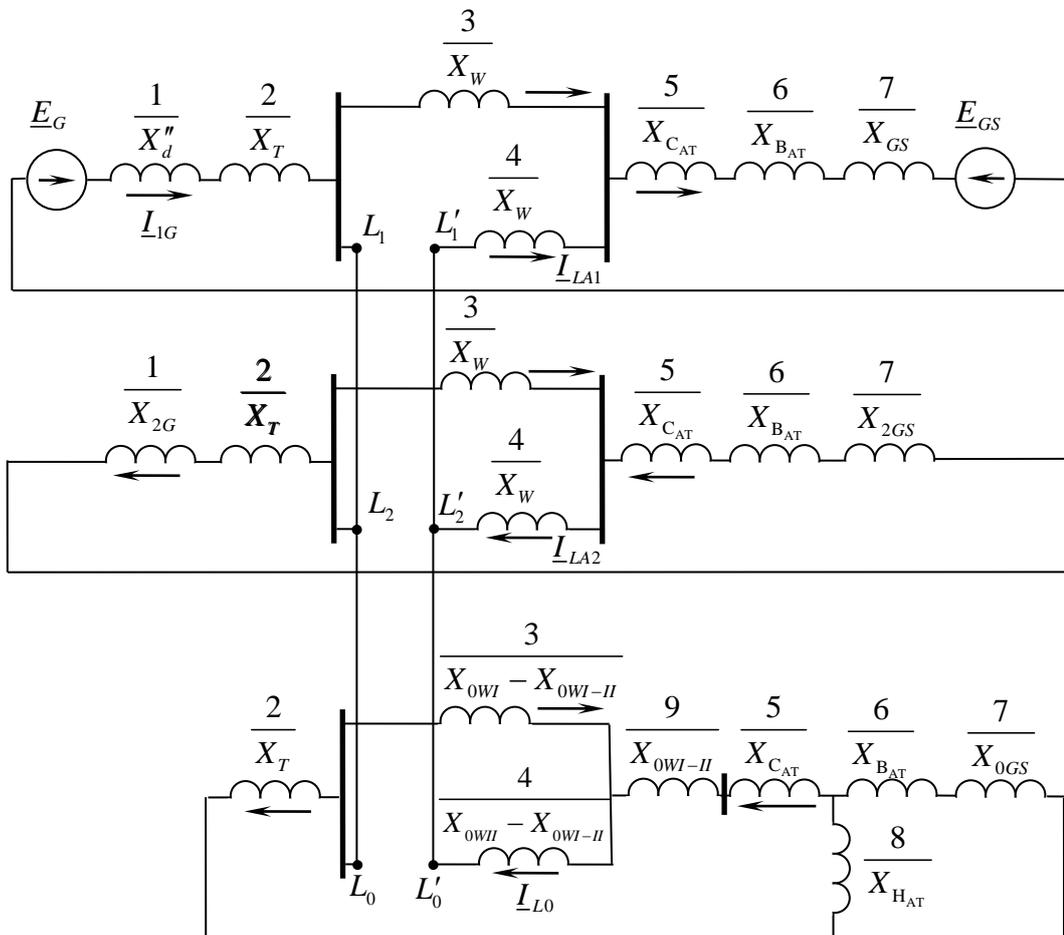


Рис. 3.55. Комплексная схема замещения ЭЭС при разрыве одной фазы

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

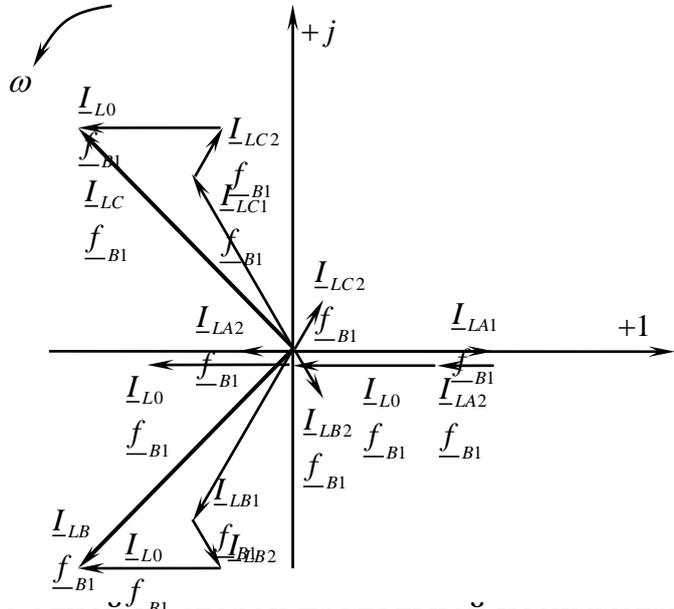


Рис. 3.56. Векторная диаграмма токов при разрыве одной фазы

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

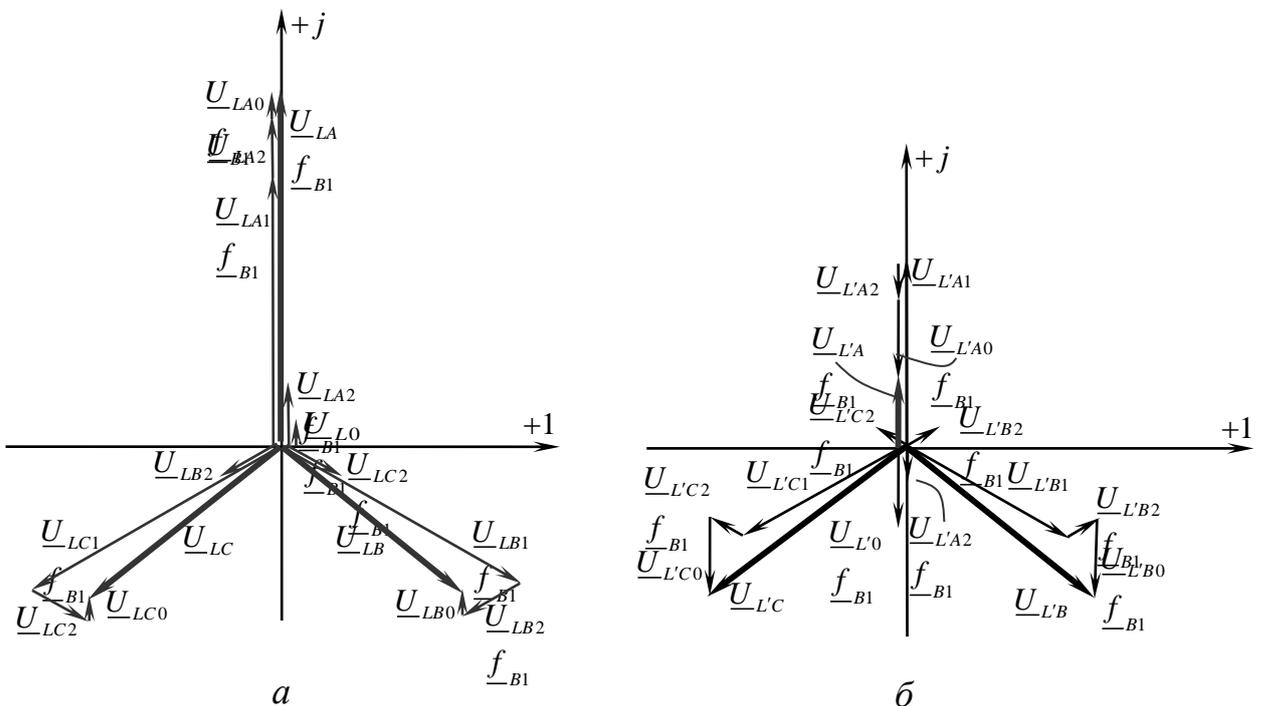


Рис. 3.57. Векторные диаграммы напряжений по концам разрыва одной фазы:
a – в узле *L*, *б* – в узле *L'*

