

Ю.В.Коровин, Е.И.Пахомов, К.Е.Горшков

РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебное пособие

Одобрено
учебно-методической комиссией энергетического факультета

Рецензенты:
А.В. Белов, М.А. Кулаков

Коровин, Ю.В.

К681 Расчёт токов короткого замыкания в электрических системах: учебное пособие / Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов, К.Е. Горшков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 114 с.

Учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению 140400 – «Электроэнергетика и электротехника», а также на специальностях «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Изложены практические методы расчёта токов трёхфазного и несимметричных коротких замыканий в электрических системах напряжением свыше 1000 В в соответствии с ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта...». Рассмотрены основы и порядок расчёта в системе относительных единиц, метод симметричных составляющих, особенности параметров и формирования схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, правило эквивалентности прямой последовательности. Приведены примеры выполнения расчётов токов короткого замыкания, в том числе и с использованием специализированной программы *ТоКо*. В приложениях представлены полезные для проведения расчётов справочные материалы.

УДК 621.311.015.38(075.8)+621.315(075.8)

ВВЕДЕНИЕ

Коротким замыканием (КЗ) называют всякое, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение различных точек (фаз) электроустановки между собой или с землей, при котором токи в ветвях электроустановки, примыкающих к месту его возникновения, резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима [1].

В трехфазных электроустановках возникают следующие простейшие виды коротких замыканий: трехфазное – $K^{(3)}$; двухфазное – $K^{(2)}$; двухфазное на землю – $K^{(1,1)}$; однофазное – $K^{(1)}$, токи которых могут в несколько раз превышать номинальные токи электрооборудования.

При трехфазном КЗ все фазы электрической цепи оказываются в одинаковых условиях, и оно является **симметричным**. Остальные короткие замыкания называют **несимметричными**. Хотя доля трехфазного КЗ составляет менее 10%, оно очень часто является самым тяжелым режимом из всех видов КЗ и, поэтому, во многом определяющим для оценки допустимых условий работы элементов электрической системы.

В сетях с заземлённой нейтралью (110 кВ и выше) наиболее частым является однофазное КЗ, относительная вероятность возникновения которого составляет 61...95% [2–4], увеличиваясь с ростом номинального напряжения. С усложнением и разветвлением таких электрических систем величина тока при однофазном коротком замыкании возрастает, и в ряде случаев он может оказаться больше тока трехфазного КЗ. Это требует специальных мер по ограничению тока однофазного короткого замыкания, а также особого внимания к его расчёту.

При КЗ резко возрастают токовые нагрузки, что, во-первых, вызывает значительное увеличение сил электродинамического взаимодействия между проводниками и токоведущими частями электроустановок и может привести к механическому повреждению электрооборудования. Во-вторых, приводит к увеличению потерь в проводниках и контактах и их повышенному нагреву. Это может вызвать термическое повреждение как самих токоведущих частей, так и изоляции, оплавление и выгорание контактов.

Кроме того, при КЗ происходит понижение напряжения в электрической системе вблизи места повреждения. В результате возможно лавинообразное развитие системной аварии, остановка двигателей нагрузки, их нагрев и выход из строя.

Таким образом, режим короткого замыкания является аварийным. Необходимо уметь рассчитывать эти режимы, в частности, определять величины токов КЗ в любой точке электрической системы в любой момент времени.

Результаты расчета используются: при выборе и проверке проводников и электрических аппаратов по электродинамической и термической стойкости, а выключателей и предохранителей – ещё и по отключающей способности; определении рациональных схем и режимов выдачи, передачи и распределения мощности в электрической системе; выборе необходимых средств ограничения токов КЗ; для оценки условий работы и настройки релейной защиты и автоматики; для анализа аварий в электроустановках и т.д.

Глава 1. РАСЧЁТ ТОКА ПРИ ТРЁХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

1.1. Общее представление о характере тока короткого замыкания

Рассмотрим простейшую электрическую систему, однолинейная (т. е. для одной фазы) схема замещения которой представлена на рис. 1.1.1. Здесь r_{Σ} и x_{Σ} – результирующие активное и индуктивное сопротивления контура КЗ, $r_{\text{н}}$ и $x_{\text{н}}$ – результирующие активное и индуктивное сопротивления нагрузки; K – ключ, имитирующий наступление КЗ в цепи; $K_{\text{н}}$ – ключ в цепи нагрузки; i_0 – ток цепи в режиме, предшествующем КЗ; i – ток в режиме КЗ. Результирующую эквивалентную мгновенную ЭДС источников зададим выражением

$$e_{\Sigma}(t) = \sqrt{2}E_{\Sigma(t)} \sin(\omega t + \alpha),$$

где: $E_{\Sigma(t)}$ – действующее значение результирующей эквивалентной ЭДС в момент времени t ; α – фаза в момент возникновения КЗ.

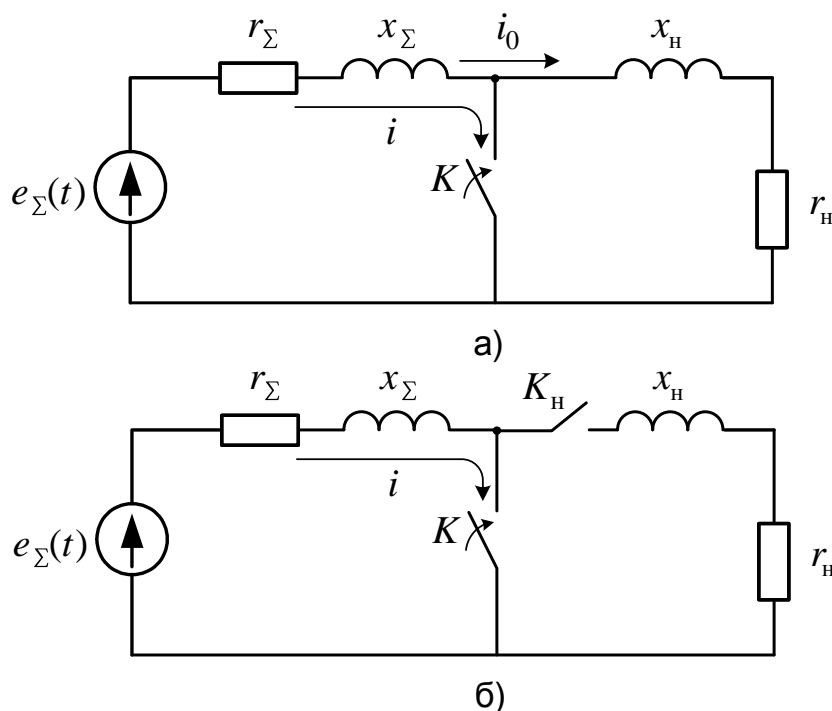


Рис. 1.1.1. Эквивалентные однолинейные схемы замещения для расчета тока КЗ в предварительно нагруженной сети (а) и в предварительно разомкнутой сети (б)

В практических расчетах ток короткого замыкания принято представлять в виде суммы периодической $i_{\text{п}}(t)$ и апериодической $i_{\text{а}}(t)$ составляющих:

$$i(t) = i_{\text{п}}(t) + i_{\text{а}}(t). \quad (1.1.1)$$

В сетях напряжением выше 1000 В величина активного сопротивления контура КЗ r_{Σ} обычно незначительна, следовательно, полное сопротивление контура со-

ставляет $z_{\Sigma} = \sqrt{x_{\Sigma}^2 + r_{\Sigma}^2} \approx x_{\Sigma}$, а угол сдвига фазы тока КЗ относительно ЭДС равен $\varphi_K = \arctg \frac{x_{\Sigma}}{r_{\Sigma}} \approx \frac{\pi}{2}$.

Поэтому периодическую составляющую тока КЗ, отстающую от ЭДС на угол φ_K , можно задать выражением

$$i_{\Pi}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi(t)} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K), \quad (1.1.2)$$

где $I_{\Pi(t)}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ, в общем случае изменяющееся с течением времени; $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с – угловая промышленная частота сети; α – фаза в момент возникновения КЗ.

Для начального момента времени действующее значение периодической составляющей тока КЗ может быть найдено как

$$I_{\Pi(0)} = \frac{E_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma}}, \quad (1.1.3)$$

где $E_{\Sigma(0)}$ – действующее значение результирующей эквивалентной ЭДС источников в начальный момент времени.

Тогда по формуле (1.1.2) при $\varphi_K = \pi/2$ и с учетом (1.1.3) начальное значение периодической составляющей тока (т. е. в момент КЗ, соответствующий $t = 0$) определяется как

$$i_{\Pi}(0) = -\sqrt{2} \cdot I_{\Pi(0)} \cdot \cos \alpha, \quad (1.1.4)$$

т. е. зависит от фазы α в момент появления КЗ.

Апериодическая составляющая тока КЗ в активно-индуктивном контуре изменяется по экспоненциальному закону:

$$i_a(t) = i_{a(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (1.1.5)$$

где $i_{a(0)}$ – начальное значение апериодической составляющей тока КЗ;

$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot r_{\Sigma}} = \frac{L_{\Sigma}}{r_{\Sigma}}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей

тока КЗ (постоянная времени контура КЗ).

Причину появления в момент КЗ апериодической составляющей тока можно объяснить следующим образом. Перед КЗ в сети протекали токи, и в индуктивных элементах существовал некий запас энергии. В момент КЗ происходит резкое уменьшение сопротивления на пути тока, задаваемого источником. Это вызывает скачкообразное увеличение периодической составляющей тока i_{Π} по сравнению с током предшествующего режима i_0 , который был также периодическим. Однако полный ток в цепи с индуктивностью измениться мгновенно, скачком, не может (имеет место закон коммутации), так как не может мгновенно измениться запасенная в индуктивности энергия. Поэтому скачкообразное изменение периодиче-

ского тока должно быть скомпенсировано появлением аналогичной по величине, но противоположной по знаку свободной составляющей тока, не зависящей от характера ЭДС источника. Поскольку появление свободного тока возможно только при однократном возмущении (в данном случае – при КЗ), которое не повторяется периодически с частотой сети, то свободный ток имеет аperiодический характер, описываемый выражением (1.1.5). Эта составляющая постепенно затухает, что связано с наличием активного сопротивления (зачастую весьма незначительного), в котором рассеивается запасенная в индуктивности энергия. Чем больше индуктивность контура КЗ и чем меньше его активное сопротивление, тем медленнее затухает аperiодическая составляющая тока и дольше длится переходный процесс. После полного завершения переходного процесса в сети возникает установившийся режим КЗ, в котором имеет место только периодический ток.

Продолжительность переходного процесса обычно составляет $(3...4)T_a$, что занимает не менее нескольких периодов промышленной частоты. Когда во время переходного процесса периодическая составляющая тока первый раз проходит через свой максимум (амплитуду) того же знака, что имеет аperiодическая составляющая, у полного тока наблюдается пик. **Наибольшее возможное мгновенное значение тока короткого замыкания принято называть ударным током** [5].

Ударный ток в активно-индуктивной цепи с незначительным активным сопротивлением (т.е. при $\varphi_k \approx \pi/2$) определяют при следующих расчетных допущениях [1, 3, 5]:

- до короткого замыкания ток в элементах контура отсутствовал, т. е. в предшествующем режиме был холостой ход (см. рис. 1.1.1, б);
- периодическая составляющая тока в момент КЗ проходит через свой максимум (т.е. имеет амплитудное значение), что в чисто индуктивной цепи соответствует переходу через ноль мгновенного значения ЭДС;
- до наступления ударного тока амплитуда периодической составляющей остается неизменной и равной своему начальному значению.

Выражение (1.1.1) в условиях первого допущения для начального момента времени $t = 0$, совпадающего с моментом возникновения КЗ, принимает вид:

$$i_a(0) = -i_{\pi}(0). \quad (1.1.6)$$

Второе допущение означает, что при $\varphi_k = \pi/2$ моменту возникновения КЗ $t = 0$ соответствует условие $\alpha = 0$, так как в этом случае периодическая составляющая в момент КЗ имеет амплитудное значение, определяемое из выражений (1.1.2) и (1.1.3) подстановкой указанных значений φ_k, t, α :

$$i_{\pi}(0) = \sqrt{2} \cdot I_{\pi(0)} \cdot \sin(\omega \cdot 0 + 0 - \pi / 2)$$

или

$$i_{\pi}(t) = -\sqrt{2} \cdot I_{\pi(0)}. \quad (1.1.7)$$

При $\alpha = 0$ и $\varphi_k = \pi/2$ выражение (1.1.2) для произвольного момента времени преобразуется к виду

$$i_{\text{п}}(t) = -\sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(t)} \cdot \cos \omega t. \quad (1.1.8)$$

Начальное значение аperiodической составляющей с учетом выражений (1.1.6) и (1.1.7) находится как

$$i_{\text{а}}(0) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)},$$

а выражение (1.1.5) для определения этой составляющей тока КЗ в произвольный момент времени примет вид

$$i_{\text{а}}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{а}}}}. \quad (1.1.9)$$

Таким образом, для расчетной схемы (см. рис. 1.1.1, б) в соответствии с выражениями (1.1.8) и (1.1.9) можно построить графики зависимостей от времени периодической $i_{\text{п}}$ и аperiodической $i_{\text{а}}$ составляющих тока КЗ, а с учетом выражения (1.1.1) также получить график полного тока КЗ i (рис. 1.1.2) и графически найти ударный ток $i_{\text{у}}$.

Третье допущение позволяет упростить определение ударного тока. Для наглядности воспользуемся рис. 1.1.2, где видно, что ударный ток $i_{\text{у}}$ наступает в момент времени $t_{\text{м}}$, когда периодическая составляющая первый раз проходит через амплитудное значение того же знака, что имеет аperiodическая составляющая. При этом $I_{\text{п}(t_{\text{м}})} \approx I_{\text{п}(0)}$. Поэтому величина ударного тока определяется как

$$i_{\text{у}} = i_{\text{п}}(t_{\text{м}}) + i_{\text{а}}(t_{\text{м}}) = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)} + \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)} \cdot e^{-\frac{t_{\text{м}}}{T_{\text{а}}}}.$$

Поскольку $t_{\text{м}} \approx T/2 = 0,01$ с (здесь T – период промышленной частоты), то

$$i_{\text{у}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)} + \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)} \cdot e^{-\frac{0,01}{T_{\text{а}}}}$$

или

$$i_{\text{у}} = K_{\text{у}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{п}(0)}, \quad (1.1.10)$$

где $I_{\text{п}(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ; $K_{\text{у}}$ – ударный коэффициент, определяемый при условии $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} \geq 5$ [1] (т. е. $T_{\text{а}} \geq 0,016$ с) по общепринятому выражению

$$K_{\text{у}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_{\text{а}}}}. \quad (1.1.11)$$

При $x_{\Sigma}/r_{\Sigma} < 5$ рекомендуется $K_{\text{у}}$ определять по любой из формул [1, 3]:

$$K_{\text{у}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3}{\omega \cdot T_{\text{а}}}}; \quad (1.1.12)$$

$$K_{\text{у}} = 1 + e^{-\frac{0,01 \cdot (0,5 + \frac{\varphi_{\text{к}}}{\pi})}{T_{\text{а}}}}. \quad (1.1.13)$$

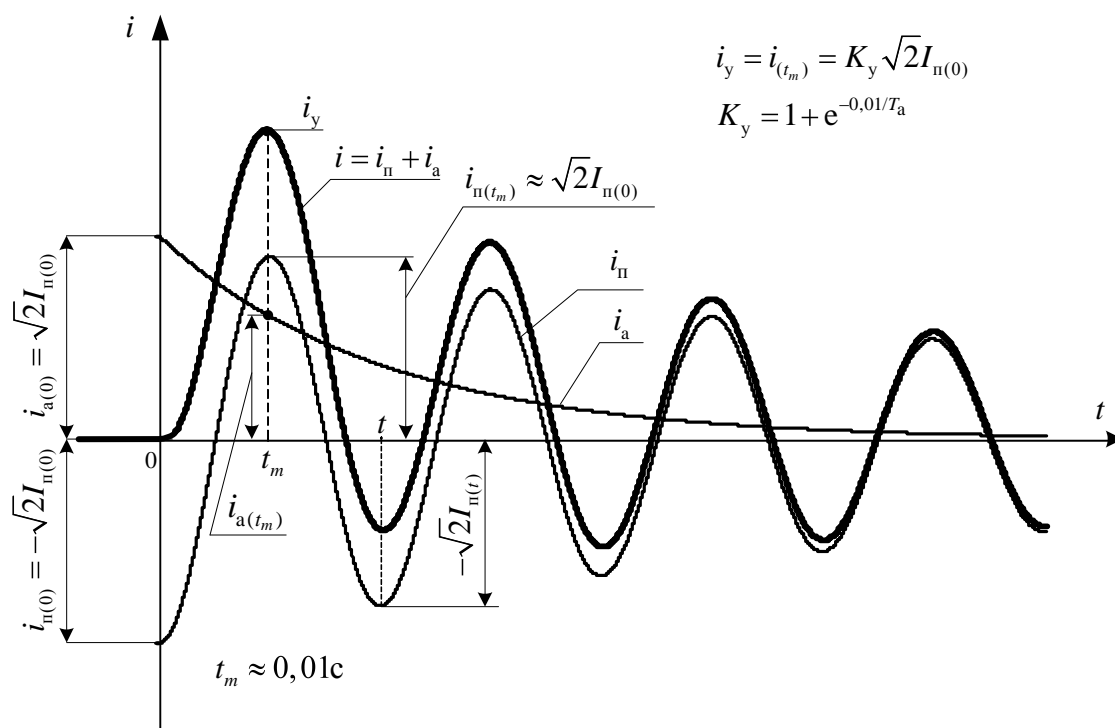


Рис. 1.1.2. Графики зависимостей периодической i_{π} и аperiodической i_a составляющих тока короткого замыкания i от времени

Все короткие замыкания делятся на *удаленные* и *близкие* [1]. При приближенных расчетах короткое замыкание допустимо считать удаленным, если точка КЗ находится по отношению к синхронной машине за двумя или более трансформаторами или за реактором (кабельной линией), сопротивление которого превышает сверхпереходное сопротивление синхронного генератора или компенсатора более чем в 2 раза [4]. Если короткое замыкание удаленное, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ считается неизменным и равным начальному, т. е. $I_{\pi(t)} = I_{\pi(0)} = \text{const}$.