Примечание. В векторных диаграммах на рис. 3.57 следует обратить внимание на соблюдение равенств

$$U_{LC} = U_{L'C},$$

$$U_{LB} = U_{L'B}.$$

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

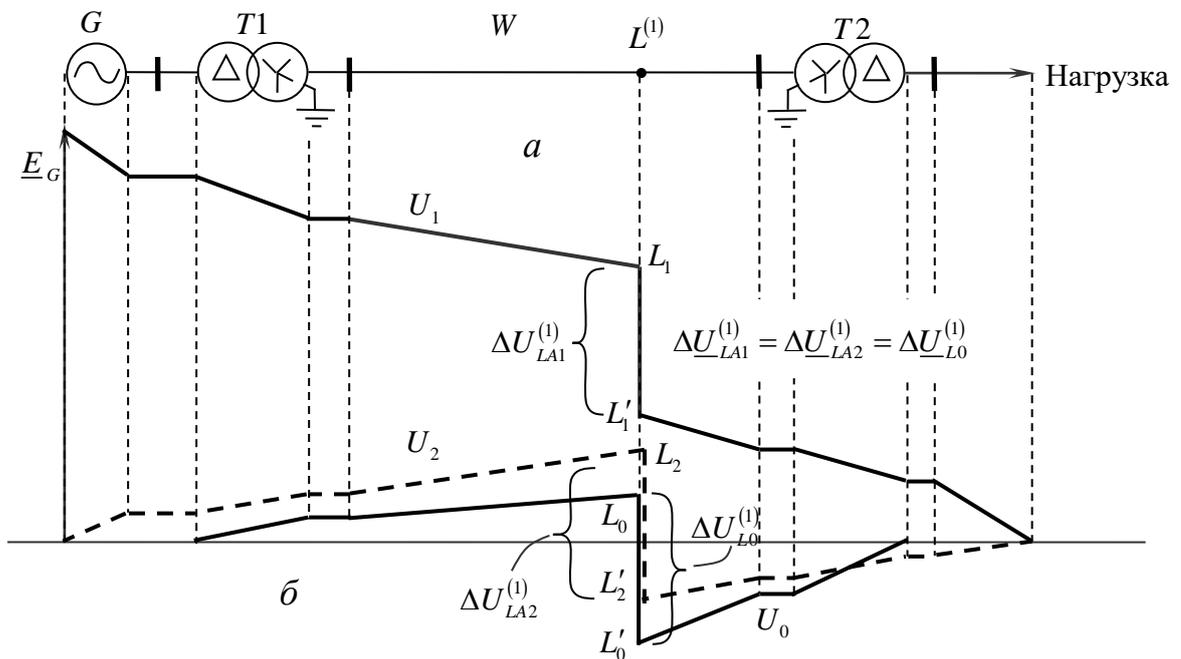


Рис. 3.58. Электрическая схема системы (*a*)
 и эпюры напряжений (*б*) при разрыве одной фазы

По мере удаления от места продольной несимметрии степень искажения векторной диаграммы напряжений снижается, так как возрастает относи-

тельное участие составляющей напряжения прямой последовательности, как это видно из эшюр.

3.7.2. Разрыв двух фаз

Принципиальная схема этого повреждения представлена на рис. 3.59.

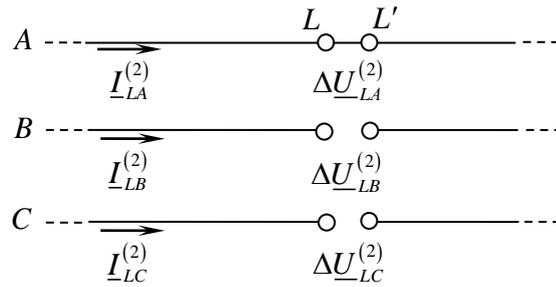


Рис. 3.59. Разрыв двух фаз

При разрыве двух фаз граничные условия будут

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

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

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

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

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

Поскольку согласно условию (3.50)

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

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

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

С учётом (3.53)