При близком КЗ периодическая составляющая тока $I_{\pi(t)}$ уменьшается с течением времени до некоторого установившегося значения (см. рис. 1.1.2). В этом состоит одна из главных особенностей переходных процессов, протекающих в синхронных машинах при коротких замыканиях [2–4, 6–10] и сопровождающихся изменением параметров этих машин.

Для целей проектирования необходимо владеть практическими методами расчета и уметь определять следующие величины, характеризующие ток короткого замыкания: начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\pi(0)}$; действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени $I_{\pi(t)}$; аperiodическую составляющую тока КЗ в произвольный момент времени $i_a(t)$ (или $i_{a(t)}$, как это принято в дальнейшем изложении); ударный ток КЗ i_y .

1.2. Основные допущения и порядок расчета

При проектировании и эксплуатации электроустановок обычно используют приближенные методы расчета токов короткого замыкания, основанные на допущениях, которые упрощают расчеты и приводят к определению токов короткого замыкания с запасом в 5...10 %. Такая погрешность допустима для инженерных расчетов.

При выполнении данной курсовой работы используются следующие общепринятые допущения [1].

1. При расчете действующего значения периодической составляющей тока КЗ в установках напряжением свыше 1000 В, как правило, не учитывают активные сопротивления элементов электрической системы, если результирующее эквивалентное активное сопротивление относительно точки КЗ не превышает 30% результирующего эквивалентного индуктивного сопротивления этой же цепи

$$r_{\Sigma} \leq 0,3 \cdot x_{\Sigma}, \quad (1.2.1)$$

что выдерживается в подавляющем большинстве случаев для данных сетей.

Активное сопротивление элементов сети необходимо знать при определении постоянной времени апериодической составляющей тока КЗ. Но и в этом случае, как будет показано ниже, часто обходятся без точных расчетов.

2. Не учитывают насыщение магнитных систем, что позволяет считать постоянными все индуктивные сопротивления сети.

3. Пренебрегают намагничивающими токами силовых трансформаторов.

4. Не учитывают поперечные емкости воздушных линий напряжением до 35 кВ, воздушных линий напряжением 110 – 220 кВ при длине их не более 200 км и напряжением 330 – 500 кВ при длине до 150 км.

5. Не учитывают токи нагрузки.

6. Считают, что трехфазная система является симметричной.

7. Принимают, что в течение всего процесса короткого замыкания ЭДС всех источников системы совпадают по фазе.

8. Учитывают подпитку места КЗ от синхронных и асинхронных электродвигателей мощностью 100 кВт и более, если они не отделены от точки КЗ токоограничивающими реакторами или силовыми трансформаторами.

Кроме того, короткое замыкание считается металлическим, то есть переходное сопротивление электрической дуги в месте КЗ принято равным нулю.

Порядок вычисления тока трехфазного КЗ сводится к следующему.

1. Составляется расчетная схема электрической сети.

2. Составляется схема замещения для заданной точки короткого замыкания, и определяются параметры элементов схемы.

3. Путем преобразований приводят схему замещения к простейшему виду, когда вся схема состоит из одной или нескольких ветвей, каждая из которых включает результирующую эквивалентную ЭДС и результирующее эквивалентное сопротивление. По закону Ома определяют начальные действующие значения периодических составляющих токов КЗ в этих ветвях и находят их сумму.

4. Определяют апериодическую составляющую тока КЗ и ударный ток.

5. При необходимости, находят распределение начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ по ветвям исходной схемы замещения и, с помощью метода типовых кривых, определяют действующие значения периодической составляющей тока КЗ в интересующие моменты времени.

Расчет может производиться в именованных или в относительных единицах. В настоящей работе расчет производится в системе относительных единиц, что позволяет несколько упростить расчётные формулы.

1.3. Приведение сопротивлений к основной ступени напряжения

Первоначально определяется *расчётная схема*, под которой понимается упрощенная однолинейная схема электрической системы с указанием всех влияющих на ток КЗ элементов. Наиболее удалённая от места КЗ часть системы, детализация которой практически не влияет на величины токов КЗ на рассматриваемом участке, может быть представлена эквивалентным источником (системой).

По расчетной схеме составляется её *схема замещения*, отличающаяся тем, что источники питания вводятся своими ЭДС и сопротивлениями, а остальные элементы – только сопротивлениями. При этом обычно производится замена магнитосвязанных цепей одной электрической цепью путём приведения всех параметров к одной ступени напряжения. Схему замещения, включающую эквивалентные сопротивления элементов, называют *эквивалентной* (часто это слово опускается).

Каждый элемент электрической системы имеет свою собственную схему замещения, которая может содержать одно или несколько сопротивлений. Схемы замещения отдельных элементов входят в общую схему замещения в том же порядке, в котором элементы представлены в расчетной схеме. Общепринятые схемы замещения элементов электрических систем представлены в **Приложении 1**, а выражения для расчета именованных значений сопротивлений этих элементов по их каталожным (справочным) значениям – в **Приложении 2**.

При составлении схемы замещения выбирается *основная* (или *базисная*) ступень напряжения, и все электрические величины остальных ступеней *приводятся* к напряжению этой ступени. Обычно с целью упрощения расчета в качестве базисной выбирается ступень напряжения, где имеет место КЗ.

Пусть ступень напряжения U_1 отделена от основной ступени с напряжением U_6 , принятым за базисное, каскадом трансформаторов и автотрансформаторов с коэффициентами трансформации K_1, K_2, \dots, K_n . Тогда для приведения к основной ступени ЭДС E и сопротивления x , заданных в именованных значениях на ступени напряжения U_1 , необходимо воспользоваться соотношениями:

$$\overset{\circ}{E} = E \cdot K; \quad (1.3.1)$$

$$\overset{\circ}{x} = x \cdot K^2; \quad (1.3.2)$$

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n. \quad (1.3.3)$$

В общем случае

$$K_i = \frac{U_i}{U_{i-1}},$$

где U_i – напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону основной ступени; U_{i-1} – напряжение холостого хода обмотки трансформатора, обращенной в сторону ступени, с которой осуществляется приведение.

Таким образом, в выражениях (1.3.1) – (1.3.3) **коэффициенты трансформации определяют в направлении от основной ступени к ступени, подлежащей приведению.**

Для примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.3.1.

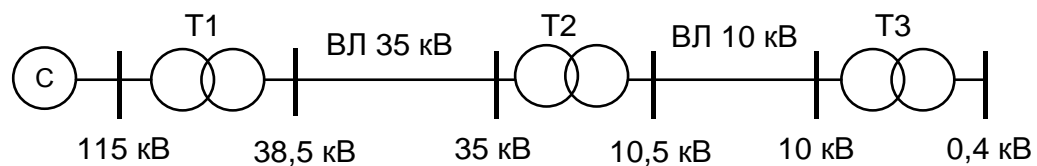


Рис. 1.3.1. Схема сети с каскадом трансформаторов

Схема замещения двухобмоточного трансформатора Т1 (тип ТДН-25000/110, $S_{\text{ном}} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ВНном}} = 115 \text{ кВ}$, $U_{\text{ННном}} = 38,5 \text{ кВ}$, $u_k = 10,5\%$) состоит из одного сопротивления. Его величину, приведённую к стороне высшего напряжения $U_{\text{ВНном}} = 115 \text{ кВ}$, найдем по соответствующему выражению из **Приложения 2**:

$$x_{\text{T1(ВН)}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВНном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2}{25} = 55,545 \text{ Ом}.$$

Сопротивление этого же трансформатора, но приведённое к стороне низшего напряжения $U_{\text{ННном}} = 38,5 \text{ кВ}$, будет равно:

$$x_{\text{T1(НН)}} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ННном}}^2}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{38,5^2}{25} = 6,225 \text{ Ом}.$$

Отношение сопротивлений $x_{\text{T1(ВН)}} / x_{\text{T1(НН)}} = 8,922$ равняется квадрату коэффициента трансформации, который находится как

$$K_{\text{T1}} = \frac{U_{\text{ВНном}}}{U_{\text{ННном}}} = \frac{115}{38,5} = 2,987.$$

Таким образом, сопротивления трансформатора, приведённые к разным его ступеням напряжения, отличаются в K_T^2 раз, что соответствует выражению (1.3.2).

Пусть задано сопротивление x_{T3} трансформатора Т3, подсчитанное для ступени $U_1 = 0,4 \text{ кВ}$. За базисное принято напряжение $U_6 = 115 \text{ кВ}$ на шинах систе-

мы. Необходимо определить сопротивление трансформатора Т3, приведенное к базисной ступени напряжения.

Коэффициенты трансформации трансформаторов Т1, Т2 и Т3 равны:

$$K_{T1} = \frac{115}{38,5}; \quad K_{T2} = \frac{35}{10,5}; \quad K_{T3} = \frac{10}{0,4}.$$

Отсюда на основании выражения (1.3.2) определим сопротивление трансформатора Т3, приведенное к ступени напряжения $U_6 = 115$ кВ:

$$\overset{\circ}{x}_{T3(6)} = x_{T3} \cdot \left(\frac{115}{38,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{35}{10,5}\right)^2 \cdot \left(\frac{10}{0,4}\right)^2 = 6,196 \cdot 10^4 \cdot x_{T3}.$$

Точный расчет необходимо производить с учетом фактического значения коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов, а также значений напряжений в узлах схемы. Однако не всегда есть возможность иметь эту информацию. Так, если регулятор на трансформаторе с номинальным напряжением 35 кВ позволяет производить регулировку в пределах $\pm 16\%$, то на вводе мы можем получить и 30 кВ, и 40 кВ. Для приближенных расчетов используют **шкалу средних номинальных напряжений**: 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 20; 24; 37; 115; 230; 340; 400; 515; 750; 1150 кВ. Например, если номинальное напряжение 35 кВ, то среднее номинальное напряжение будет равно 37 кВ.

При этом **напряжения во всех точках электрической системы одной ступени трансформации принимаются одинаковыми и равными среднему номинальному U_{cp} данной ступени**. В результате определение коэффициента трансформации по выражению (1.3.3) существенно упрощается, поскольку напряжения на промежуточных ступенях трансформации взаимно сокращаются:

$$K = \frac{U_{cp.осн}}{U_{cp.ст}}, \quad (1.3.4)$$

где $U_{cp.осн} = U_6$ и $U_{cp.ст}$ – средние номинальные напряжения основной ступени (базисное напряжение) и ступени, с которой осуществляется приведение.

Для примера, в схеме на рис. 1.3.1 мы заменим фактические напряжения средними номинальными и снова рассчитаем сопротивление трансформатора Т3, приведенное со ступени 0,4 кВ к основной:

$$K_{T1cp} = \frac{115}{37}; \quad K_{T2cp} = \frac{37}{10,5}; \quad K_{T3cp} = \frac{10,5}{0,4};$$

$$K_{cp} = K_{T1cp} \cdot K_{T2cp} \cdot K_{T3cp} = \frac{U_{cp.осн}}{U_{cp.ст}} = \frac{115}{0,4};$$

$$\overset{\circ}{x}_{T3} = x_{T3} \cdot K_{cp}^2 = x_{T3} \cdot \left(\frac{115}{0,4}\right)^2 = 8,266 \cdot 10^4 \cdot x_{T3}.$$

Упрощение в расчетах при применении средних номинальных напряжений и, соответственно, средних коэффициентов трансформации, заставляет мириться с

получаемой погрешностью. Но такое допущение не всегда приемлемо, и в случаях, когда погрешность выходит за допустимые рамки (5...10 %), необходимо применять точное приведение.

1.4. Система относительных единиц

Рассмотрим какой-либо элемент трехфазной электрической цепи со следующими номинальными параметрами: $U_{\text{НОМ}}$ (кВ), $I_{\text{НОМ}}$ (кА), $S_{\text{НОМ}}$ (МВА) и $z_{\text{НОМ}}$ (Ом) (полагаем $r_{\text{НОМ}} = 0$ и $x_{\text{НОМ}} = z_{\text{НОМ}}$), которые связаны между собой выражениями:

$$S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}; \quad (1.4.1)$$

$$z_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}. \quad (1.4.2)$$

Любой другой режим того же элемента цепи характеризуется некоторыми значениями напряжения U , тока I , мощности $S = \sqrt{3}UI$ и сопротивлением $z = U / (\sqrt{3}I)$ (при $r = 0$ имеем $x = z$), которые можно выразить в долях соответствующих номинальных величин данного элемента:

$$\begin{aligned} U_{* \text{ НОМ}} &= \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}; & I_{* \text{ НОМ}} &= \frac{I}{I_{\text{НОМ}}}; & S_{* \text{ НОМ}} &= \frac{S}{S_{\text{НОМ}}}; \\ x_{* \text{ НОМ}} &= \frac{x}{z_{\text{НОМ}}} = \frac{x \cdot \sqrt{3} I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{x \cdot S_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2}. \end{aligned} \quad (1.4.3)$$

Полученные таким образом величины являются **относительными номинальными величинами**, характеризующими элемент цепи при заданных условиях его работы. Индекс «*» указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс «(НОМ)» – что она отнесена к номинальным параметрам элемента.

В каталогах приводятся относительные значения параметров, приведенные к номинальной мощности и номинальному напряжению элемента. В некоторых случаях относительные номинальные величины выражают в %:

$$x_{\%} = x_{* \text{ НОМ}} \cdot 100. \quad (1.4.4)$$

Так, относительное номинальное значение сопротивления трансформатора Т1 типа ТДН-25000/110 (см. рис. 1.3.1) можно определить по его напряжению короткого замыкания u_k , обычно приводимого в % (для краткости символ % можно опускать):

$$x_{* \text{ НОМ}} \approx z_{* \text{ НОМ}} = \frac{u_k \%}{100\%} = \frac{10,5\%}{100\%} = 0,105.$$

Значения параметров можно определять по отношению не только к номинальным параметрам элемента, но и к любой другой базисной системе величин. В базисную систему величин входят базисная мощность S_6 , базисное напряжение U_6

и базисный ток $I_{\bar{6}}$, связанные выражением для мощности трехфазной системы $S_{\bar{6}} = \sqrt{3}U_{\bar{6}}I_{\bar{6}}$, а также базисное сопротивление $z_{\bar{6}}$. Произвольно можно выбирать только две базисные величины, а две другие рассчитываются. Обычно задаются базисными значениями мощности $S_{\bar{6}}$ и напряжения $U_{\bar{6}}$, а базисный ток и сопротивление вычисляют:

$$I_{\bar{6}} = \frac{S_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{6}}}; \quad (1.4.5)$$

$$z_{\bar{6}} = \frac{U_{\bar{6}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{6}}} = \frac{U_{\bar{6}}^2}{S_{\bar{6}}}. \quad (1.4.6)$$

Тогда относительные величины при базисных условиях определяют по следующим формулам:

$$U_* = \frac{U}{U_{\bar{6}}}; \quad I_* = \frac{I}{I_{\bar{6}}}; \quad S_* = \frac{S}{S_{\bar{6}}}; \quad (1.4.7)$$

$$x_* = \frac{x}{z_{\bar{6}}} = x \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}} = x \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2}. \quad (1.4.8)$$

Если задано сопротивление элемента в относительных единицах при номинальных условиях, то его можно привести к выбранным базисным условиям:

$$x_* = x_{* \text{ ном}} \cdot z_{\text{ном}} / z_{\bar{6}} = x_{* \text{ ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} \cdot \frac{I_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}} = x_{* \text{ ном}} \frac{S_{\bar{6}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}} \cdot U_{\bar{6}}^2}. \quad (1.4.9)$$

Вернемся к трансформатору ТДН-25000/110 (Т1 на рис. 1.3.1). Мы знаем его сопротивление $x_{\text{Т1(ВН)}} = 55,545 \text{ Ом}$, приведённое к стороне высшего напряжения, а также его относительное номинальное сопротивление $x_{* \text{ ном}} = 0,105$. Сначала рассчитаем его сопротивление в относительных единицах при базисных условиях $S_{\bar{6}} = 100 \text{ МВА}$ и $U_{\bar{6}} = 115 \text{ кВ}$ по выражению (1.4.8):

$$x_* = x_{\text{Т1(ВН)}} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} = 55,545 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,42.$$

Повторим расчет по формуле (1.4.9), которая при равенстве $U_{\text{ном}} = U_{\bar{6}}$ приобретает вид:

$$x_* = x_{* \text{ ном}} \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{u_{\text{к}} \%}{100 \%} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{ном}}}; \quad (1.4.10)$$

$$x_* = 0,105 \cdot \frac{100}{25} = 0,42.$$

Выражение (1.4.10) обычно используется для определения сопротивлений двухобмоточных трансформаторов в схеме замещения при расчете тока КЗ в системе относительных единиц при базисных условиях. Выражения для приведе-

ния параметров других элементов электрической системы к базисным условиям рассмотрены ниже в п. 1.5.