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

откуда получим ток прямой последовательности фазы *A* в месте разрыва

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

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

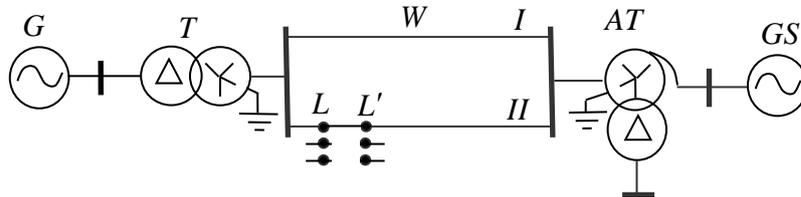


Рис. 3.60. Электрическая схема ЭЭС

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

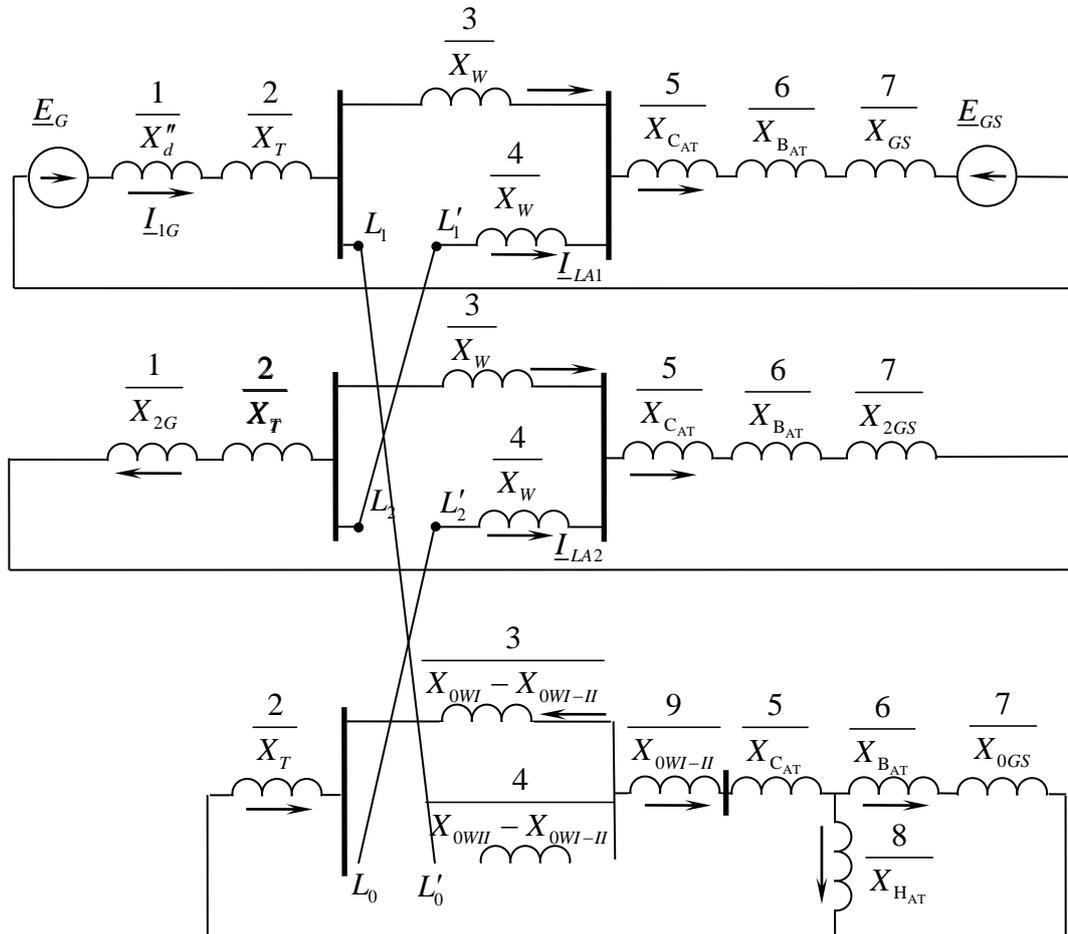




Рис. 3.61. Комплексная схема замещения ЭЭС при разрыве двух фаз

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

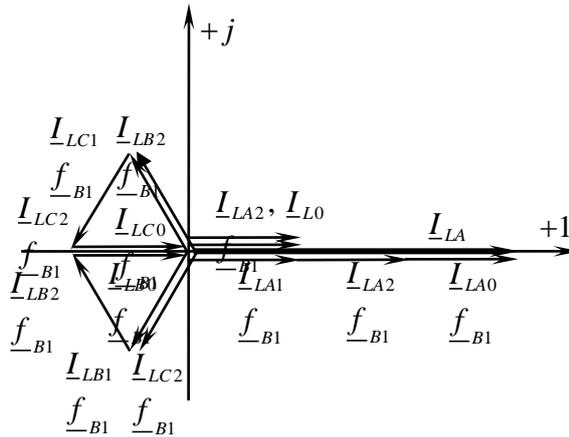


Рис. 3.62. Векторная диаграмма токов при разрыве двух фаз

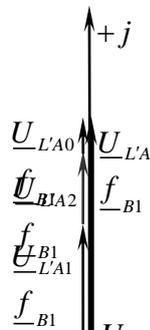
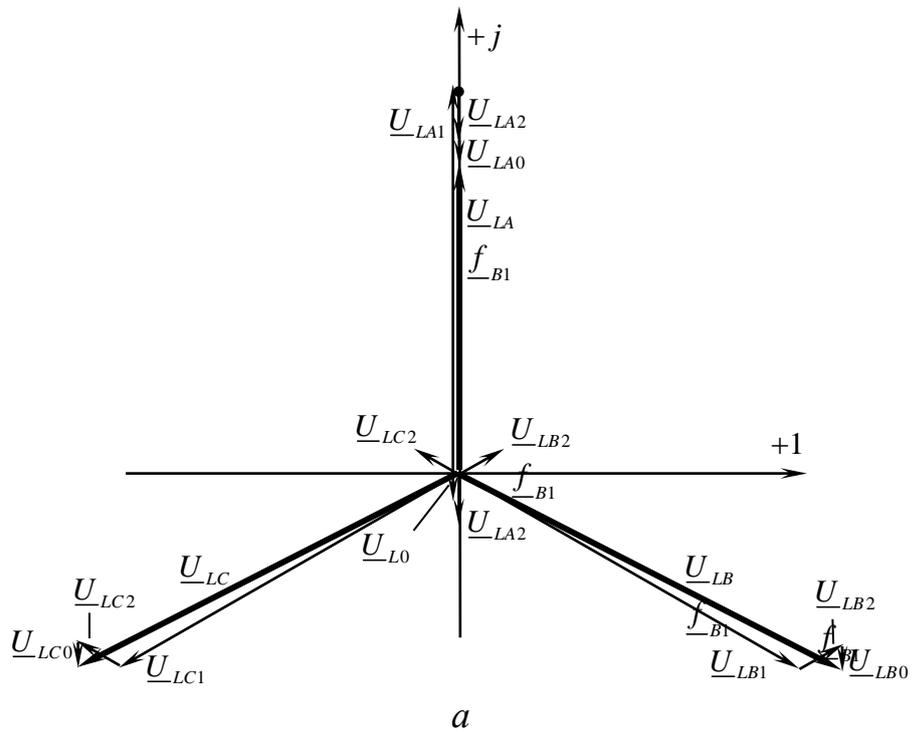


Рис. 3.63. Векторные диаграммы напряжений при разрыве двух фаз:
a – в узле *L*, *б* – в узле *L'*

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

На рис. 3.64 представлены исходная схема системы и эпюры напряжений при разрыве двух фаз линии.