При использовании системы относительных величин имеет место численное равенство относительных значений междуфазного (линейного) и фазного напряжений (или ЭДС):

$$U_{* \text{ лин}} = \frac{U_{\text{лин}}}{U_{\text{б.лин}}} = \frac{\sqrt{3}U_{\text{ф}}}{\sqrt{3}U_{\text{б.ф}}} = \frac{U_{\text{ф}}}{U_{\text{б.ф}}} = U_{* \text{ ф}}. \quad (1.4.11)$$

Для удобства расчета величину базисной мощности $S_{\text{б}}$ принимают равной 100 или 1000 МВ·А, или мощности одного из элементов, а базисное напряжение обычно принимают равным среднему номинальному напряжению ступени, на которой расположена точка короткого замыкания, то есть $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.осн}}$.

Заметим, что индекс «*», как и многие другие, можно опускать для краткости, если это не вызывает разночтения.

1.5. Выражения для определения ЭДС и сопротивлений элементов расчетной схемы и приведения их к базисным условиям

В рамках учебного проектирования приведение параметров элементов расчетной схемы можно производить приближенно, в относительных единицах по средним коэффициентам трансформации. Основные соотношения для такого приведения представлены в **Приложении 3**. Ниже рассмотрим используемые там расчетные формулы из работ [1, 3, 5] и дадим некоторые пояснения к ним.

При расчете начального действующего значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ синхронные и асинхронные машины в схему замещения должны быть введены сверхпереходными сопротивлениями и сверхпереходными ЭДС. Последние, как известно, в момент КЗ сохраняют свои значения, имевшие место в предшествующем режиме.

ЭДС генераторов и двигателей

Для синхронных генераторов и электродвигателей, которые до КЗ работали с перевозбуждением, начальное фазное значение сверхпереходной ЭДС следует определять с учетом предшествующего режима по формуле

$$E_{\text{ф}}'' \approx E_0'' = \sqrt{(U_{\text{ф}0} + I_0 x_d'' \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x_d'' \cos \varphi_0)^2}, \quad (1.5.1)$$

где $U_{\text{ф}0}$ – фазное напряжение на выводах машины в момент, предшествующий КЗ, кВ; I_0 – ток статора в момент, предшествующий КЗ, кА; x_d'' – сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронной машины по продольной оси, Ом; φ_0 – угол сдвига фаз напряжения и тока в момент, предшествующий КЗ, град. эл.

Для синхронных генераторов и электродвигателей, работавших до КЗ с недо-возбуждением, сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле:

$$E_{\text{ф}}'' = \sqrt{(U_{\text{ф}0} - I_0 \cdot x_d'' \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x_d'' \cos \varphi_0)^2}. \quad (1.5.2)$$

Для синхронных компенсаторов, работавших до КЗ с перевозбуждением:

$$E''_{\Phi} = U_{\Phi 0} + I_0 \cdot x''_d, \quad (1.5.3)$$

а для работавших с недовозбуждением:

$$E''_{\Phi} = U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x''_d. \quad (1.5.4)$$

Для эквивалентного источника (системы) ЭДС принимается неизменной и равной среднему номинальному напряжению сети:

$$E_{C.\Phi} = U_{ср.\Phi}. \quad (1.5.5)$$

Тогда при $U_{\Phi} = U_{ср}$ (или $U_{\Phi.\Phi} = U_{ср.\Phi}$, что то же самое с учётом формулы (1.4.11)) в относительных единицах при базисных условиях имеем

$$E_{*C} = 1. \quad (1.5.6)$$

Если параметры предшествующего режима не заданы, то принимают, что до КЗ электрические машины работали в номинальном режиме. Поэтому в системе относительных единиц справедливы соотношения:

$$U_{*0} = 1; \quad I_{*0} = 1. \quad (1.5.7)$$

Тогда формула (1.5.1) для синхронных генераторов и двигателей примет вид

$$E''_{*} = E''_{*(ном)} = \sqrt{(1 + x''_{*d(ном)} \cdot \sin \varphi_{ном})^2 + (x''_{*d(ном)} \cdot \cos \varphi_{ном})^2}, \quad (1.5.8)$$

где $x''_{*d(ном)}$ – сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси генератора в относительных номинальных единицах.

При отсутствии значений $x''_{*d(ном)}$ можно пользоваться таблицей 1.5.1 [2].

Таблица 1.5.1

Средние значения сверхпереходных величин
в относительных единицах при номинальных условиях

Наименование элемента	$x''_{*(ном)}$	$E''_{*(ном)}$
Турбогенератор мощностью до 100 МВт	0,125	1,08
То же мощностью 100 – 500 МВт	0,20	1,13
Гидрогенератор с демпферными обмотками	0,20	1,13
Гидрогенератор без демпферных обмоток	0,27	1,18
Синхронный двигатель	0,20	1,10
Синхронный компенсатор	0,20	1,20
Асинхронный двигатель	0,20	0,90
Обобщенная нагрузка	0,35	0,85

Ниже приводятся формулы для определения сопротивлений отдельных элементов в относительных единицах при базисных условиях, приведенные к основной ступени напряжения, т. е. при $U_{\text{осн}} = U_{\text{б}}$.

Сопротивление синхронной машины

Сопротивление генератора в схеме замещения в относительных единицах при базисной мощности $S_{\text{б}}$ равно:

$$x''_* = x''_{*d(\text{ном})} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}} = x''_{*d(\text{ном})} \cdot \frac{S_{\text{б}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (1.5.9)$$

где $S_{\text{ном}}$ и $P_{\text{ном}}$ – соответственно, полная (МВ·А) и активная (МВт) номинальная мощность генератора; $\cos \varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности.

Сопротивления трансформаторов

Индуктивное сопротивление **двухобмоточного** трансформатора и автотрансформатора без обмотки низшего напряжения определяем по формуле (1.4.10).

Если возникнет необходимость рассчитать активное сопротивление трансформатора, его определяют по выражению:

$$r_* = \frac{\Delta P_{\text{к}} \cdot S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^{-3}, \quad (1.5.10)$$

где $\Delta P_{\text{к}}$ – потери короткого замыкания трансформатора, кВт; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

Для **трехобмоточного** трансформатора и **трехфазного автотрансформатора** с обмоткой низшего напряжения индуктивные сопротивления ветвей трехлучевой схемы замещения определяем по формулам:

$$\begin{aligned} x_{*\text{ВН}} &= \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кВ-Н}} - u_{\text{кС-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \\ x_{*\text{СН}} &= \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \\ x_{*\text{НН}} &= \frac{0,5(u_{\text{кВ-Н}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-С}})}{100} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{ном}}}; \end{aligned} \quad (1.5.11)$$

где $u_{\text{кВ-С}}$, $u_{\text{кВ-Н}}$ и $u_{\text{кС-Н}}$ – напряжения короткого замыкания между выводами соответствующих обмоток, %.

Для однофазных автотрансформаторов также используются формулы (1.4.10) или (1.5.11), только $S_{\text{ном}} = 3 \cdot S_{\text{ном.одн}}$ (здесь $S_{\text{ном.одн}}$ – номинальная мощность однофазного трансформатора).

Сопротивления реактора

В каталогах приводится индуктивное сопротивление реакторов $x_{\text{р}}$ в именованных единицах при номинальных условиях. Используя его, можно определить индуктивное сопротивление в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_* = x_p \frac{S_6}{U_{cp}^2}, \quad (1.5.12)$$

где U_{cp} – среднее номинальное напряжение в месте установки реактора, кВ.

Если известно относительное номинальное сопротивление реактора в процентах $x_{p,\%}$, то применяют выражение

$$x_* = \frac{x_{p,\%}}{100\%} \cdot \frac{I_6 \cdot U_6}{I_{ном} \cdot U_{ном}}, \quad (1.5.13)$$

где I_6 и U_6 – базисные значения тока (кА) и напряжения (кВ); $I_{ном}$ и $U_{ном}$ – номинальные значения тока (кА) и напряжения (кВ) реактора.

Сопротивление линии электропередачи

В каталогах приводятся погонные (удельные) сопротивления ЛЭП на единицу длины (активное $r_{пог}$ и индуктивное $x_{пог}$, Ом/км). Зная их, можно определить сопротивления ЛЭП длиной l в относительных единицах при базисных условиях:

$$x_* = x_{пог} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2 \cdot n}; \quad (1.5.14)$$

$$r_* = r_{пог} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2 \cdot n}, \quad (1.5.15)$$

где U_{cp} – среднее номинальное напряжение ЛЭП, кВ; n – количество параллельных цепей в линии.

При отсутствии данных по сечению и типу проводов для курсового проектирования допустимо принимать $x_{пог} = 0,4$ Ом/км у воздушных линий 35 – 220 кВ.

Сопротивление электрической системы

Когда в расчетной схеме задействована небольшая часть мощной системы, то остальную её часть можно представить в виде эквивалентного источника (системы). Реактивное сопротивление эквивалентной системы определяется через мощность трехфазного короткого замыкания $S_K^{(3)}$ в точке подключения системы:

$$x_{с*} = \frac{S_6}{S_K^{(3)}}, \quad (1.5.16)$$

где $S_K^{(3)} = \sqrt{3} U_{cp} I_K^{(3)}$, МВ·А; $I_K^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ на шинах эквивалентной системы, найденный без учета выделенного (расчетного) участка сети, кА; U_{cp} – среднее номинальное напряжение на шинах эквивалентной системы, кВ.

Если заданы сопротивление системы в относительных единицах $x_{с(ном)*}$ и её номинальная мощность $S_{сном}$, то приведенное сопротивление системы в относительных единицах при базисных условиях будет равно:

$$x_{*C} = x_{*C(\text{ном})} \frac{S_6}{S_{C\text{ном}}} . \quad (1.5.17)$$

Расчетные выражения для определения сопротивлений и ЭДС асинхронных двигателей и обобщенной нагрузки рассмотрены в п. 1.9.

1.6. Расчёт действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени

Для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени составляется однолинейная схема замещения рассматриваемого участка сети и рассчитываются её параметры (см. п. 1.3). В случае проведения расчёта в относительных единицах при средних коэффициентах трансформации следует воспользоваться выражениями из п. 1.5 или **Приложения 3**. Из расчётной схемы следует исключить те элементы сети, которые оказываются зашунтированными коротким замыканием. Ток через них протекать либо вообще не будет (если элемент располагается за точкой КЗ по отношению ко всем источникам), либо величина тока будет пренебрежимо мала (если элемент хоть и располагается к источнику ближе, чем точка КЗ, но сам ток КЗ через него не протекает, а может проходить лишь уменьшенный ток нагрузки, определяемый наличием остаточного напряжения в узлах схемы при удалённом КЗ).

После составления схемы замещения и определения её параметров, схему сворачивают относительно точки КЗ, используя элементарные преобразования (см. **Приложение 4**). В результате сворачивания обычно остаётся схема в виде одно- или двухлучевой звезды (рис. 1.6.1). Первая схема (см. рис. 1.6.1, а) характерна для ситуации, когда точка КЗ по отношению ко всем источникам располагается примерно одинаково (например, за большим **общим** сопротивлением). Вторая схема (см. рис. 1.6.1, б) соответствует ситуации, когда группы источников по отношению к точке КЗ находятся в существенно разных условиях (например, когда для части источников КЗ является близким, а для других – удалённым). В особых случаях число ветвей в преобразованной схеме может оказаться и больше двух. Пример составления исходной схемы замещения, расчёт её параметров и порядок сворачивания представлен в Главе 3.

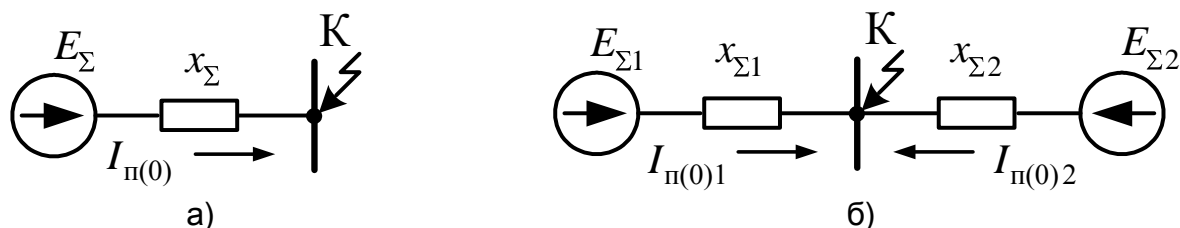


Рис. 1.6.1. Итоговые схемы замещения: однолучевая (а) и двухлучевая (б)

После сворачивания схемы действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени, найденное в относительных единицах при базисных условиях, определяется по выражениям:

– для однолучевой схемы

$$I_{*п(0)} = \frac{E_{\Sigma}}{x_{\Sigma}};$$

– для двухлучевой схемы

$$I_{*п(0)} = I_{*п(0)1} + I_{*п(0)2} = \frac{E_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1}} + \frac{E_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2}},$$

где E_{Σ} , $E_{\Sigma 1}$, $E_{\Sigma 2}$ – результирующие эквивалентные ЭДС соответствующих ветвей (лучей); x_{Σ} , $x_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 2}$ – результирующие эквивалентные индуктивные сопротивления этих ветвей.

Это же значение тока в именованных единицах (кА) находится по выражению

$$I_{п(0)} = I_{*п(0)} \cdot I_{\delta},$$

где $I_{\delta} = S_{\delta} / (\sqrt{3}U_{\delta})$ – базисный ток, кА; S_{δ} и U_{δ} – базисные мощность (МВ·А) и напряжение (кВ).

Если требуется знать распределение тока КЗ по элементам сети, то следует выполнить последовательное обратное разворачивание итоговой схемы замещения к исходной, одновременно определяя токи в появляющихся ветвях.

1.7. Расчёт аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени и ударного тока

Общее представление об аperiodической составляющей тока короткого замыкания и ударном токе было дано в п. 1.1.

В самом простейшем случае, когда расчётная схема имеет **только одну ветвь с последовательно включенными элементами**, аperiodическая составляющая тока КЗ $i_{a(t)}$ (или $i_a(t)$) может быть найдена по формуле (1.1.9), а ударный ток i_y – по формуле (1.1.10) с учётом (1.1.11) – (1.1.13). В этих формулах присутствует постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ (по другому – постоянная времени цепи)

$$T_a = \frac{x_{\Sigma}}{\omega \cdot r_{\Sigma}} = \frac{x_{\Sigma}}{2\pi f \cdot r_{\Sigma}}, \quad (1.7.1)$$

где x_{Σ} и r_{Σ} – результирующие эквивалентные индуктивное и активное сопротивления в цепи схемы замещения, Ом; ω – угловая промышленная частота 1/с; $f = 50$ Гц.

Если исходная или преобразованная схема замещения относительно точки КЗ **содержит только независимые ветви (контура), т. е. имеет радиальный вид**, то при приближённых расчётах аperiodическая составляющая тока КЗ может быть найдена как сумма аperiodических составляющих токов отдельных её ветвей [1, 5]:

$$i_{a(t)} = \sum_{i=1}^m (\sqrt{2} I_{п(0)i} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ai}}}), \quad (1.7.2)$$

где m – число независимых ветвей в схеме замещения; $I_{п(0)i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви схемы замещения, примыкающей к точке КЗ; T_{ai} – эквивалентная постоянная времени i -й ветви схемы замещения;

а ударный ток определяется как

$$i_y = \sum_{i=1}^m (K_{yi} \cdot \sqrt{2} I_{п(0)i}), \quad (1.7.3)$$

где K_{yi} – ударный коэффициент i -й ветви схемы замещения.

Для определения постоянных времени независимых ветвей необходимо составить схему замещения, в которой все элементы исходной расчетной схемы учитывались бы как индуктивными, так и активными сопротивлениями. При этом синхронные генераторы и компенсаторы, синхронные и асинхронные электродвигатели должны быть учтены индуктивным сопротивлением обратной последовательности (для синхронных машин $x_2 \approx 1,22x_d''$ (или, менее точно, $x_2 \approx x_d''$), для асинхронных электродвигателей $x_2 \approx x''$) и сопротивлением обмотки статора постоянному току при нормированной рабочей температуре этой обмотки [1].

Далее для каждой независимой ветви с номером $i = 1, \dots, m$ следует рассчитать постоянные времени T_{ai} по выражению (1.10.1) и ударные коэффициенты K_{yi} по одному из выражений: (1.1.11) (рекомендуется использовать при условии $x_\Sigma/r_\Sigma > 5$), (1.1.12) или (1.1.13).

Если исходная схема замещения **является многоконтурной, причём все источники энергии связаны с расчетной точкой КЗ общим сопротивлением**, то при приближенных расчетах апериодической составляющей тока КЗ допускается считать, что эта составляющая затухает по экспоненциальному закону с некоторой эквивалентной постоянной времени $T_{a.эк}$. Для её нахождения определяют индуктивную и активную составляющие комплексного результирующего эквивалентного сопротивления относительно расчетной точки КЗ, получая их, например, посредством поочередного исключения из схемы всех активных, а затем всех индуктивных сопротивлений [1, 5]:

$$T_{a.эк} = \frac{x_{эк(r=0)}}{2\pi f \cdot r_{эк(x=0)}}, \quad (1.7.4)$$

где $x_{эк(r=0)}$ и $r_{эк(x=0)}$ – результирующие эквивалентные индуктивное и активное сопротивления относительно точки КЗ, определяемые из схем замещения, в которых все элементы учтены, соответственно, только индуктивными или только активными сопротивлениями.

Затем находят эквивалентный ударный ток по одному из выражений (1.1.11) – (1.1.13) с заменой T_a на $T_{a.эк}$. Следует отметить, что применение формулы (1.7.4) может приводить к завышению расчётного ударного тока на (20...30)% по сравнению с действительным [3].

В сетях напряжением выше 1000 В в большинстве случаев выполняется соотношение $r_{\Sigma}/x_{\Sigma} \leq 0,3$, что позволяет **рассчитывать ток КЗ без учёта активных сопротивлений** элементов электроэнергетических систем. Это, с одной стороны, существенно упрощает расчёт, а с другой стороны, предопределяет **использовать лишь приближённые или усреднённые значения T_a** .

Поскольку индуктивные сопротивления всех элементов нам известны, можно приближенно определить их активные сопротивления, зная для каждого элемента схемы характерные соотношения между индуктивной и активной составляющей сопротивления (см. табл. 1.7.1), как это предложено в работе [9].

Наконец, при отсутствии данных для определения активных сопротивлений элементов схемы, а также для упрощения расчетов, при учебном проектировании допускается использовать средние значения постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y , определяя их для характерных ветвей или места КЗ в электрической системе. Необходимая для этого информация приводится, например, в работах [1, 10 – 12] (см. **Приложение 6**, где представлены средние значения отношения x/r , постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y для характерных ветвей, примыкающих к точке КЗ).

При использовании данных из таблиц **Приложения 6** сначала определяют апериодические составляющие токов и ударные токи отдельно для каждой примыкающей к точке КЗ независимой ветви исходной или преобразованной схемы замещения, а затем находят их суммы, согласно формулам (1.7.2) и (1.7.3). В случаях, если все источники отделены от точки КЗ общим сопротивлением, следует определять $i_{a(t)}$ и i_y как для одной ветви, исходя из характерного места расположения точки КЗ в расчётной схеме.

Таблица 1.7.1

Характерные соотношения x/r для элементов электрической системы [8, 9]

Наименование элемента системы	Соотношение x/r
Турбогенераторы мощностью до 100 МВт	15–85
Турбогенераторы мощностью до 100–500 МВт	100–140
Гидрогенераторы с демпферными обмотками	40–60
Гидрогенераторы без демпферных обмоток	60–90
Трансформаторы мощностью 5 – 30 МВА	7–17
Трансформаторы мощностью 60 – 500 МВА	20–50
Реакторы 6–10 кВ с номинальным током до 1000 А	15–70
Реакторы 6–10 кВ с номин. током до 1500 А и выше	40–80
Воздушные линии	2–8
Трехжильные кабели 6–10 кВ с медными и алюминиевыми жилами сечением 3×95 – 3×185 мм ²	0,2–0,8

1.8. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени

Первоначально рассчитывается начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ $I_{п(0)}$ и находится распределение этого тока по ветвям исходной схемы замещения, прежде всего в ветвях с источниками энергии, т.е. определяются токи $I_{п(0)i}$ (здесь i – номер ветви с источником, $i=1, \dots, n$). Используя эту информацию, далее можно определить действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени $I_{п(t)}$. Для этой цели в приближенных практических расчетах применяется **метод типовых кривых** [1, 5].

Метод основан на использовании **кривых изменения во времени отношения действующих значений периодической составляющей тока КЗ генераторов (синхронных компенсаторов) в произвольный и начальный моменты времени**, то есть $\gamma(t) = I_{п(t)} / I_{п(0)}$, **построенных для различной удаленности точки КЗ**.

Электрическую удаленность точки КЗ от синхронной машины принято характеризовать коэффициентом удаленности:

$$\beta = I_{*п(0)(ном)} = \frac{I_{п(0)}}{I_{ном}} = I_{*п(0)} \frac{S_6}{S_{ном}},$$

где $I_{п(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины, приведённое к её номинальному напряжению, кА; $I_{ном}$ – номинальный ток синхронной машины, кА; $I_{*п(0)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от синхронной машины в относительных единицах при базисных условиях; $S_{ном}$ – номинальная мощность синхронной машины, МВ·А; S_6 – базисная мощность, МВ·А.

В настоящее время принято [1], что если $\beta < 2$, то действующее значение периодической составляющей тока КЗ от данного синхронного турбогенератора (компенсатора) не меняется во времени, т.е. $I_{п(t)} = I_{п(0)}$. Такое КЗ считается **удаленным** от этой синхронной машины.

Для эквивалентной системы действующее значение периодической составляющей тока КЗ не меняется во времени, т.е. $I_{п(t)C} = I_{п(0)C} = \text{const}$.

Для гидрогенераторов используют типовые кривые только при небольшой удаленности, когда $\beta > 3$ [1]. В противном случае (при $\beta \leq 3$) $I_{п(t)} = I_{п(0)}$.

Типовые кривые, построенные для турбогенераторов различной мощности и с разными типами систем возбуждения, можно найти, например, в работах [1, 5], часть из которых представлены в **Приложении 5**.

Если в схеме замещения имеется n источников электрической энергии, то для каждого из них определяется коэффициент удаленности:

$$\beta_i = I_{*п(0)i} \frac{S_6}{S_{ном.i}}, \quad (1.8.1)$$

где i – номер (или условное обозначение) источника; $I_{*п(0)i}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от i -го источника, выраженное в относительных единицах при базисных условиях; $S_{ном.i}$ – номинальная мощность источника с номером i , МВ·А; S_6 – базисная мощность, МВ·А.

По найденным значениям β_i с помощью типовых кривых (см., например, **Приложение 5**) для каждого источника в заданный момент времени t определяют коэффициенты $\gamma_{(t)i}$ ($i = 1, \dots, n$).

Затем, на основании метода наложения, находят искомое действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени t :

$$I_{п(t)} = I_6 \cdot \sum_{i=1}^n (\gamma_{(t)i} \cdot I_{*п(0)i}), \quad (1.8.2)$$

где $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}$ – базисный ток, кА.

Для источников, у которых действующее значение периодической составляющей тока КЗ не меняется (т.е. $I_{п(t)i} = I_{п(0)i} = \text{const}$), следует принимать $\gamma_{(t)i} = 1$.

1.9. Учет влияния электродвигателей при расчете тока трехфазного короткого замыкания

При близких коротких замыканиях напряжение на выводах электродвигателей резко падает и может оказаться меньше их ЭДС. Поскольку двигатели по инерции продолжают вращаться, то они на короткое время переходят в режим генератора и осуществляют подпитку током места повреждения.

При расчете максимального начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ необходимо учитывать подпитку от синхронных и асинхронных двигателей мощностью 100 кВт и более, если эти электродвигатели не отделены от точки КЗ силовыми трансформаторами или токоограничивающими реакторами [1, 5].

Синхронные и асинхронные двигатели должны быть введены в схему замещения своими сверхпереходными ЭДС и сопротивлениями (см. **Приложение 1**).

Синхронные двигатели.

Если в предшествующем короткому замыканию режиме электродвигатели работали с перевозбуждением, то сверхпереходную ЭДС следует определять по формуле (1.5.1), а если с недовозбуждением – то по формуле (1.5.2) (см. также **Приложение 3**).

При отсутствии точных сведений о параметрах предшествующего режима можно принимать, что до КЗ электродвигатели работали в номинальном режиме. Тогда для расчета сверхпереходной ЭДС в относительных единицах удобно воспользоваться формулой (1.5.8).

Величину сверхпереходного сопротивления по продольной оси $x''_{*d(ном)}$, выраженную в относительных номинальных единицах, по известному типу двигателя можно найти в справочниках [12, 13], каталогах или паспорте.

Асинхронные двигатели.

Для асинхронных двигателей фазное значение сверхпереходной ЭДС следует определять через параметры предшествующего режима $U_{\Phi 0}$ (кВ), I_0 (кА), $\cos \varphi_0$ по формуле:

$$E''_{\Phi} = \sqrt{(U_{\Phi 0} - I_0 \cdot x'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_0 \cdot x'' \cdot \cos \varphi_0)^2}, \quad (1.9.1)$$

причем сверхпереходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя x'' (Ом) допустимо находить по выражению:

$$x'' = \frac{1}{K_{\Pi}} \cdot \frac{U_{ном}^2 \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta \% / 100\%}{P_{ном}}, \quad (1.9.2)$$

где K_{Π} – кратность пускового тока асинхронного двигателя; $U_{ном}$ – номинальное напряжение, кВ; $\cos \varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности электродвигателя; η – КПД электродвигателя, %; $P_{ном}$ – номинальная (механическая на валу) мощность электродвигателя, МВт.

При использовании системы относительных единиц сверхпереходные ЭДС и сопротивления асинхронных двигателей, приведённые к номинальным условиям, удобно определять по следующим формулам:

$$E''_{*} = E''_{*(ном)} = \sqrt{(1 - x''_{*(ном)} \cdot \sin \varphi_{ном})^2 + (x''_{*(ном)} \cdot \cos \varphi_{ном})^2}, \quad (1.9.3)$$

$$x''_{*(ном)} = \frac{1}{K_{\Pi}}. \quad (1.9.4)$$

При отсутствии точных данных о типе и параметрах электродвигателей для приближенного определения их сверхпереходных ЭДС и сопротивлений можно воспользоваться табл. 1.5.1.

Комплексная (обобщенная) нагрузка.

При наличии комплексной нагрузки следует учитывать её влияние, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5% от тока КЗ, определенного без учёта нагрузки [1]. Подробное изложение методики учёта комплексной нагрузки можно найти в работе [5].

В приближенных расчетах, при необходимости, нагрузку можно учесть обобщенным источником с параметрами:

$$E = E_{* (\text{НОМ})} = 0,85; \quad x_{* (\text{НОМ})} = 0,35.$$

Если **сверхпереходные ЭДС и сопротивления** электродвигателей **определялись в именованных единицах** по формулам (1.5.1), (1.5.2), (1.9.1) и (1.9.2), то для использования в схеме замещения **найденные значения должны быть приведены к основной (базисной) ступени напряжения** (см. п. 1.3).

В том случае, если **расчет ведется в относительных единицах при средних коэффициентах трансформации** (рекомендуется для выполнения курсовой работы), **приведенные к базисным условиям сопротивления находят по формуле** (см. также Приложение 4):

$$x''_{*} = x''_{* (\text{НОМ})} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}}, \quad (1.9.5)$$

где $x''_{* (\text{НОМ})}$ – сверхпереходное сопротивление, найденное в относительных номинальных единицах; $S_{\text{б}}$ – базисная мощность, МВ·А; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная (электрическая) мощность электродвигателя (или нагрузки), МВ·А.

Для асинхронного двигателя его полная номинальная мощность

$$S_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta \% / 100 \%}.$$

После того, как электродвигатели вместе с питающими кабелями внесены в схему замещения, производится расчет начального действующего значения периодической составляющей тока КЗ и находится распределение этого тока по ветвям исходной схемы замещения, в том числе и по ветвям с электродвигателями.

Заметим, что кабель в схеме замещения можно не учитывать, если его полное сопротивление не превышает 10...20% от сопротивления двигателя [6].

В **радиальных схемах** достаточно просто учесть влияние электродвигателей на действующее значение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени. Для этой цели необходимо использовать специальные типовые кривые, построенные для синхронных и асинхронных двигателей (см. Приложение 5, рис. П5.3 и П5.4).

По найденным ранее действующим значениям периодических составляющих токов КЗ для начального момента времени от синхронного $I_{\text{п(0)СД}}$ (кА) и асинхронного $I_{\text{п(0)АД}}$ (кА) двигателей, а также используя значения номинальных токов этих двигателей $I_{\text{НОМ.СД}}$ (кА) и $I_{\text{НОМ.АД}}$ (кА), определяют коэффициенты удаленности электродвигателей от точки КЗ:

– для синхронного двигателя

$$\beta_{\text{СД}} = \frac{I_{\text{п(0)СД}}}{I_{\text{НОМ.СД}}}; \quad (1.9.6)$$

– для асинхронного двигателя

$$\beta_{\text{АД}} = \frac{I_{\text{п(0)АД}}}{I_{\text{ном.АД}}} . \quad (1.9.7)$$

Заметим, что если $\beta < 2$, то для такого электродвигателя КЗ считается **удаленным**, а ток двигателя в подпитке места повреждения не учитывается.

Далее, для заданного момента времени t с помощью типовых кривых, соответствующих виду двигателей, определяют коэффициенты для синхронного двигателя $\gamma_{(t)\text{СД}}$ и асинхронного двигателя $\gamma_{(t)\text{АД}}$.

Затем находят действующие значения периодических составляющих тока КЗ от двигателей в момент времени t :

– для синхронного двигателя

$$I_{\text{п(т)СД}} = \gamma_{(t)\text{СД}} \cdot I_{\text{п(0)СД}} ; \quad (1.9.8)$$

– для асинхронного двигателя

$$I_{\text{п(т)АД}} = \gamma_{(t)\text{АД}} \cdot I_{\text{п(0)АД}} . \quad (1.9.9)$$

Найденные таким образом токи $I_{\text{п(т)СД}}$ и $I_{\text{п(т)АД}}$ необходимо учесть при определении действующего значения периодической составляющей тока КЗ, добавив их к токам от других источников.

Расчет апериодических составляющих тока КЗ и ударного тока от электродвигателей производится обычным образом в соответствии с порядком, изложенным в п. 1.7. При отсутствии достоверных данных о величинах постоянных времени спада апериодических составляющих тока КЗ в цепях с электродвигателями и ударных коэффициентах можно пользоваться информацией из работы [12], часть которой представлена в табл. 1.9.1.

Таблица 1.9.1

Средние значения отношения x/r , постоянной времени T_a и ударного коэффициента K_y для высоковольтных электродвигателей

Электродвигатель	x / r	$T_a, \text{с}$	K_y
Асинхронный двигатель 6/10 кВ	13	0,04	1,6
Синхронный двигатель 6/10 кВ мощностью:			
до 1,6 МВт	16	0,05	1,8
2 – 4 МВт	22	0,07	1,9
выше 4 МВт	32	0,1	1,9

Пример расчета тока короткого замыкания с учетом подпитки от электродвигателей

Рассчитаем ток короткого замыкания на шинах понизительной подстанции, подключенной к эквивалентной системе С (рис. 1.9.1).

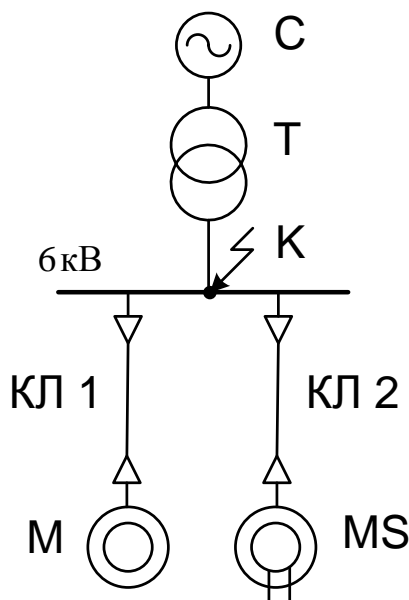


Рис. 1.9.1. Расчетная схема

В качестве исходной информации будем использовать следующие данные.

Эквивалентная система С бесконечной мощности. Трансформатор Т типа ТДН-16000/110/6 ($S_{\text{ном}} = 16 \text{ МВА}$; $U_{\text{ВН ном}} = 115 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН ном}} = 6,6 \text{ кВ}$; $u_k = 10,5\%$). Асинхронный двигатель М типа А-13-59-6 ($P_{\text{ном}} = 800 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $K_{\Pi} = 5,3$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$; $\eta = 93\%$). Синхронный двигатель MS типа СДН-2-17-54-10 ($P_{\text{ном}} = 2000 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$; $x''_{*d(\text{ном})} = 0,207$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$). Кабельные линии КЛ1 ($l = 200 \text{ м}$; $r_{\text{пог}} = 0,326 \text{ Ом/км}$; $x_{\text{пог}} = 0,078 \text{ Ом/км}$) и КЛ2 ($l = 350 \text{ м}$; $r_{\text{пог}} = 0,206 \text{ Ом/км}$; $x_{\text{пог}} = 0,074 \text{ Ом/км}$).

Выполним расчет в относительных единицах при $S_{\text{б}} = 100 \text{ МВА}$, $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.К}} = 6,3 \text{ кВ}$ и базисном токе

$$I_{\text{б}} = \frac{S_{\text{б}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{б}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}.$$

Составим схему замещения (рис. 1.9.2, а) и определим её параметры.

Эквивалентная система С бесконечной мощности, поэтому её сопротивление $x_{\text{С}} = 0$. Согласно формуле (1.6.6) имеем $E_1 = E_{\text{С}} = 1$.