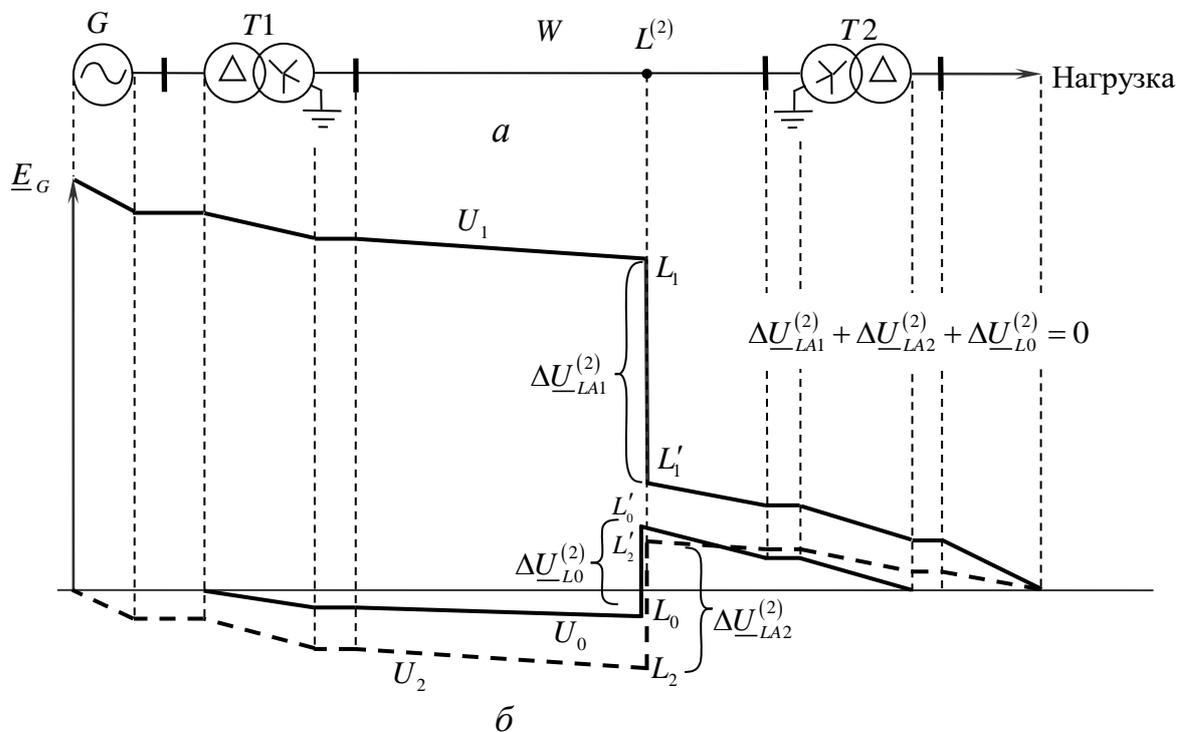


Рис. 3.64. Электрическая схема системы (*a*)
и эпюры напряжений (*б*) при разрыве двух фаз

Анализ эпюр напряжений аналогичен анализу эпюр на рис. 3.58.

3.7.3. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии

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

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

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

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

а падение напряжения прямой последовательности на несимметричном участке

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

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

$X_{\Delta L}^{(2)} = X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}$ – дополнительные сопротивления в схеме прямой последовательности.

4. ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ И СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

4.1. Простое замыкание на землю

Распределительные сети напряжением 6–35 кВ работают с изолированными или резонансно-заземленными нейтралью. Поэтому при замыкании на землю одной фазы ($Z^{(1)}$) такой сети не образуются обычные условия однофазного короткого замыкания ($K^{(1)}$) в сетях напряжением 110 кВ и выше с эффективно-заземленными нейтралью. Аварийный ток при этом обусловлен емкостной проводимостью сети и по величине меньше тока однофазного короткого замыкания (табл. 4.1). Поэтому сети напряжением 6–35 кВ принято называть сетями с малыми токами замыкания на землю, хотя при протяженных, особенно кабельной сети, если не приняты специальные меры компенсации, величины этих токов могут достигать опасных значений.

Таблица 4.1

Средние значения емкостного тока металлического
замыкания одной фазы линии при частоте 50 Гц

| Характеристика линии | Емкостной ток, А/км, при номинальном напряжении сети, кВ | |
|---|--|--------|
| | 6 | 10 |
| Однокабельная линия с площадью сечения, мм ² : | | |
| 50 | 0,68 | 0,80 |
| 120 | 1,00 | 1,16 |
| 240 | 1,45 | 1,70 |
| Одноцепная воздушная линия (ВЛ): | | |
| без троса | 0,013 | 0,0256 |
| с тросом | - | 0,0320 |
| Двухцепная ВЛ без троса | 0,017 | 0,0350 |

При замыкании на землю одной из фаз (в качестве расчетной принимают фазу А) в сети с изолированной нейтралью, то есть при простом замыкании на землю, путь для тока, текущего в землю, проходит через емкостное сопротивление каждой фазы относительно земли (рис. 4.1). Распределенные вдоль

сети (линий) емкости каждой фазы относительно земли условно представлены сосредоточенными емкостями.

Так как емкостные сопротивления элементов электрической сети значительно превышают их индуктивные и активные сопротивления, последними можно пренебречь и, следовательно, считать величину тока замыкания на землю практически независимой от места замыкания в рассматриваемой электрически связанной сети, а напряжение источника питания неизменным по величине.

Неизменность линейных напряжений, в частности, обуславливает практически постоянное значение тока в емкостной проводимости между фазами как при нормальных условиях, так и при простом замыкании на землю, поэтому из-за малого влияния междуфазные емкости не учитывают.

На рис. 4.1. стрелками показан путь циркуляции тока замыкания на землю. Поступая в землю в месте замыкания, ток возвращается по неповрежденным фазам через их емкостные проводимости относительно земли. Емкостная проводимость поврежденной фазы оказывается зашунтированной рассматриваемым замыканием, и ток в этой фазе справа от места замыкания отсутствует, если пренебречь весьма малым током, который наводится токами двух других фаз на данном участке.

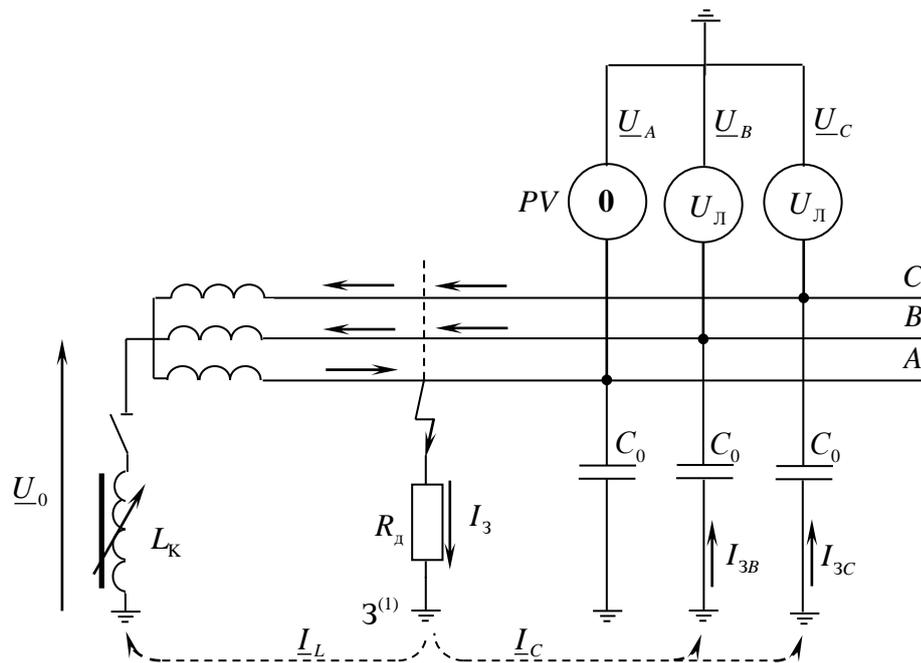


Рис. 4.1. Схема замещения сети, работающей с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов

В основу расчета простого замыкания на землю положен метод симметричных составляющих.

В соответствии с вышеприведенными допущениями основные уравнения

второго закона Кирхгофа отдельно для каждой последовательности в месте металлического замыкания на землю имеют вид

$$\begin{cases} \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{\text{ф,ср}}, \\ \underline{U}_{A2} = 0, \\ \underline{U}_0 = 0 - \underline{Z}_0 \underline{I}_0. \end{cases}$$

Схема замещения при простом замыкании на землю представлена на рис. 4.2.