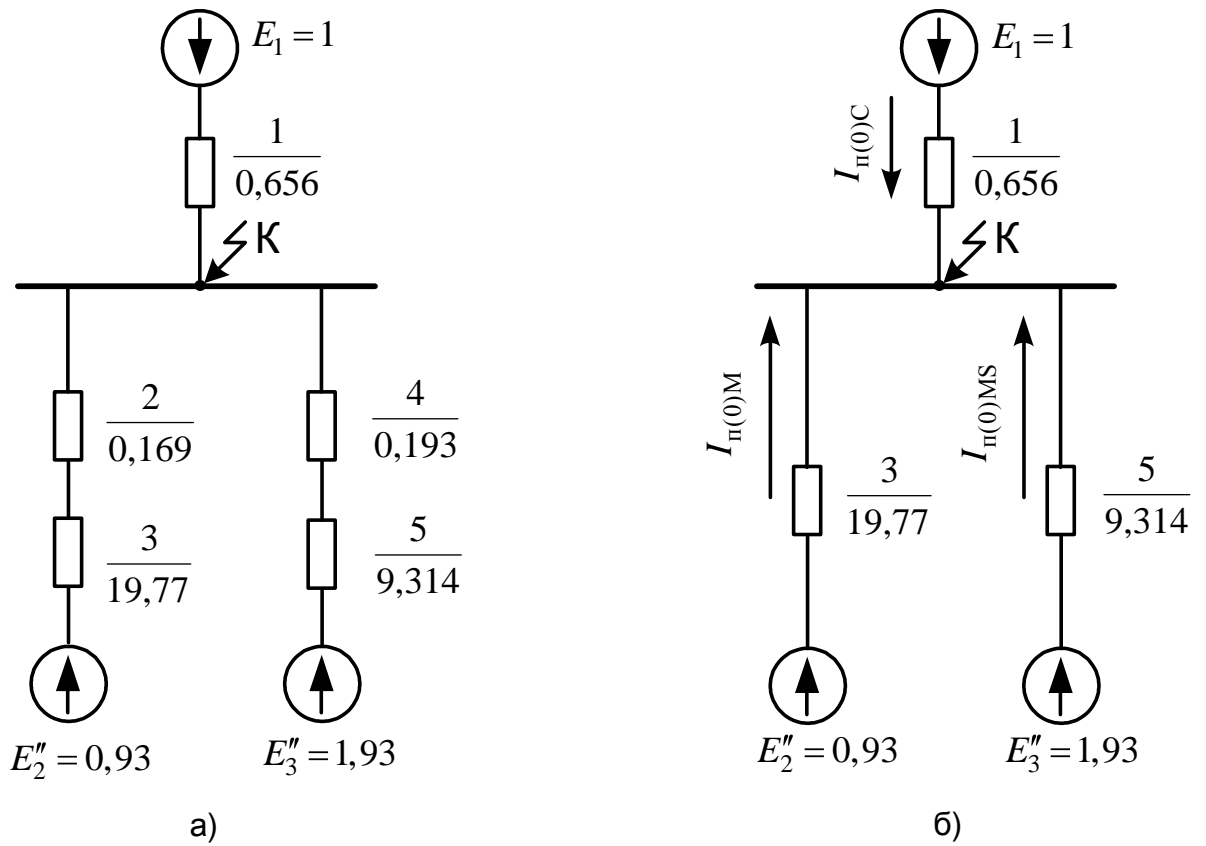


Рис. 1.9.2. Схемы замещения: исходная (а) и упрощенная (б)

Для двухобмоточного трансформатора Т сопротивление найдем по формуле (1.4.10):

$$x_1 = x_T = \frac{u_k \%}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{10,5\%}{100\%} \cdot \frac{100}{16} = 0,656.$$

Для кабельных линий находим индуктивные и активные сопротивления по формулам (1.5.14) и (1.5.15), а также полные сопротивления:

$$x_2 = x_{\text{КЛ1}} = x_{\text{пор}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,078 \cdot 0,2 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,039;$$

$$r_2 = r_{\text{КЛ1}} = r_{\text{пор}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{cp}}^2} = 0,326 \cdot 0,2 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,164;$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + r_2^2} = \sqrt{0,039^2 + 0,164^2} = 0,169;$$

$$x_3 = x_{\text{КЛ2}} = 0,074 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,065;$$

$$r_3 = r_{\text{КЛ2}} = 0,206 \cdot 0,35 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,182;$$

$$z_3 = \sqrt{x_3^2 + r_3^2} = \sqrt{0,065^2 + 0,182^2} = 0,193.$$

Для асинхронного двигателя М найдем приведенное к базисным условиям сверхпереходное сопротивление с использованием формул (1.9.4) и (1.9.5):

$$x_{*(\text{НОМ})}'' = \frac{1}{K_{\Pi}} = \frac{1}{5,3} = 0,189;$$

$$x_3 = x_M'' = x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / (\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta\% / 100\%)} =$$

$$= 0,189 \cdot \frac{100}{0,8 / (0,9 \cdot 93\% / 100\%)} = 19,77;$$

и определим сверхпереходную ЭДС по формуле (1.9.3):

$$E_2'' = E_M'' = \sqrt{(1 - x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 - 0,189 \cdot 0,436)^2 + (0,189 \cdot 0,9)^2} = 0,93$$

(здесь $\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos 0,9 = 25,84^\circ$ и $\sin \varphi_{\text{НОМ}} = \sin 25,84^\circ = 0,436$).

Для синхронного двигателя MS найдем приведенное к базисным условиям сверхпереходное сопротивление по формуле (1.5.9):

$$x_5 = x_{\text{MS}}'' = x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}} / \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = 0,207 \cdot \frac{100}{2 / 0,9} = 9,315;$$

и определим сверхпереходную ЭДС по формуле (1.5.8):

$$E_3'' = E_{\text{MS}}'' = \sqrt{(1 + x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_{\text{НОМ}})^2 + (x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}})^2} =$$

$$= \sqrt{(1 + 0,207 \cdot 0,436)^2 + (0,207 \cdot 0,9)^2} = 1,106.$$

Поскольку $z_2 / x_3 = 0,169 / 19,77 = 0,008 < 0,1$ и $z_3 / x_5 = 0,193 / 9,315 = 0,021 < 0,1$, то при незначительной погрешности можно не учитывать сопротивление кабелей. Поэтому упрощенная схема замещения примет вид, представленный на рис. 1.9.2, б.

Определим начальные действующие значения периодических составляющих тока КЗ от каждого из источников:

$$I_{\text{п(0)C}} = I_6 \frac{E_1}{x_1} = 9,16 \cdot \frac{1}{0,656} = 13,96 \text{ кА};$$

$$I_{\text{п(0)M}} = I_6 \frac{E_2}{x_3} = 9,16 \cdot \frac{0,93}{19,77} = 0,43 \text{ кА};$$

$$I_{\text{п(0)MS}} = I_6 \frac{E_3}{x_5} = 9,16 \cdot \frac{1,106}{9,315} = 1,09 \text{ кА};$$

найдем суммарное значение этих токов

$$I_{п(0)} = I_{п(0)C} + I_{п(0)M} + I_{п(0)MS} = 13,96 + 0,43 + 1,09 = 15,48 \text{ кА};$$

и оценим долю тока от электродвигателей:

$$\frac{I_{п(0)M} + I_{п(0)MS}}{I_{п(0)}} \cdot 100 = \frac{0,43 + 1,09}{15,48} \cdot 100 = 9,82 \text{ \%}.$$

Рассчитаем коэффициенты удаленности для электродвигателей по формулам (1.9.7) и (1.9.6), соответственно:

$$\beta_M = \frac{I_{п(0)M}}{I_{ном.M}} = \frac{I_{п(0)M}}{P_{ном} / (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot U_{ном} \cdot \eta)} = \frac{0,43}{0,8 / (\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 6 \cdot 0,93)} \approx 4,7;$$

$$\beta_{MS} = \frac{I_{п(0)MS}}{I_{ном.MS}} = \frac{I_{п(0)MS}}{P_{ном} / (\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot U_{ном})} = \frac{1,09}{2 / (3 \cdot 0,9 \cdot 6)} \approx 5,1.$$

Используя эти коэффициенты, по типовым кривым для электродвигателей (см. **Приложение 5**, рис. П5.3 и П5.4) найдем при $t = 0,05$ с коэффициенты

$$\gamma_{(0,05)M} = 0,44 \quad \text{и} \quad \gamma_{(0,05)MS} = 0,68$$

и определим действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени $t = 0,05$ с :

$$\begin{aligned} I_{п(0,05)} &= I_{п(0)C} + \gamma_{(0,05)M} \cdot I_{п(0)M} + \gamma_{(0,05)MS} \cdot I_{п(0)MS} = \\ &= 13,96 + 0,44 \cdot 0,43 + 0,68 \cdot 1,09 = 14,89 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Примем следующие параметры для ветвей источников электроэнергии:

- для системы $T_{aC} = 0,06$ с , $K_{yC} = 1,85$ (см. **Приложение 6**, табл. П6.1, случай **КЗ на присоединении вторичного напряжения подстанции**);
- для асинхронного двигателя $T_{aM} = 0,04$ с , $K_{yM} = 1,6$ (см. табл. 1.9.1);
- для синхронного двигателя $T_{aMS} = 0,07$ с , $K_{yMS} = 1,9$ (см. табл. 1.9.1).

Тогда выражение для апериодической составляющей тока в точке КЗ для произвольного момента времени примет вид:

$$\begin{aligned} i_{a(t)} &= \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aC}}} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)M} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aM}}} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)MS} \cdot e^{-\frac{t}{T_{aMS}}} = \\ &= \sqrt{2} \cdot (13,96 \cdot e^{-\frac{t}{0,06}} + 0,43 \cdot e^{-\frac{t}{0,04}} + 1,09 \cdot e^{-\frac{t}{0,07}}), \end{aligned}$$

а ударный ток в месте КЗ будет равен:

$$\begin{aligned} i_y &= K_{yC} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} + K_{yM} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п(0)M} + K_{yMS} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п(0)MS} = \\ &= \sqrt{2} \cdot (1,85 \cdot 13,96 + 1,6 \cdot 0,43 + 1,9 \cdot 1,09) = 40,43 \text{ кА}. \end{aligned}$$

Мы завершили расчет тока КЗ на шинах 6 кВ понизительной подстанции с учетом подпитки от электродвигателей. При этом доля тока от двигателей составила около 10%.

1.10. Особенности расчета токов короткого замыкания в системах собственных нужд электростанций

Особым способом учитывают подпитку места короткого замыкания от двигателей в системах собственных нужд электростанций, где к шинам питания оказывается подключенным достаточно большое количество электродвигателей разных типов и мощностей. При оценке их результирующего влияния на ток КЗ целесообразно применять групповой учёт двигателей [6, 10].

Для этого все двигатели, участвующие в подпитке точки КЗ, заменяют эквивалентным двигателем с суммарной номинальной мощностью

$$P_{\Sigma} = \sum P_{\text{ном.}i},$$

где $P_{\text{ном.}i}$ – номинальная мощность двигателя с номером i , подключенного к секции собственных нужд, на которых рассчитывается КЗ, МВт.

Такой *эквивалентный двигатель* имеет следующие параметры:

КПД $\eta_{\text{д}}$	0,94;
Коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{д}}$	0,87;
Кратность пускового тока $K_{\text{п.д}}$	5,6;
Постоянная времени затухания периодической составляющей тока $T'_{\text{д}}$, с	0,07;
Постоянная времени затухания апериодической составляющей тока $T_{\text{ад}}$, с	0,04;
Ударный коэффициент $K_{\text{уд}}$	1,65.

При определении P_{Σ} учитывают двигатели, которые **электрически соединены** с местом КЗ. Так, если питание секции осуществляется через рабочий трансформатор, должны быть учтены только те двигатели, которые непосредственно подключены к данной секции. При питании от резервного трансформатора необходимо учитывать двигатели, подключенные к шинам данной секции, а также к другим секциям, связанным с данной по магистрали резервного питания.

Если точный состав электродвигателей собственных нужд неизвестен (например, на начальной стадии проектирования), то для приближенной оценки можно принимать при питании от рабочего трансформатора

$$P_{\Sigma} \approx S_{\text{ТСН}};$$

при питании от резервного трансформатора

$$P_{\Sigma} \approx 1,25 S_{\text{РТСН}}.$$

Здесь $S_{ТСН}$ – мощность рабочего трансформатора собственных нужд, МВ·А; $S_{РТСН}$ – мощность резервного трансформатора собственных нужд, МВ·А; (если трансформаторы собственных нужд имеют расщепленные обмотки, то значения $S_{ТСН}$ и $S_{РТСН}$ следует уменьшить в 2 раза).

Рекомендуется следующий порядок расчета.

1. Обычным образом составляется схема замещения для определения тока от внешних источников (системы); сворачивается относительно шин секции собственных нужд, на которой рассчитывается КЗ; определяются результирующие эквивалентные ЭДС $E_{\Sigma C}$ и сопротивление $x_{\Sigma C}$, а также начальное значение периодической составляющей тока КЗ от системы $I_{п(0)C}$, кА.

Заметим, что определяющим в величине сопротивления $x_{\Sigma C}$ является сопротивление питающего секцию трансформатора собственных нужд из-за его относительно небольшой мощности по сравнению с другими элементами расчетной схемы. Поэтому, с целью упрощения, все элементы электроэнергетической системы до трансформатора собственных нужд можно замещать эквивалентной системой с нулевым сопротивлением и $E_{\Sigma C} = 1$. При этом расчетная величина тока $I_{п(0)C}$ получается несколько завышенной, но в пределах допустимой для инженерных расчетов точности.

2. Определяется суммарная мощность всех непосредственно связанных с точкой КЗ электродвигателей P_{Σ} (МВт) с учетом рассмотренных выше рекомендаций и начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от электродвигателей, кА:

$$I_{п(0)Д} = K_{п.Д} \cdot \frac{P_{\Sigma}}{\eta_{Д} \cdot \cos \varphi_{Д} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}} = 4,0 \cdot \frac{P_{\Sigma}}{U_{ном}},$$

где $U_{ном}$ – номинальное напряжение двигателей, кВ.

3. Находим начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ, кА:

$$I_{п(0)} = I_{п(0)C} + I_{п(0)Д}.$$

4. Для заданного момента времени t вычисляется действующее значение периодической составляющей тока КЗ, кА:

$$I_{п(t)} = I_{п(0)C} + I_{п(0)Д} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{Д}}}.$$

5. Определяется апериодическая составляющая тока КЗ, кА:

$$i_{a(t)} = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ac}}} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)Д} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ад}}};$$

и ударный ток, кА:

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{п(0)C} \cdot K_{yC} + \sqrt{2} \cdot I_{п(0)Д} \cdot K_{yД}.$$

Средние значения T_{aC} и K_{yC} можно найти с помощью табл. 1.10.1, которая составлена на основании информации из работы [10].

Таблица 1.10.1

$S_{обм},$ МВ·А	5	10	15	20	25	30	40	60	80
$T_{aC},$ с	0,043	0,048	0,052	0,056	0,059	0,063	0,068	0,076	0,082
K_{yC}	1,81	1,82	1,83	1,84	1,845	1,85	1,86	1,88	1,895

Примечание. $S_{обм}$ – мощность обмотки трансформатора, от которой запитана секция собственных нужд, где рассчитывается ток короткого замыкания.

Глава 2. РАСЧЁТ ТОКА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

В настоящее время основным рекомендуемым способом расчёта токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях является **метод симметричных составляющих**. Его применение позволяет избежать составления и решения громоздких уравнений для каждой из фаз электрической системы, находящихся в разных (несимметричных) условиях. Большая часть расчётов проводится только для одной фазы, подобно тому, как это делается при расчёте трёхфазного (симметричного) КЗ. Однако при этом приходится составлять и сворачивать относительно места КЗ три независимые схемы замещения: прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Следует учесть, что применение данного метода возможно лишь при допущении, что в сети действуют только основные гармоники токов и напряжений. Также полагается полная симметрия фаз всех элементов электрической системы, за исключением лишь места повреждения.

2.1. Метод симметричных составляющих

Основные положения метода симметричных составляющих наиболее полно изложены в работах [2–4, 6]. Суть этих положений состоит в следующем.

1. Любую несимметричную трёхфазную систему векторов токов, напряжений и т. д. можно представить в виде суммы трех симметричных, называемых системами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Эти системы получили название «*симметричные составляющие*», поскольку в пределах каждой из последовательностей длины векторов одинаковы, а сами векторы сдвинуты по отношению друг к другу на одинаковый угол.

Так, токи в фазах A , B и C могут быть выражены через сумму токов прямой, обратной и нулевой последовательностей следующим образом:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} ; \quad (2.1.1)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} ; \quad (2.1.2)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} . \quad (2.1.3)$$

При этом полагается, что в несимметричном режиме все три симметричные составляющие токов фаз **одновременно** циркулируют в рассматриваемой цепи.

Система токов **прямой последовательности** (рис. 2.1.1, а) представляет собой три одинаковых по величине вектора, расположенных под углом 120° относительно друг друга, вращающихся против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с так, что соблюдается **прямое** чередование фаз: $A - B - C$.

Векторы токов **обратной последовательности** (рис. 2.1.1, б) равны по величине, сдвинуты относительно друг друга на 120° и вращаются против часовой стрелки. При этом соблюдается **обратное** чередование фаз: $A - C - B$.

Векторы токов **нулевой последовательности** (рис. 2.1.1, в) одинаковые по направлению и по величине и также вращаются против часовой стрелки.

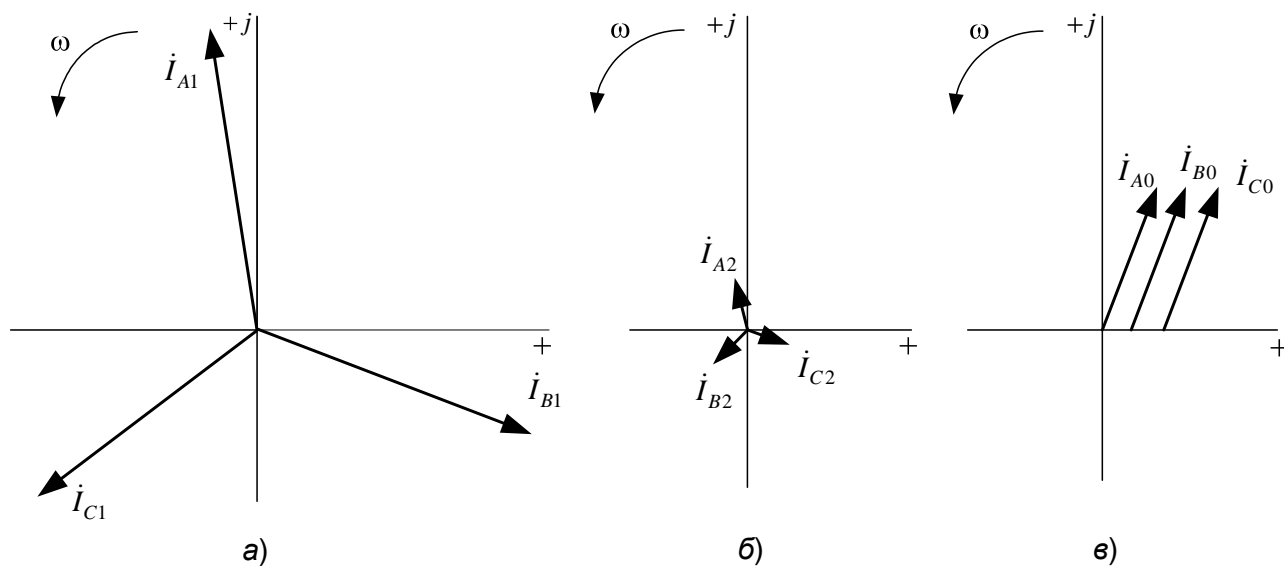


Рис. 2.1.1. Системы токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Полагая известными параметры симметричных составляющих (см. рис. 2.1.1), по выражениям (2.1.1) – (2.1.3) построим векторную диаграмму фазных токов (рис. 2.1.2), иллюстрирующую несимметричный режим.