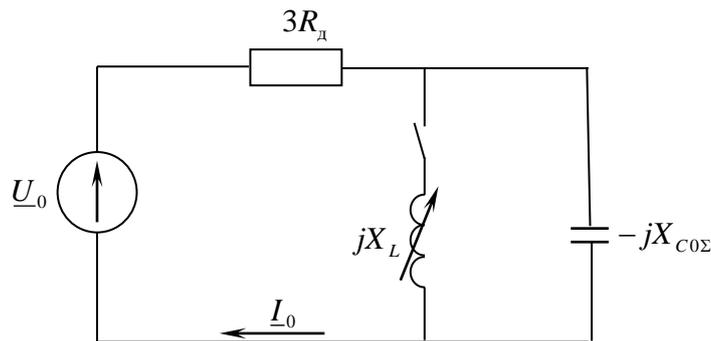


Рис. 4.2. Схема замещения нулевой последовательности

Из граничного условия $\underline{U}_{3A}^{(1)} = 0$ получим

$$\underline{U}_{A1} + \underline{U}_0 = 0$$

или

$$\underline{U}_0 = -\underline{U}_{A1} = -\underline{U}_{\text{ф,ср}}.$$

Величина тока металлического замыкания на землю составит

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \underline{I}_0 = -3 \cdot \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} = 3 \cdot \frac{\underline{U}_{\text{ф,ср}}}{-jx_{C0\Sigma}} = \sqrt{3} \cdot j\omega C_{0\Sigma} \cdot \underline{U}_{\text{ср,ном}},$$

где $\underline{U}_{\text{ф,ср}}$ или $\underline{U}_{\text{ср,ном}}$ – среднее значение фазного или линейного напряжения ступени трансформации, на которой произошло замыкание на землю;

$x_{C0\Sigma}$ – результирующее емкостное сопротивление нулевой последовательности элементов сети (практически только воздушных линий и кабелей), электрически связанных с местом замыкания.

Ток в месте замыкания на землю через дугу с сопротивлением R_d будет

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \frac{U_{\text{ф,ср}}}{3R_{\text{д}} - jx_{\text{C0}\Sigma}}$$

Емкостное сопротивление нулевой последовательности воздушной линии электропередачи без грозозащитных тросов на 1 км длины можно найти по выражению, Ом·км

$$x_{\text{C0}} = 3,96 \cdot 10^5 \cdot \lg \frac{S_{\text{ср}}}{\sqrt[3]{r_{\text{п}} \cdot D_{\text{ср}}^2}}, \quad (4.1)$$

где $S_{\text{ср}} \approx 2(h_A + h_B + h_C)/3$ – среднее расстояние от проводов фаз A , B и C до их зеркальных отражений относительно поверхности земли (h_A , h_B , h_C – высоты подвеса проводов фаз с учетом провеса); $r_{\text{п}}$ – радиус провода; $D_{\text{ср}}$ – средне-геометрическое расстояние между проводами фаз A , B и C .

Емкостное сопротивление нулевой последовательности трехжильных кабелей с круглыми жилами на 1 км длины можно найти по приближенной формуле, Ом·км

$$x_{\text{C0}} = \frac{96,5}{1,85 + \frac{2r}{B+b}} \cdot 10^3,$$

где r – радиус жилы; B и b – толщина соответственно фазной и поясной изоляции (величины r , B , b должны быть в одних единицах измерения).

Для кабеля с секторными жилами, имеющими ту же поверхность проводника и ту же толщину изоляции, как у кабеля с круглыми жилами, емкостные сопротивления x_{C0} несколько меньше. Это снижение можно учесть коэффициентом n , величина которого при значениях $(B+b)/(2r)$ 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 соответственно составляют 0,70; 0,82; 0,87; 0,90; 0,94; 0,96.

Для грубой оценки порядка величины тока замыкания на землю при отсутствии данных о кабелях сети и конструкции воздушных линий, по известной суммарной длине электрически связанных с местом замыкания кабельных l_k , км, и воздушных l_B , км, линий можно воспользоваться выражением

$$I_3 = U_{\text{ср,ном}} \cdot \left(\frac{l_k}{10} + \frac{l_B}{350} \right).$$

На рис. 4.3 представлены векторные диаграммы напряжений и токов в месте металлического простого замыкания на землю фазы A .

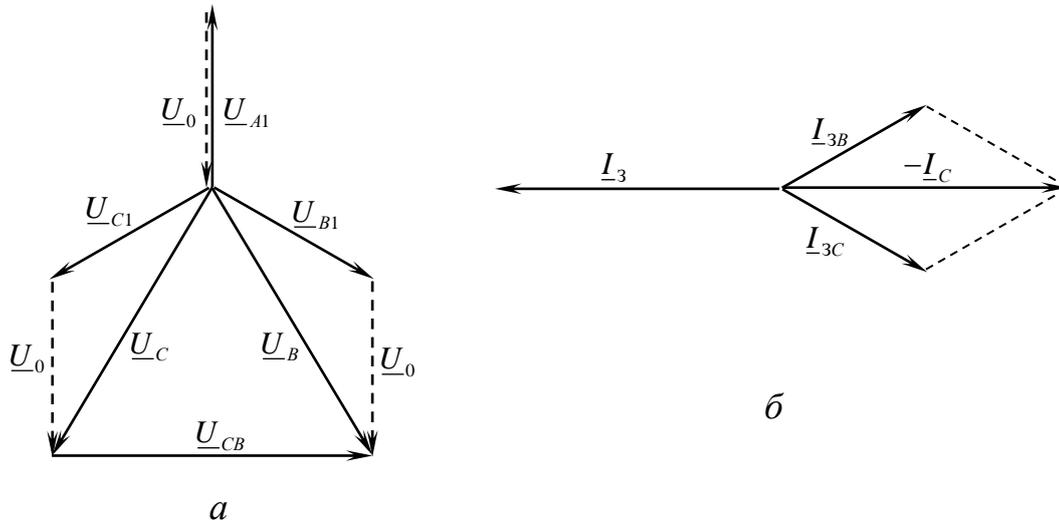


Рис. 4.3. Векторные диаграммы напряжений (а) и токов (б) в месте металлического простого замыкания на землю фазы А

Здесь напряжение поврежденной фазы относительно земли становится равным нулю, а значения напряжений неповрежденных фаз относительно земли увеличиваются до значений междуфазного напряжения, то есть в $\sqrt{3}$ раз (см. рис. 4.1). Треугольник линейных напряжений остается без изменения и лишь перемещается параллельно самому себе в соответствии с перемещением его центра тяжести, положение которого определяется напряжением нулевой последовательности. Ток замыкания на землю \underline{I}_3 носит емкостный характер.

Опыт эксплуатации показывает, что при замыканиях на землю через дугу и малых значениях \underline{I}_3 дуга гаснет практически без повторных зажиганий и сопровождающих их всплесков перенапряжений. С увеличением тока \underline{I}_3 наблюдаются неоднократные повторные зажигания дуги и перенапряжения, что уменьшает вероятность погасания дуги и увеличивает вероятность перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное КЗ. Поэтому в сетях с изолированной нейтралью при определенных значениях \underline{I}_3 должна выполняться компенсация емкостных токов замыкания на землю. Значения емкостных токов в нормальных режимах сети, при которых необходимо производить компенсацию, составляют: в сетях напряжением 3–20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ – более 10 А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях: при напряжении 3–6 кВ – более 30 А; при напряжении 10 кВ – более 20 А; при напряжении 15–20 кВ – более 15 А; в схемах напряжением 6–20 кВ блоков генератор-трансформатор (на генераторном напряжении) – более 5 А.