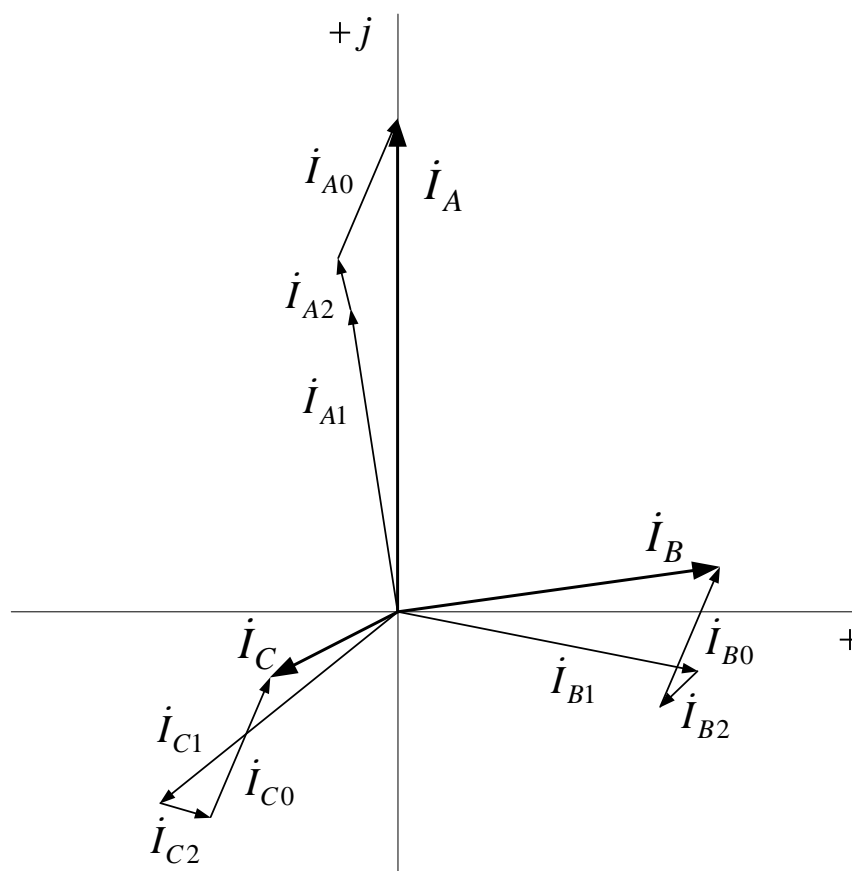


Рис. 2.1.2. Векторная диаграмма токов несимметричного режима

Векторы задаются комплексными числами. Соотношения между фазными значениями в симметричной системе устанавливаются с помощью **поворотного множителя** $\mathbf{a} = e^{j120^\circ}$. Поворотный множитель является вектором, модуль (длина) которого равен единице, а аргумент – 120° . Если некоторый вектор, например \dot{I}_{A1} , умножить на \mathbf{a} , то это означает поворот \dot{I}_{A1} на 120° против часовой стрелки. Если же умножить на \mathbf{a}^2 , то это означает поворот \dot{I}_{A1} на 240° против часовой стрелки. Как и любое комплексное число, поворотный множитель \mathbf{a} можно представить в показательной, тригонометрической и алгебраической формах:

$$\mathbf{a} = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0,5 + j0,867; \quad (2.1.4)$$

$$\mathbf{a}^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -0,5 - j0,867. \quad (2.1.5)$$

Поскольку у прямой и обратной последовательностей в пределах каждой системы токи фаз равны по величине и отличаются только по направлению, симметричные составляющие токов этих последовательностей в фазах B и C можно выразить через ток фазы A соответствующей последовательности, используя поворотный множитель \mathbf{a} :

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}_{A1} \cdot e^{j240^\circ} = \mathbf{a}^2 \dot{I}_{A1}; \quad \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{A1} \cdot e^{j120^\circ} = \mathbf{a} \dot{I}_{A1}; \quad (2.1.6)$$

$$\dot{I}_{B2} = \dot{I}_{A2} \cdot e^{j120^\circ} = \mathbf{a} \dot{I}_{A2}; \quad \dot{I}_{C2} = \dot{I}_{A2} \cdot e^{j240^\circ} = \mathbf{a}^2 \dot{I}_{A2}. \quad (2.1.7)$$

Для нахождения токов нулевой последовательности в фазах B и C поворотный множитель не используется, так как по условию векторы нулевой последовательности всех трех фаз совпадают как по величине, так и по направлению:

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}. \quad (2.1.8)$$

Подставив соотношения (2.1.6) – (2.1.8) в (2.1.2) и (2.1.3), получим:

$$\dot{I}_B = \mathbf{a}^2 \dot{I}_{A1} + \mathbf{a} \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \quad (2.1.9)$$

$$\dot{I}_C = \mathbf{a} \dot{I}_{A1} + \mathbf{a}^2 \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}. \quad (2.1.10)$$

Если, наоборот, известны векторы фазных токов \dot{I}_A , \dot{I}_B и \dot{I}_C , то совместное решение уравнений (2.1.1), (2.1.9) и (2.1.10) позволяет определить для тока фазы A значения симметричных составляющих:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \mathbf{a} \dot{I}_B + \mathbf{a}^2 \dot{I}_C); \quad (2.1.11)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \mathbf{a}^2 \dot{I}_B + \mathbf{a} \dot{I}_C); \quad (2.1.12)$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (2.1.13)$$

Отметим, что подобные соотношения справедливы и для напряжений:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \quad (2.1.14)$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \quad (2.1.15)$$

$$\dot{U}_C = a \dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \quad (2.1.16)$$

$$\dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C); \quad (2.1.17)$$

$$\dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C); \quad (2.1.18)$$

$$\dot{U}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C). \quad (2.1.19)$$

2. В трёхфазной цепи в месте нарушения симметрии появляются напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Для их учёта в схему замещения *в местах повреждения необходимо вводить источники напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей*. Поэтому принято считать, что токи соответствующих последовательностей циркулируют в схеме под действием именно этих источников.

3. Токи и напряжения каждой из последовательностей могут определяться независимо от других последовательностей.

Поэтому и *рассматриваются три независимые схемы замещения*, построенные в отдельности *для каждой из последовательностей, содержащие в месте повреждения только один источник напряжения соответствующей последовательности*. При этом для токов и напряжений в каждой из схем выполняются законы Ома и Кирхгофа.

Поскольку в пределах одной последовательности симметрия схемы сохраняется, то *составляются однолинейные (однофазные) схемы замещения*.

4. Сопротивления элементов электрической системы для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в общем случае неодинаковы. ЭДС синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей симметричны, то есть имеют только прямую последовательность и не содержат обратной и нулевой составляющих.

В связи с этим, *схемы замещения отдельных последовательностей, а значит и их результирующие сопротивления могут различаться. ЭДС источников электроэнергии участвуют только в схемах замещения прямой последовательности*.

На основании положений, изложенных в пп. 2 – 4, строятся три однолинейные (однофазные) схемы замещения для каждой из последовательностей. После их сворачивания относительно места повреждения получаются три **результирую-**

щие эквивалентные схемы замещения (рис. 2.1.3), для которых справедливы следующие уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{к1} = \dot{E}_{1\Sigma} - j \cdot \dot{I}_{к1} x_{1\Sigma}; \quad (2.1.20)$$

$$\dot{U}_{к2} = 0 - j \cdot \dot{I}_{к2} x_{2\Sigma}; \quad (2.1.21)$$

$$\dot{U}_{к0} = 0 - j \cdot \dot{I}_{к0} x_{0\Sigma}. \quad (2.1.22)$$

Здесь $\dot{U}_{к1}, \dot{U}_{к2}, \dot{U}_{к0}$ – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения (поскольку схемы замещения составляются для одной фазы, то эти напряжения обычно принимают равными соответствующим симметричным составляющим напряжения фазы A); $\dot{I}_{к1}, \dot{I}_{к2}, \dot{I}_{к0}$ – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте повреждения (в однолинейных схемах их обычно принимают равными соответствующим симметричным составляющим тока фазы A); $x_{1\Sigma}, x_{2\Sigma}, x_{0\Sigma}$ – результирующие эквивалентные индуктивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей (в более общем случае вместо них можно использовать полные сопротивления, однако в большинстве практических расчётов активными и емкостными сопротивлениями пренебрегают ввиду их малости); $\dot{E}_{1\Sigma}$ – результирующая эквивалентная ЭДС прямой последовательности (обычно принимается равной ЭДС фазы A).

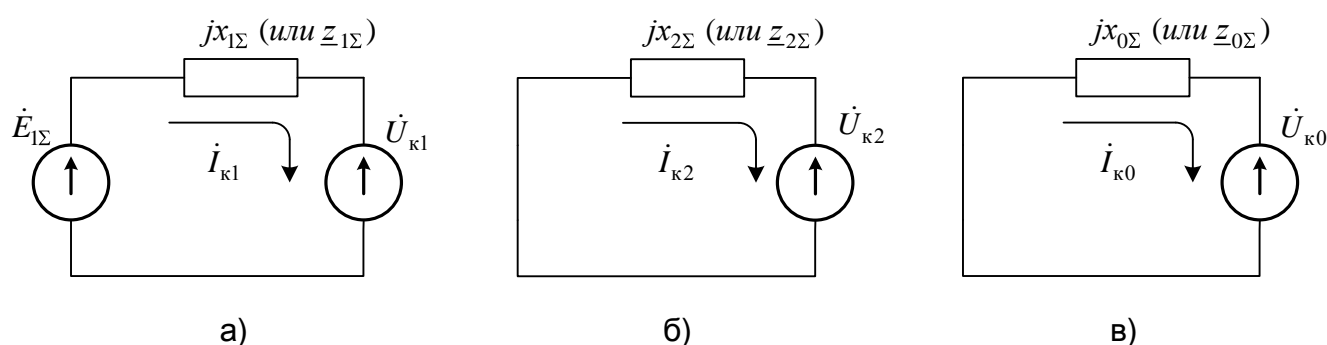


Рис. 2.1.3. Результирующие эквивалентные схемы замещения прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

5. Связь между системами прямой, обратной и нулевой последовательностей определяется видом короткого замыкания и устанавливается на основании так называемых граничных условий.

Граничными условиями принято называть соотношения между токами и напряжениями фаз в месте повреждения, характерные для того или иного вида КЗ.

В зависимости от вида КЗ (его граничных условий) с помощью математических преобразований исходных уравнений могут быть получены уравнения, позволяющие построить **комплексную схему замещения**, в которой определённым образом соединяются схемы замещения отдельных последовательностей [2–4, 6]. По результатам преобразований (или с помощью комплексных схем замещения), в частности, сформулировано общее для всех видов КЗ **правило эквивалентно-**

сти прямой последовательности (см. п. 2.3) для формального *определения* при конкретном виде КЗ **тока прямой последовательности в точке повреждения**.

Используя уже найденный ток прямой последовательности, можно определить остальные симметричные составляющие тока и напряжения в месте повреждения, а затем по выражениям (2.1.1), (2.1.9), (2.1.10), (2.1.14) – (2.1.16) найти несимметричные токи и напряжения для каждой из фаз.

2.2. Виды несимметричных коротких замыканий и их анализ

Рассмотрим применение метода симметричных составляющих для трёх простейших видов несимметричных коротких замыканий: однофазного, двухфазного и двухфазного на землю. При анализе будем считать, что короткие замыкания металлические, то есть сопротивление дуги в месте повреждения равняется нулю. Будем полагать известными результирующие эквивалентные индуктивные сопротивления схем замещения прямой $x_{1\Sigma}$, обратной $x_{2\Sigma}$ и нулевой $x_{0\Sigma}$ последовательностей, а также результирующую эквивалентную ЭДС прямой последовательности $E_{1\Sigma}$. Активными сопротивлениями в виду их малости пренебрегаем.

При любом несимметричном КЗ одна из фаз всегда находится в условиях, отличных от условий двух других. Такую фазу называют *особой*. В её качестве будем рассматривать фазу *A*.

Однофазное короткое замыкание

Рассмотрим короткое замыкание фазы *A* на землю (рис. 2.2.1), для которого характерны следующие граничные условия:

$$\dot{U}_{кА}^{(1)} = 0; \quad (2.2.1)$$

$$\dot{I}_{кВ}^{(1)} = 0; \quad (2.2.2)$$

$$\dot{I}_{кС}^{(1)} = 0. \quad (2.2.3)$$

Здесь индекс «⁽¹⁾» показывает вид КЗ (однофазное), а индекс «к», что величина относится к точке КЗ. В ходе преобразований, для краткости, оба индекса можно опускать, если это не вызывает разночтений.

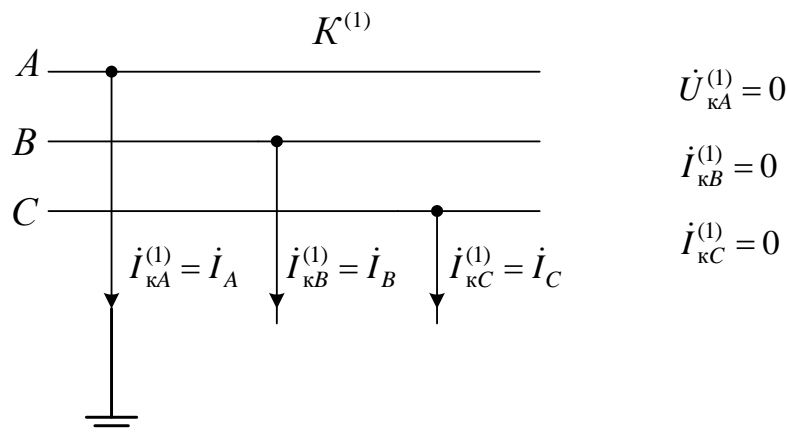


Рис. 2.2.1. Однофазное короткое замыкание

Воспользуемся выражениями, полученными с помощью метода симметричных составляющих. Первоначально из выражения (2.1.9) вычтем выражение (2.1.10) и, с учетом условий (2.2.2) и (2.2.3), получим:

$$(a^2 - a)\dot{I}_{A1} + (a - a^2)\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} - \dot{I}_{A0} = 0,$$

а затем, подставив вместо a и a^2 их значения из (2.1.4) и (2.1.5), найдем:

$$\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\dot{I}_{A1} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\dot{I}_{A2} = 0,$$

откуда имеем

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2}. \quad (2.2.4)$$

Далее, сложив выражения (2.1.9) и (2.1.10) с учетом условий (2.2.2) и (2.2.3), получим:

$$(a^2 + a)\dot{I}_{A1} + (a + a^2)\dot{I}_{A2} + 2\dot{I}_{A0} = 0.$$

Поскольку $(a^2 + a) = -1$ (убедитесь в этом самостоятельно), то

$$\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} - 2\dot{I}_{A0} = 0$$

и с учетом (2.2.4) имеем равенство

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A0}. \quad (2.2.5)$$

Таким образом, при однофазном КЗ токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке повреждения одинаковы.

Выполним суммирование уравнений (2.1.20), (2.1.21) и (2.2.22):

$$\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \dot{E}_{1\Sigma} - j\dot{I}_{A1} \cdot x_{1\Sigma} - j\dot{I}_{A2} \cdot x_{2\Sigma} - j\dot{I}_{A0} \cdot x_{0\Sigma}.$$

Поскольку левая часть этого уравнения равна нулю (согласно формуле (2.1.14) $\dot{U}_{KA} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}$, а по условию (2.2.1) $\dot{U}_{KA} = 0$), то, с учётом (2.2.5), получается выражение для тока прямой последовательности при однофазном КЗ:

$$\dot{I}_{K1}^{(1)} = \dot{I}_{A1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (2.2.6)$$

Полный ток в поврежденной фазе A найдём в соответствии с формулой (2.1.1) и с учетом равенства (2.2.5):

$$\dot{I}_{KA}^{(1)} = \dot{I}_A^{(1)} = \dot{I}_{A1}^{(1)} + \dot{I}_{A2}^{(1)} + \dot{I}_{A0}^{(1)} = 3\dot{I}_{K1}^{(1)} = \frac{3\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}. \quad (2.2.7)$$

Отсюда выразим коэффициент взаимосвязи между полным током КЗ и током прямой последовательности как отношение модулей указанных токов:

$$m^{(1)} = \frac{I_{KA}^{(1)}}{I_{K1}^{(1)}} = 3. \quad (2.2.8)$$

Симметричные составляющие напряжений нулевой и обратной последовательностей определяются из выражений (2.1.22) и (2.1.21) с учётом (2.2.5):

$$\dot{U}_{A0} = -j\dot{I}_{A1} \cdot x_{0\Sigma}; \quad (2.2.9)$$

$$\dot{U}_{A2} = -j\dot{I}_{A1} \cdot x_{2\Sigma}. \quad (2.2.10)$$

Тогда напряжение прямой последовательности (с учетом условия $\dot{U}_{KA} = 0$) равняется:

$$\dot{U}_{A1} = -\dot{U}_{A2} - \dot{U}_{A0} = -j\dot{I}_{A1} \cdot (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) \quad (2.2.11)$$

Полные напряжения в неповрежденных фазах найдём, воспользовавшись выражениями (2.1.15) и (2.1.16) с учетом (2.2.9) – (2.2.11):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KB}^{(1)} = \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \\ &= a^2 \cdot j\dot{I}_{A1} \cdot (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) - a \cdot j\dot{I}_{A1} \cdot x_{2\Sigma} - j\dot{I}_{A1} \cdot x_{0\Sigma}; \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{KC}^{(1)} = \dot{U}_C &= a \dot{U}_{A1} + a^2 \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \\ &= a \cdot j\dot{I}_{A1} \cdot (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}) - a^2 \cdot j\dot{I}_{A1} \cdot x_{2\Sigma} - j\dot{I}_{A1} \cdot x_{0\Sigma}. \end{aligned} \quad (2.2.13)$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в точке однофазного КЗ представлены на рис. 2.2.2.

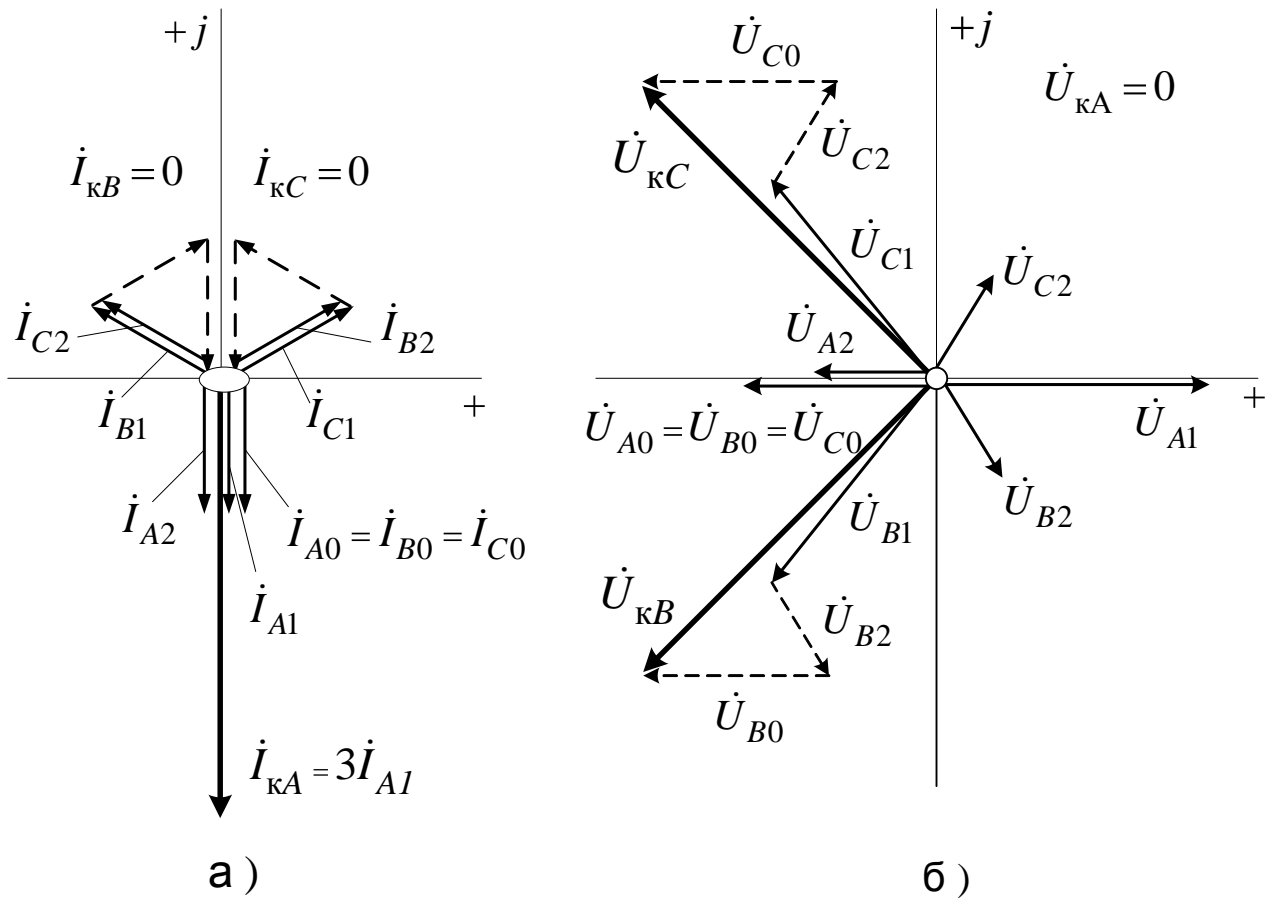


Рис. 2.2.2. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в точке однофазного КЗ

Двухфазное короткое замыкание

Короткое замыкание между фазами B и C (рис. 2.2.3) можно охарактеризовать следующими граничными условиями:

$$\dot{I}_{\kappa A}^{(2)} = 0; \quad (2.2.14)$$

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = -\dot{I}_{\kappa C}^{(2)}; \quad (2.2.15)$$

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(2)}. \quad (2.2.16)$$

Поскольку место КЗ не связано с землей, то нет пути для протекания тока нулевой последовательности, т. е. $\dot{I}_{A0} = 0$. Тогда условие (2.2.14) примет вид:

$$\dot{I}_{\kappa A}^{(2)} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = 0,$$

откуда

$$\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{A2}. \quad (2.2.17)$$

Заметим, что поскольку $\dot{I}_{A0} = 0$, то для упрощения можно принять $\dot{U}_{A0} = 0$, хотя в действительности при двухфазном КЗ \dot{U}_{A0} – неопределённость, которая сохраняет значение предшествующего режима и на величины токов не влияет [2].

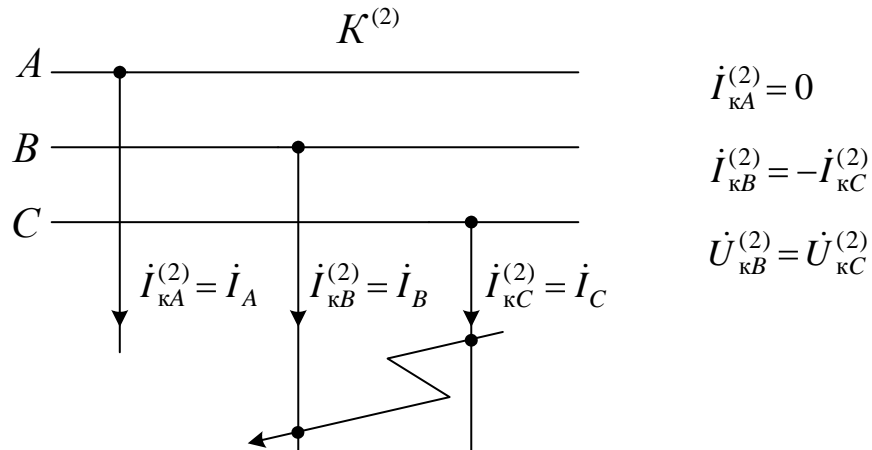


Рис. 2.2.3. Двухфазное короткое замыкание

Если из выражения (2.1.15) вычтем (2.1.16) и учтём равенство (2.2.16), то получим:

$$\dot{U}_{\kappa B} - \dot{U}_{\kappa C} = (a^2 - a)\dot{U}_{A1} + (a - a^2)\dot{U}_{A2} = 0,$$

откуда, учитывая, что $a^2 - a = -j\sqrt{3}$ и $a - a^2 = j\sqrt{3}$ (убедитесь сами), найдем

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}. \quad (2.2.18)$$

Подставив в (2.2.18) правые части из выражений (2.1.20) и (2.1.21), получим

$$\dot{E}_{1\Sigma} - j \cdot \dot{I}_{A1} x_{1\Sigma} = -j \dot{I}_{A2} x_{2\Sigma},$$

откуда с учетом (2.2.17) найдем выражение для тока прямой последовательности при двухфазном КЗ:

$$\dot{I}_{\kappa 1}^{(2)} = \dot{I}_{A1}^{(2)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (2.2.19)$$

Токи в поврежденных фазах B и C согласно (2.1.9) и (2.1.10) при $\dot{I}_{A0} = 0$ и с учётом условия (2.2.17) будут равны:

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{I}_B^{(2)} = a^2 \dot{I}_{A1} + a \dot{I}_{A2} = (a^2 - a) \dot{I}_{A1} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{A1} = \frac{-j\sqrt{3} \dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}; \quad (2.2.20)$$

$$\dot{I}_{\kappa C}^{(2)} = \dot{I}_C^{(2)} = a \dot{I}_{A1} + a^2 \dot{I}_{A2} = (a - a^2) \dot{I}_{A1} = j\sqrt{3} \dot{I}_{A1} = \frac{j\sqrt{3} \dot{E}_{1\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}. \quad (2.2.21)$$

При этом модуль полного тока короткого замыкания найдется как

$$I_{\kappa}^{(2)} = I_{\kappa B}^{(2)} = I_{\kappa C}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} E_{1\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}, \quad (2.2.22)$$

а коэффициент взаимосвязи полного тока и тока прямой последовательности при двухфазном КЗ

$$m^{(2)} = \frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{\kappa 1}^{(2)}} = \frac{\sqrt{3} E_{1\Sigma}}{(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} \cdot \frac{(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}{E_{1\Sigma}} = \sqrt{3}. \quad (2.2.23)$$

Из выражения (2.1.21) с учётом условий (2.2.17) и (2.2.18) получаем:

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = -j \dot{I}_{A2} \cdot x_{2\Sigma} = j \dot{I}_{A1} \cdot x_{2\Sigma}. \quad (2.2.24)$$

В результате, напряжение неповреждённой фазы A относительно земли в месте КЗ в соответствии с (2.1.14) и с учётом $\dot{U}_{A0} = 0$ будет равно:

$$\dot{U}_{\kappa A}^{(2)} = \dot{U}_A^{(2)} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} = 2\dot{U}_{A1} = 2 \cdot j \dot{I}_{A1} \cdot x_{2\Sigma},$$

а для напряжений повреждённых фаз с учетом (2.2.16) и в соответствии с (2.1.15) имеем:

$$\dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa C}^{(2)} = a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} = (a^2 - a) \dot{U}_{A1} = -\dot{U}_{A1} = -\frac{\dot{U}_{\kappa A}^{(2)}}{2}. \quad (2.2.25)$$

Векторные диаграммы токов и напряжений в точке двухфазного КЗ представлены на рис. 2.2.4.

Характерной особенностью двухфазного короткого замыкания является отсутствие токов нулевой последовательности (нет пути для их протекания, так как нет замыкания фаз на землю) и равенство по величине токов прямой и обратной последовательностей. При этом в неповреждённой фазе (в данном случае в особой фазе – фазе A) токи прямой и обратной последовательностей находятся в противофазе (сдвинуты на 180°), что и обеспечивает равенство нулю полного тока этой фазы. В повреждённых фазах (в данном случае в фазах B и C) полные токи равны по величине, но находятся в противофазе, причём величина этих токов в $\sqrt{3}$ раз больше величины тока прямой последовательности.

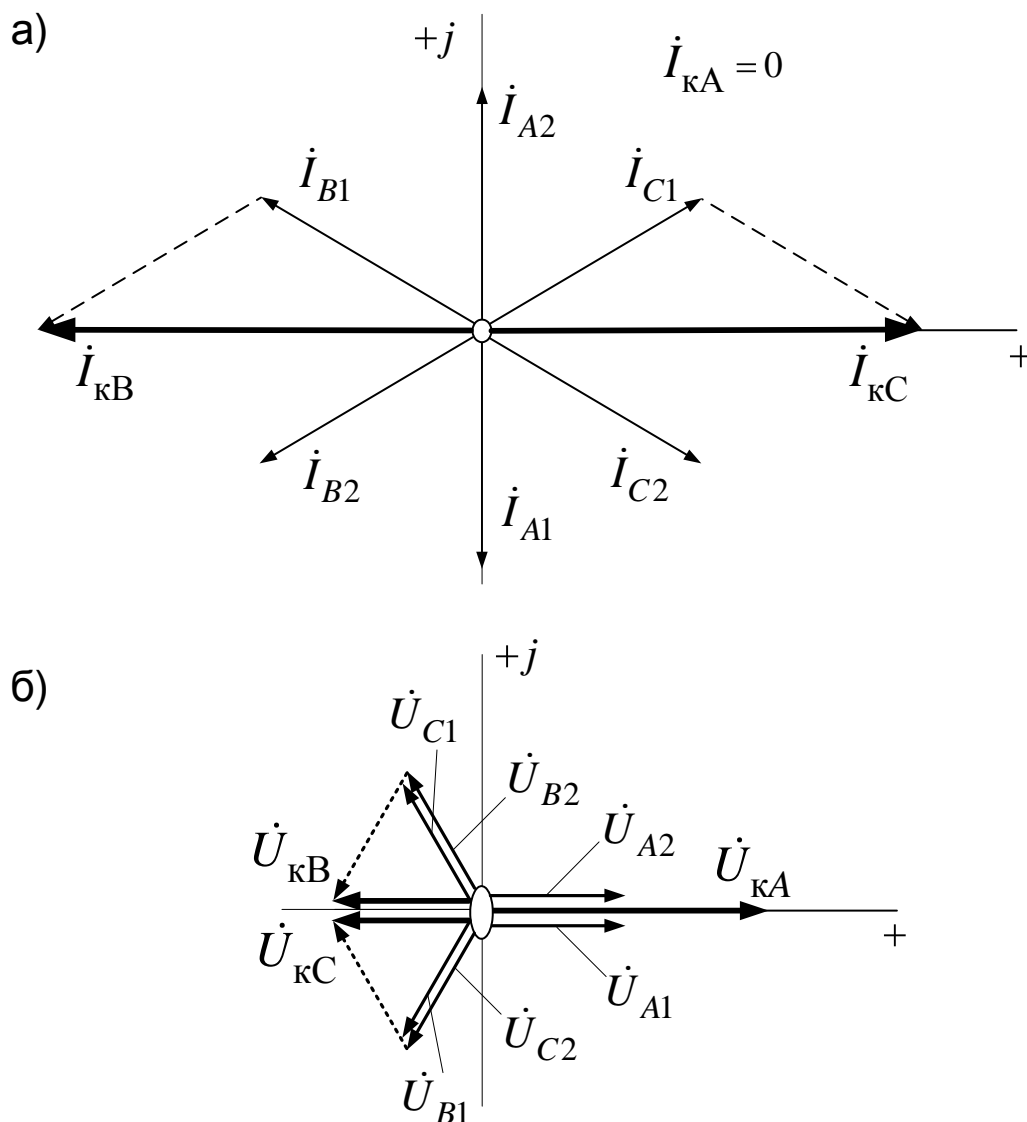


Рис. 2.2.4. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в точке двухфазного КЗ

Двухфазное короткое замыкание на землю

Двухфазное короткое замыкание на землю (рис. 2.2.5) характеризуется следующими граничными условиями:

$$\dot{I}_{кА}^{(1,1)} = 0; \quad (2.2.26)$$

$$\dot{U}_{кВ}^{(1,1)} = 0; \quad (2.2.27)$$

$$\dot{U}_{кС}^{(1,1)} = 0.$$

(2.2.28)

Условие (2.2.26) с учетом выражения (2.1.1) можно записать в виде:

$$\dot{I}_{кА}^{(1,1)} = \dot{I}_A^{(1,1)} = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = 0,$$

откуда вытекает соотношение

$$\dot{I}_{A1} = -(\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}). \quad (2.2.29)$$

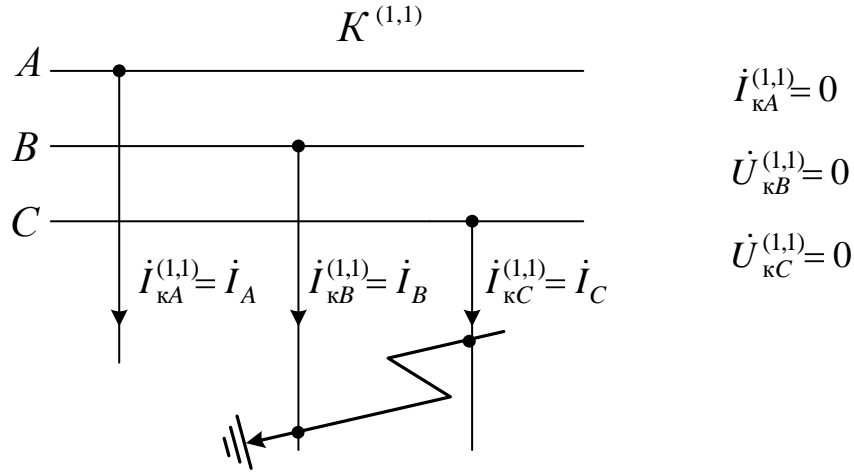


Рис. 2.2.5 Двухфазное короткое замыкание на землю

Найдём разницу между выражениями (2.1.15) и (2.1.16) с учётом условий (2.2.27) и (2.2.28):

$$a^2 \dot{U}_{A1} + a \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} - a \dot{U}_{A1} - a^2 \dot{U}_{A2} - \dot{U}_{A0} = (a^2 - a) \dot{U}_{A1} + (a - a^2) \dot{U}_{A2} = 0 ,$$