Компенсацию осуществляют включением в нейтраль (трансформатора) трехфазной системы дугогасящей катушки (реактора – ДГР), которая выпол-

няется с регулированием индуктивности для настройки при изменениях защищаемой сети (рис. 4.1. и 4.2). Катушка настраивается близко к резонансу токов на суммарную емкость сети по отношению к земле, что приводит к случаю $x_{0\Sigma} = \infty$, то есть к полной компенсации тока простого замыкания на землю, $\underline{I}_L = -\underline{I}_3$ или

$$\frac{U_{\phi, \text{cp}}}{j\omega L_K} = -3 \cdot U_{\phi, \text{cp}} \cdot j\omega C_{0\Sigma}.$$

Откуда индуктивность L_K катушки составит

$$L_K = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 C_{0\Sigma}},$$

где $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ – угловая частота вращения.

Из-за наличия потерь активной мощности в реакторах расстройка от точной компенсации составляет порядка одного процента.

Свыше 80 % эксплуатируемых ДГР составляют реакторы типа ЗРОМ и РЗДСОМ, имеющих ступенчатое регулирование индуктивности с ПБВ.

Пример. Определить ток при однофазном металлическом замыкании на землю в сети напряжением 35 кВ, имеющей воздушные линии общей протяженностью 185 км.

Линия: марка провода АС 70/11 радиусом $r_n = 5,7 \cdot 10^{-3}$ м; расположение проводов по вершинам треугольника с расстояниями $d_{AB} = d_{BC} = 3,8$ м; $d_{AC} = 3,0$ м. Высоты подвеса проводов $h_A = h_C = 10,7$ м; $h_B = 14,1$ м.

При заданных параметрах линии определим: среднее геометрическое расстояние между проводами фаз A , B и C

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{AC} \cdot d_{BC}} = \sqrt[3]{3,8 \cdot 3,0 \cdot 3,8} = 3,51 \text{ м};$$

среднее расстояние от проводов фаз A, B и C до их зеркальных отражений относительно поверхности земли

$$S_{\text{cp}} = 2 \cdot (10,7 + 14,1 + 10,7) / 3 = 23,7 \text{ м};$$

по формуле (4.1) емкостное сопротивление 1 км линии составит

$$x_{C0} = 3,96 \cdot 10^5 \cdot \lg \frac{23,7}{\sqrt[3]{5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,51^2}} = 6,95 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{км}$$

и соответственно всей сети

$$x_{C0\Sigma} = x_{C0} / l = 6,97 \cdot 10^5 / 185 = 3765,8 \text{ Ом}$$

Искомый ток замыкания на землю определится величиной

$$\underline{I}_3 = 3 \cdot \frac{37000}{\sqrt{3} \cdot (-j3765,8)} = j17 \text{ А}$$

Для полной компенсации тока замыкания на землю в данном случае необходимо нейтраль обмотки напряжением 37 кВ питающего трансформатора заземлить через катушку с индуктивным сопротивлением

$$x_L = x_{C0\Sigma} / 3 = 3765,8 / 3 = 1255 \text{ Ом}$$

Выбираем заземляющий дугогасящий реактор типа РЗДСОМ-620/35У1 мощностью 620 кВ·А и предельными токами 12,5–25 А.

4.2. Расчёт токов коротких замыканий в установках напряжением ниже 1000 В

Электрические установки напряжением ниже 1000 В характеризуются большой электрической удаленностью от источников электроэнергии. Эти установки подключаются к распределительной сети ЭЭС через понижающие трансформаторы T , рис. 4.4.

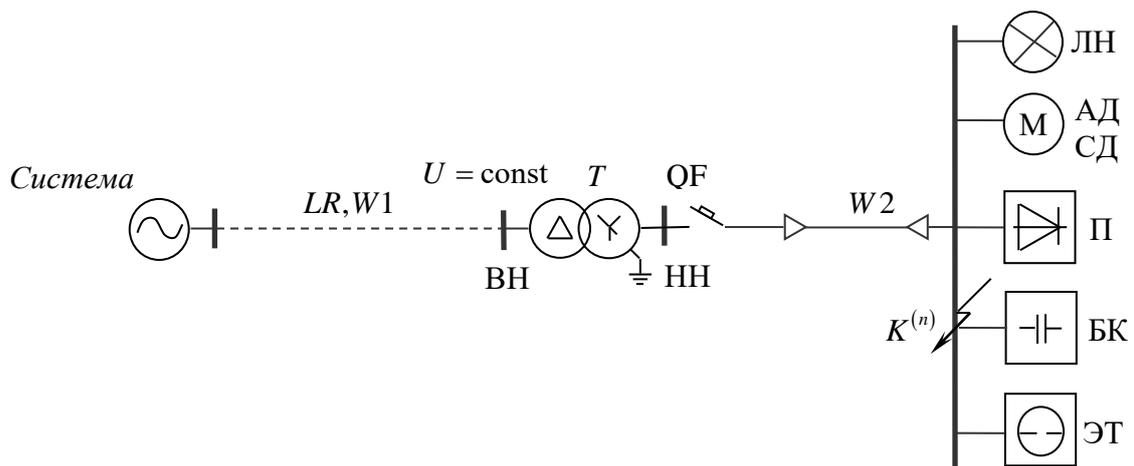


Рис. 4.4. Схема электроснабжения установок напряжением ниже 1000 В: АД, СД – асинхронные и синхронные электродвигатели; ЛН – освещение; П – преобразовательные установки; ЭТ – электротермические установки; БК – батареи конденсаторов; LR – токоограничивающий реактор; $W1$ – воздушная или кабельная линия; $W2$ – кабельная линия; ВН, НН – ступени высшего и низшего напряжения соответственно.

Токи КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ рекомендуется рассчитывать в именованных единицах; при этом используются средние номинальные напряжения (соответствующих номинальных напряжений: 660, 500, 380, 220, 127 В): 690, 525, 400, 230, 127 В. При составлении эквивалентных схем замещения параметры расчётной схемы следует приводить к ступени напряжения сети, на которой находится аварийный узел, активные и индуктивные сопротивления схемы замещения выражать в миллиомах.

При расчётах токов КЗ в электроустановках, питаемых непосредственно от сети ЭЭС, допускается считать, что понижающие трансформаторы подключены к источнику неизменного по амплитуде напряжения через эквивалентное индуктивное сопротивление X_C . Значение этого сопротивления, мОм, приведённое к ступени напряжения аварийного узла $U_{\text{ср.НН}}$, В, следует рассчитывать по формуле

$$X_C = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{п0,В}}U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_K}, \quad (4.2)$$

где $U_{\text{ср.ВН}}$ – среднее номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора, В; $I_{\text{п0,В}}$ – действующее значение периодической составляющей тока при трёхфазном КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, кА; S_K – мощность КЗ у выводов обмотки ВН трансформатора, кВ·А.

При отсутствии данных о токе $I_{\text{п0,В}}$ допускается в выражении (4.2) использовать номинальный ток отключения выключателя, установленного на стороне высшего напряжения понижающего трансформатора, $I_{\text{откл.ном}}$.

Достоверность расчёта токов КЗ в низковольтных установках зависит от того, насколько правильно оценены и учтены все сопротивления короткозамкнутой цепи.

При электроснабжении электроустановки от ЭЭС через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ ($I_{\text{п0}}$), кА, без учёта подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле

$$I_{\text{п0}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}},$$

где R_{Σ} и X_{Σ} – суммарные активное и индуктивное сопротивления цепи КЗ, мОм.

Сопротивления R_{Σ} и X_{Σ} равны

$$R_{\Sigma} = R_T + R_{TA} + R_{QF} + R_{ш} + R_k + R_{W2} + R_d \quad (4.3)$$

и

$$X_{\Sigma} = X_C + X_T + X_{TA} + X_{QF} + X_{ш} + X_{W2}, \quad (4.4)$$

где X_C – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведённое к ступени напряжения аварийного узла; R_T и X_T – активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора, мОм, приведённые к ступени напряжения аварийного узла; R_{TA} и X_{TA} – активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформатора тока, мОм; R_{QF} и X_{QF} – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек и переходных сопротивлений подвижных контактов автоматических выключателей, мОм; $R_{ш}$ и $X_{ш}$ – активное и индуктивное сопротивления шинпроводов, мОм; R_k – суммарное активное сопротивление контактных соединений; при приближённом учёте сопротивлений контактов следует принимать $R_k = 0,1$ мОм – для контактных соединений кабелей, $R_k = 0,01$ мОм – для шинпроводов; $R_k = 1,0$ мОм – для коммутационных аппаратов; R_{W2} и X_{W2} – активное и индуктивное сопротивления проводов кабельной линии $W2$, мОм; R_d – активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, рассчитываемое в зависимости от условий КЗ (составляет 3–15 мОм).

Сопротивления понижающего трансформатора мощностью менее 1 МВ·А рассчитывают по формулам

$$R_T = \frac{p_k \cdot U_{HH}^2}{S_{ном}^2},$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2},$$

где сопротивление трансформатора

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{HH}^2}{S_{ном}};$$

здесь $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВ·А; p_k – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт; U_{HH} – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, В; u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

В случаях, когда понижающий трансформатор подключён к сети ЭЭС через реактор LR , воздушную или кабельную линию (длиной более 1 км) $W1$ (см. рис. 4.4), необходимо учитывать активные R_{LR} , R_{W1} и индуктивные X_{LR} , X_{W1} сопротивления этих элементов, приведенные к ступени напряжения аварийного узла, в выражениях (4.3) и (4.4).

Если в аварийном узле имеются синхронные и асинхронные электродвигатели или комплексная нагрузка, то начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ с учётом подпитки от электродвигателей или комплексной нагрузки определяют как сумму токов от системы и электродвигателей или комплексной нагрузки.

Ударный ток трехфазного КЗ определяется по выражению

$$i_y = K_y \cdot \sqrt{2} I_{n0},$$

где

$$K_y = 1 + e^{-\frac{t_y}{T_a}};$$

$$t_y = 0,01 \cdot \frac{\pi/2 + \varphi_K}{\pi};$$

$$\varphi_K = \text{arctg } X_{\Sigma}/R_{\Sigma};$$

здесь t_y – время от момента начала КЗ до появления ударного тока, с; остальные параметры известны.

В приближенных расчетах при определении i_y на шинах распределительных щитов можно принять $K_y = 1,35 - 1,5$ или $K_y = 1,1 - 1,3$ при питании от трансформаторов мощностью 400–1000 кВ·А или 40–250 кВ·А соответственно.

Расчет токов несимметричных КЗ выполняют, используя метод симметричных составляющих. Для получения результирующих сопротивлений составляют схемы замещения прямой и нулевой последовательностей.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока $I_{n0}^{(1)}$, кА, поврежденной фазы при однофазном КЗ от системы

$$I_{n0}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}},$$

где $R_{1\Sigma} = R_{\Sigma}$ и $X_{1\Sigma} = X_{\Sigma}$ – суммарные активное и индуктивное сопротивления

прямой последовательности относительно аварийного узла (практически $R_{2\Sigma} = R_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$), мОм; $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ – то же нулевой последовательности относительно аварийного узла, мОм.

Сопротивления $R_{0\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ соответственно равны

$$\begin{aligned} R_{0\Sigma} &= R_{0T} + R_{TA} + R_{QF} + R_k + R_{0ш} + R_{0W2} + 3R_d, \\ X_{0\Sigma} &= X_{0T} + X_{TA} + X_{QF} + X_k + X_{0ш} + X_{0W2}, \end{aligned}$$

где R_{0T} и X_{0T} – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности понижающего трансформатора, приведенные к ступени напряжения аварийного узла (для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Δ/Y_0 при расчете КЗ в сети низшего напряжения эти сопротивления следует принимать равными соответственно активным и индуктивным сопротивлениям прямой последовательности, при других схемах соединения обмоток трансформаторов сопротивления нулевой последовательности необходимо принимать в соответствии с указаниями изготовителей); $R_{0ш}$ и $X_{0ш}$ – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности шинпровода (ориентировочно эти сопротивления находятся в пределах $R_{0ш} = (5-14,7)R_{ш}$, $X_{0ш} = (7,5-9,4)X_{ш}$); R_{0W2} и X_{0W2} – активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности кабельной линии; R_d – активное сопротивление дуги в аварийном узле, рассчитываемое с учетом условий однофазного КЗ.

Если в низковольтной сети имеются воздушные линии, то их сопротивления нулевой последовательности равны

$$R_{0W} = R_{кр}l + 3R_3l = R_{кр}l + 0,15l,$$

$$X_{0W} \approx 3X_W,$$

где l – длина линии, м; R_3 – активное сопротивление, мОм/м, определяющее потери активной мощности в земле на 1 м трассы линии.

При расчёте минимального значения тока КЗ для произвольного момента времени необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников вследствие нагрева током КЗ (эффект теплового спада тока короткого замыкания). Данное увеличение учитывают с помощью коэффициента K_θ , зависящего от материала и температуры проводника.

$$R_\theta = R_n \cdot K_\theta,$$

где R_n – активное сопротивление проводника при начальной температуре,

мОм; K_0 – коэффициент увеличения активного сопротивления проводника.

Активное сопротивление проводника при его начальной температуре θ_n определяется

$$R_n = R_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{\theta_{\text{усл}} + \theta_n}{\theta_{\text{усл}} + \theta_{\text{норм}}},$$

где $R_{\text{пог}}$ – погонное (удельное) активное сопротивление проводника, мОм/м, при нормированной температуре $\theta_{\text{норм}}$; l – длина проводника до аварийного узла, м; $\theta_{\text{усл}}$ – условная температура (для меди $\theta_{\text{усл}} = 234$ °С, для алюминия $\theta_{\text{усл}} = 236$ °С).

Температуру проводника до возникновения КЗ можно определить

$$\theta_n = \left(\frac{I_{\text{норм.расч}}}{I_{\text{доп.прод}}} \right)^2 (\theta_{\text{доп.прод}} - \theta_{\text{окр.ном}}) + \theta_{\text{окр}},$$

где $I_{\text{норм.расч}}$ – расчетный ток нормального режима, А; $I_{\text{доп.прод}}$ – допустимый ток продолжительного режима для проводника данного сечения, А; $\theta_{\text{доп.прод}}$ и $\theta_{\text{окр.ном}}$ – соответственно допустимая температура нагрева проводника в продолжительном режиме и нормированная температура окружающей среды, °С; $\theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Значение K_0 определяется по формуле

$$K_0 = \frac{\theta_{\text{усл}} + \theta_{\text{кн}}}{\theta_{\text{усл}} + \theta_n},$$

где $\theta_{\text{кн}}$ – конечная температура проводника, °С.

Существуют способы учёта теплового спада тока короткого замыкания, где иначе определяется сопротивление R_0 . Например, значение сопротивления проводника, изменившегося вследствие нагрева током КЗ, можно найти по выражению

$$R_0 = R_n \left[1 + \frac{k \cdot t}{1 + 0,004 \cdot \theta_n} \cdot \left(\frac{I_{\text{н0}}}{s} \right)^2 \right],$$

где $I_{\text{н0}}$ – ток КЗ предварительного расчёта без учёта нагрева проводников,

кА; s – площадь поперечного сечения проводника, мм²; θ_n – температура проводника перед началом КЗ (можно принимать равной 50 °С); t – время действия тока КЗ; k – коэффициент, равный для меди 22, для алюминия 5.

Расчёт нагрева изолированных проводников при продолжительных КЗ рекомендуется выполнять с учётом теплоотдачи в изоляцию. Необходимость учёта теплоотдачи определяется из сопоставления расчётного времени нагрева ($t_{откл}$) с так называемой критической продолжительностью КЗ ($t_{откл.кр}$), при которой пренебрежение теплоотдачей в изоляцию приводит к погрешности в расчётах превышения температуры проводника над начальной, равной 5 %. Теплоотдачу следует учитывать, если $t_{откл} \geq t_{откл.кр}$. Критическая продолжительность КЗ зависит от площади поперечного сечения проводника s и определяется по формулам:

- для кабелей с алюминиевыми жилами

$$t_{откл.кр} = 0,65 \cdot 10^{-2} \cdot s;$$

- для кабелей с медными жилами

$$t_{откл.кр} = 1,22 \cdot 10^{-2} \cdot s.$$

Библиографический список

1. РД 153-34.0-20.527-98.Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б. Н. Неклепаева. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 152 с.
2. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб. для вузов / С. А. Ульянов. М.: Энергия, 1970. 520 с.
3. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов и др. М.: Издат. центр “Академия”, 2005. 416 с.
4. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю. А. Куликов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 283 с.
5. Расчет короткого замыкания: составление схемы замещения. Система относительных единиц: метод. указания / Сост. А. М. Дяков, В. Б. Зорин. Красноярск: КрПИ, 1992. 16 с.
6. Зорин, В. Б. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. указания / В. Б. Зорин. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 56 с.
7. Переходные процессы в электроэнергетических системах: метод. указания по лаб. работам №1–2 / Сост. А. Э. Бобров, А. М. Дяков, В. Б. Зорин, Л. И. Пилушенко. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 36 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| Предисловие..... | 3 |
| 1. Основные понятия и определения..... | 4 |
| 2. Переходный процесс в электроэнергетической системе при трёхфазном коротком замыкании..... | 7 |
| 2.1. Трёхфазное короткое замыкание в простейшей неразветвленной цепи..... | 7 |
| 2.2. Ударный ток короткого замыкания..... | 11 |
| 2.3. Действующее значение полного тока короткого замыкания..... | 15 |
| 2.4. Характеристики двигателей и нагрузки в начальный момент внезапного нарушения режима..... | 17 |
| 2.5. Приближенный учёт системы..... | 19 |
| 2.6. Практические методы расчета переходного процесса короткого замыкания..... | 22 |
| 2.6.1. Общие замечания..... | 22 |
| 2.6.2. Определение начального значения периодической составляющей и ударного тока короткого замыкания..... | 23 |
| 2.6.3. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания..... | 28 |
| 2.7. Определение действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени..... | 32 |
| 2.8. Алгоритм определения периодической составляющей аварийного тока в произвольный момент времени по типовым кривым..... | 38 |
| 2.9. Установившийся режим короткого замыкания..... | 40 |
| 2.10. Влияние АРВ генераторов на установившийся режим короткого замыкания..... | 43 |
| 2.11. Основные уравнения электромагнитного переходного процесса синхронной машины и уравнения Горева – Парка..... | 46 |
| 3. Электромагнитные переходные процессы при нарушении симметрии трехфазной цепи..... | 50 |
| 3.1. Основные положения в исследовании несимметричных переходных процессов..... | 50 |
| 3.1.1. Общие сведения. Образование высших гармоник..... | 50 |
| 3.1.2. Некоторые положения метода симметричных составляющих..... | 52 |
| 3.1.3. Применение метода симметричных составляющих к исследованию переходных процессов..... | 56 |
| 3.2. Параметры элементов электроэнергетических систем для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей..... | 58 |
| 3.2.1. Параметры синхронных машин..... | 59 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.2. Параметры асинхронных электродвигателей..... | 61 |
| 3.2.3. Параметры обобщенной нагрузки..... | 62 |
| 3.2.4. Схемы замещения и параметры трансформаторов и авто- трансформаторов..... | 62 |
| 3.2.5. Параметры воздушных линий электропередачи..... | 70 |
| 3.3. Схемы отдельных последовательностей..... | 75 |
| 3.3.1 Схемы прямой и обратной последовательностей..... | 75 |
| 3.3.2. Схема замещения нулевой последовательности..... | 77 |
| 3.4. Распределение и трансформация токов и напряжений..... | 78 |
| 3.5. Однократная поперечная несимметрия..... | 82 |
| 3.5.1. Однофазное короткое замыкание..... | 83 |
| 3.5.2. Двухфазное короткое замыкание на землю..... | 86 |
| 3.5.3. Двухфазное короткое замыкание..... | 89 |
| 3.5.4. Правило эквивалентности прямой последовательности при поперечной несимметрии..... | 92 |
| 3.5.5. Комплексные схемы замещения..... | 94 |
| 3.5.6. Сравнение видов короткого замыкания..... | 96 |
| 3.6. Алгоритм определения начального значения периодической составляющей тока несимметричного короткого замыкания..... | 100 |
| 3.7. Однократная продольная несимметрия..... | 101 |
| 3.7.1. Разрыв одной фазы..... | 102 |
| 3.7.2. Разрыв двух фаз..... | 107 |
| 3.7.3. Правило эквивалентности прямой последовательности при продольной несимметрии..... | 111 |
| 4. Переходный процесс при замыканиях в распределительных сетях и системах электроснабжения..... | 113 |
| 4.1. Простое замыкание на землю..... | 113 |
| 4.2. Расчет токов коротких замыканий в установках напряжением ниже 1000 В..... | 119 |
| Библиографический список..... | 125 |