подставляя соотношения $a^2 - a = -j\sqrt{3}$ и $a - a^2 = j\sqrt{3}$, получим

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} . \quad (2.2.30)$$

Сложим выражения (2.1.15) и (2.1.16) с учетом условий (2.2.27) и (2.2.28):

$$(a^2 + a) \dot{U}_{A1} + (a + a^2) \dot{U}_{A2} + 2\dot{U}_{A0} = 0 ,$$

подставляя $a^2 + a = -1$ и учитывая (2.2.30), получим равенство

$$\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2} = \dot{U}_{A0} . \quad (2.2.31)$$

Равенство (2.2.31) позволяет из уравнений (2.1.22) и (2.1.21), соответственно, получить два соотношения:

$$\dot{I}_{A0} = -\frac{\dot{U}_{A1}}{jx_{0\Sigma}} ; \quad (2.2.32)$$

$$\dot{I}_{A2} = -\frac{\dot{U}_{A1}}{jx_{2\Sigma}} , \quad (2.2.33)$$

с учётом которых равенство (2.2.29) преобразуется к виду:

$$\dot{I}_{A1} = -(\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}) = -\left(-\frac{\dot{U}_{A1}}{jx_{2\Sigma}} - \frac{\dot{U}_{A1}}{jx_{0\Sigma}} \right) = \dot{U}_{A1} \left(\frac{1}{jx_{2\Sigma}} + \frac{1}{jx_{0\Sigma}} \right) , \quad (2.2.34)$$

откуда находим

$$\dot{U}_{A1} = \dot{I}_{A1} \cdot \frac{jx_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} . \quad (2.2.35)$$

Приравняв правые части выражений (2.1.20) и (2.2.35), найдём ток прямой последовательности при двухфазном КЗ на землю

$$\dot{I}_{\kappa 1}^{(1,1)} = \dot{I}_{A1}^{(1,1)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j \left(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right)}. \quad (2.2.36)$$

Выразим токи обратной и нулевой последовательностей через ток прямой последовательности. Для этого напряжение \dot{U}_{A1} , найденное по (2.2.35), подставим, поочередно, в (2.2.32) и (2.2.33):

$$\dot{I}_{A0} = -\dot{I}_{A1} \cdot \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}; \quad (2.2.37)$$

$$\dot{I}_{A2} = -\dot{I}_{A1} \cdot \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}. \quad (2.2.38)$$

С учётом этих соотношений токи в поврежденных фазах B и C определяются по выражениям (2.1.9) и (2.1.10):

$$\dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} = \dot{I}_B^{(1,1)} = a^2 \dot{I}_{A1} + a \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} \left(a^2 - a \cdot \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} - \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right); \quad (2.2.39)$$

$$\dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} = \dot{I}_C^{(1,1)} = a \dot{I}_{A1} + a^2 \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A1} \left(a - a^2 \cdot \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} - \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} \right). \quad (2.2.40)$$

Эти два комплексных тока имеют одинаковый модуль, который соответствует величине тока в аварийных фазах:

$$I_{\kappa}^{(1,1)} = I_{\kappa B}^{(1,1)} = I_{\kappa C}^{(1,1)} = I_{A1} \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}. \quad (2.2.41)$$

При этом коэффициент взаимосвязи между током двухфазного КЗ на землю и током прямой последовательности

$$m^{(1,1)} = \frac{I_{\kappa}^{(1,1)}}{I_{\kappa 1}^{(1,1)}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2\Sigma} x_{0\Sigma}}{(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2}}. \quad (2.2.42)$$

Ток замыкания, поступающий в землю, равен утроенной величине тока нулевой последовательности:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} + \dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} = 3\dot{I}_{A0}.$$

Напряжения фаз относительно земли легко находятся по выражениям (2.1.14) – (2.1.16) с учётом равенства (2.2.31) и выражения (2.2.35).

Векторные диаграммы токов и напряжений в точке двухфазного КЗ на землю представлены на рис. 2.2.6.

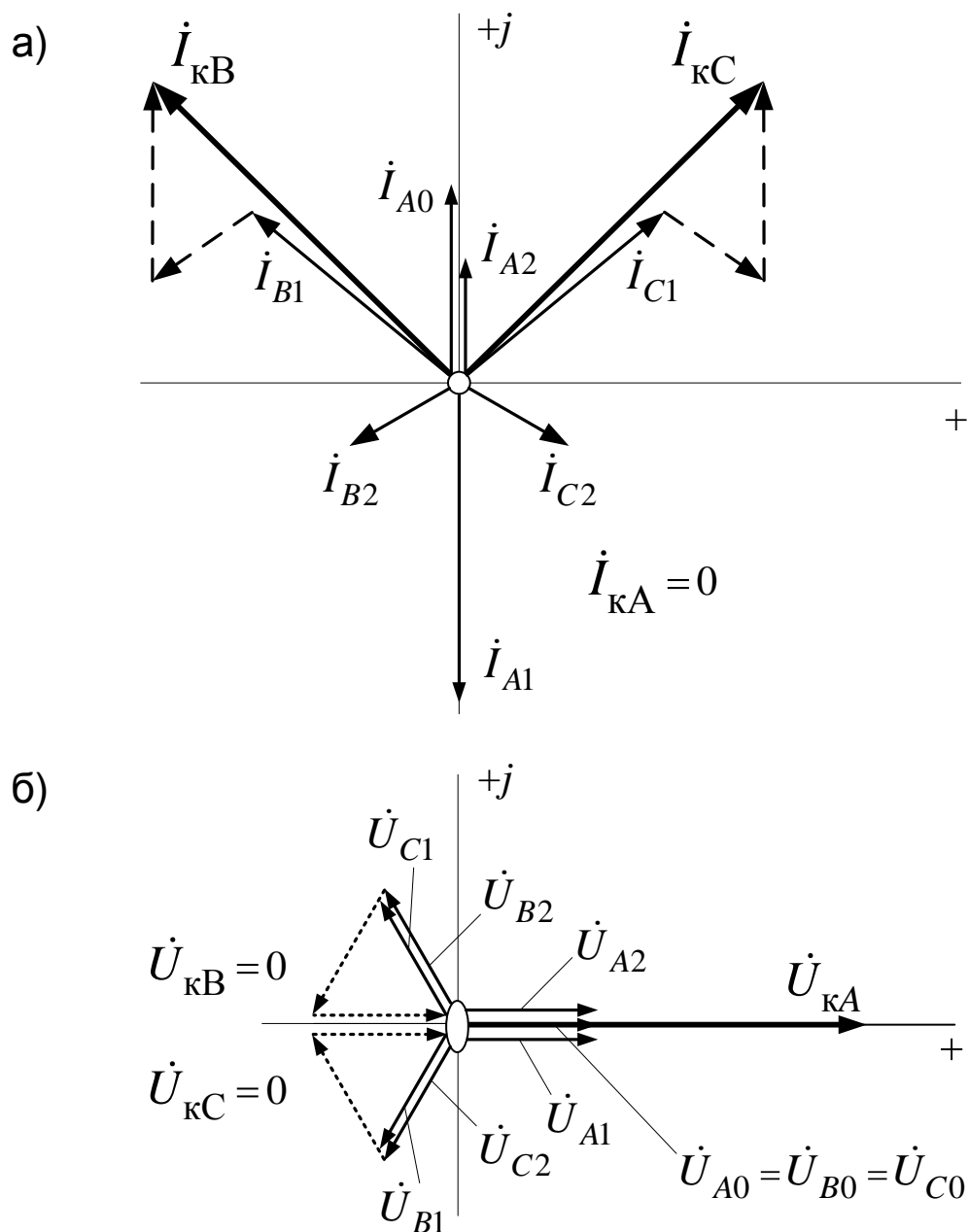


Рис. 2.2.6. Векторные диаграммы токов (а) и напряжений (б) в точке двухфазного КЗ на землю

При двухфазном КЗ на землю полные токи фаз содержат составляющие всех трёх последовательностей, в том числе и нулевой, поскольку имеется замыкание с землёй, создающее путь для протекания тока этой последовательности. В отличие от двухфазного КЗ, угол сдвига между векторами токов повреждённых фаз (угол между \dot{I}_{kB} и \dot{I}_{kC} на рис. 2.2.6, а) может принимать значения в диапазоне $0 \dots 180^\circ$. Величина угла определяется соотношениями между обратной и нулевой симметричными составляющими тока, которые, в свою очередь, зависят от соотношения сопротивлений обратной и нулевой последовательностей сети (см. формулы (2.2.37) и (2.2.38)).

2.3. Правило эквивалентности прямой последовательности

Выражения (2.2.6), (2.2.19) и (2.2.36) имеют одинаковую структуру, что позволяет при различных видах КЗ использовать общую формулу для определения тока прямой последовательности в месте повреждения:

$$\dot{I}_{\text{к1}}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}, \quad (2.3.1)$$

где $\dot{E}_{1\Sigma}$ – результирующая эквивалентная ЭДС прямой последовательности всех учитываемых источников; $x_{1\Sigma}$ – результирующее эквивалентное сопротивление схемы замещения прямой последовательности; $x_{\Delta}^{(n)}$ – **дополнительное сопротивление в точке КЗ** (или **шунт КЗ**), величина которого зависит от вида (n) короткого замыкания.

На основании выражения (2.3.1) может быть построена универсальная результирующая схема замещения для расчета тока прямой последовательности в точке несимметричного короткого замыкания (рис. 2.3.1) и сформулировано **правило эквивалентности прямой последовательности** [2].

Ток прямой последовательности любого несимметричного короткого замыкания может быть найден как ток при трехфазном коротком замыкании в точке, удаленной от действительной точки короткого замыкания на дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$, которое для каждого вида короткого замыкания определяется результирующими сопротивлениями обратной и нулевой последовательностей относительно рассматриваемой точки.

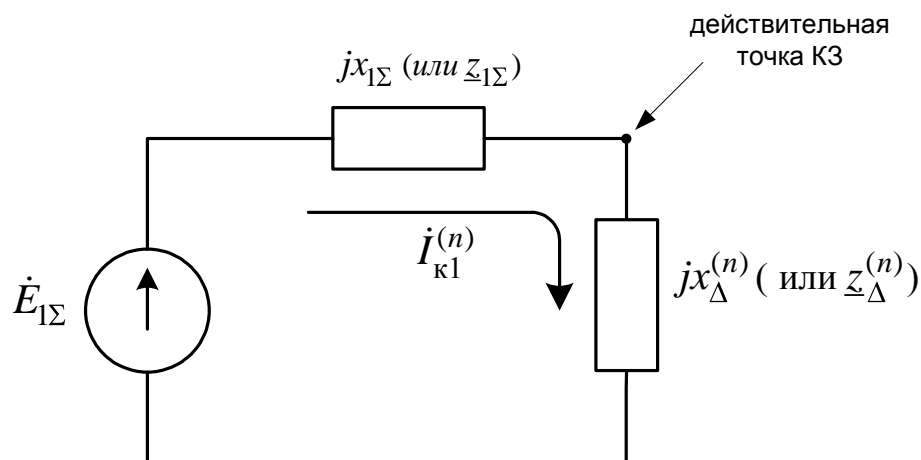


Рис. 2.3.1. Результирующая схема замещения для расчёта тока прямой последовательности в точке короткого замыкания

Отличие схемы замещения прямой последовательности на рис. 2.3.1 от ранее введённой схемы на рис. 2.1.3, а состоит в том, что элементом, подключаемым между точкой КЗ и точкой нулевого потенциала, является дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$, а не источник ЭДС $\dot{U}_{к1}$. Сопоставление этих схем позволяет записать очевидное равенство

$$\dot{U}_{к1}^{(n)} = \dot{I}_{к1}^{(n)} \cdot jx_{\Delta}^{(n)}.$$

При этом для нахождения $x_{\Delta}^{(n)}$ необходимо составить и привести к результирующему виду (свернуть) схемы замещения обратной и нулевой последовательностей (тем самым определить сопротивления $x_{2\Sigma}$ и $x_{0\Sigma}$), а затем воспользоваться расчётными формулами из табл. 2.3.1.

Модуль тока несимметричного КЗ в точке повреждения пропорционален току прямой последовательности (см. формулы (2.2.8), (2.2.23) и (2.2.42)) и в общем виде может быть представлен как

$$I_{\kappa}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{к1}^{(n)}, \quad (2.3.2)$$

где $m^{(n)}$ – коэффициент, зависящий от вида КЗ и определяемый из табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1

Значения дополнительного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$ и коэффициента $m^{(n)}$

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

2.4. Параметры элементов электрических систем для схем замещения разных последовательностей

В электрических системах напряжением выше 1000 В, как правило, выполняется соотношение $r_{\Sigma} \leq 0,3x_{\Sigma}$ (здесь r_{Σ} и x_{Σ} – результирующие активное и индуктивное сопротивления схемы замещения), что позволяет пренебрегать активными сопротивлениями при расчёте токов коротких замыканий. Допустимо также пренебрегать ёмкостью воздушных линий напряжением 110–220 кВ длиной не более 200 км и напряжением 330–500 км при длине до 150 км [1]. Поэтому при практических расчётах в схемах замещения обычно используются только индуктивные сопротивления элементов, которые по отношению к токам разных последователь-

ностей могут быть как одинаковыми, так и различаться [2–4]. Это зависит от принципа действия и конструктивного исполнения самих элементов.

Сопротивления прямой последовательности элементов являются теми же самыми, что применяются при расчёте симметричных режимов, в частности, трёхфазных КЗ [2]. Это объясняется тем, что в симметричном режиме имеет место только система прямой последовательности токов и напряжений. Очевидно, что сопротивления прямой последовательности находятся по тем же выражениям, какие использовались при расчёте токов трёхфазного КЗ.

У статичных элементов (трансформаторов, воздушных и кабельных ЛЭП, реакторов, т. е. элементов без вращающихся частей) изменение прямого следования фаз на обратное не вызывает изменения их сопротивлений. Следовательно, **параметры и схемы замещения** этих элементов для **прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми**, т. е. $x_2 = x_1$ и $r_2 = r_1$.

У токоограничивающих реакторов, фазы которых практически не связаны между собой магнитными потоками взаимной индукции, сопротивления всех последовательностей одинаковы: $x_0 = x_2 = x_1$ и $r_0 = r_2 = r_1$. Это означает, что их параметры и схемы замещения для любой последовательности имеют те же значения и вид, какие используются при расчете трёхфазного КЗ.

При наличии у статичных элементов магнитных связей между фазами, сопротивления нулевой последовательности будут больше сопротивлений прямой и обратной последовательностей. Это объясняется следующим.

Из курса ТОЭ известно, что индуктивное сопротивление проводника, оказываемое протекающему через него току, определяется действием как ЭДС самоиндукции, так и ЭДС взаимной индукции. ЭДС самоиндукции наводится током, протекающим в данном проводнике, направлена против этого тока и вызывает, так называемое, **собственное** индуктивное сопротивление x_L . ЭДС взаимной индукции создаётся током, протекающим в соседнем проводнике (или контуре), и приводит к появлению **взаимного** индуктивного сопротивления x_M . При этом взаимное сопротивление по отношению к собственному может быть как положительным, так и отрицательным. Соответственно, полное индуктивное сопротивление находится как $x = x_L \pm x_M$. Взаимное сопротивление будет положительным, если ЭДС взаимной индукции имеет такое же направление, как и ЭДС самоиндукции. В подобных случаях говорят, что проводники (или контуры) намагничивают друг друга, а в противном случае – размагничивают.

Поскольку сами ЭДС, согласно закону электромагнитной индукции, индуктируются изменяющимися во времени магнитными потоками, то о размагничивании или намагничивании проводников можно судить по взаимной направленности магнитных потоков, создаваемых токами в проводниках. В частности, параллельные проводники будут взаимно намагничиваться, если протекающие в них токи имеют одинаковое направление (один знак), то есть наводят сонаправленные магнитные потоки.

В трёхфазных цепях прямой (или обратной) последовательности ток в какой-то одной из фаз всегда имеет противоположное направление (знак) по отношению

к токам в двух других фазах. Это следует из выражений, записанных вследствие симметрии:

$$\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = 0; \quad \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = 0.$$

Поэтому происходит размагничивание одной из фаз двумя другими и наоборот. В результате индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей оказываются меньше собственного (рис. 2.4.1, а). Поскольку направления токов фаз меняются в течение периода, то происходит чередование взаимного намагничивания и размагничивания фаз, обеспечивая, тем самым, равенство их сопротивлений. Для придания воздушным ЛЭП большей симметрии выполняют транспозицию их проводов вдоль трассы.

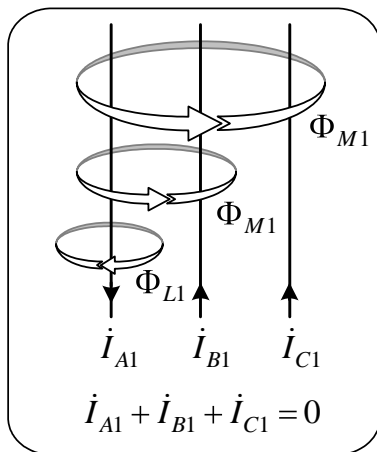
В системе нулевой последовательности токи во всех трёх фазах одинаковы как по величине, так и по направлению, что приводит к взаимному намагничиванию параллельных фазных проводников (рис. 2.4.1, б). Поэтому индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0 оказывается больше собственного, а значит, и сопротивлений прямой x_1 и обратной x_2 последовательностей.

При наличии у ЛЭП грозозащитного троса, в конструкции к трём фазным проводам добавляется близко расположенный к ним и замкнутый через землю четвёртый проводник – трос (рис. 2.4.1, в). Три тока нулевой последовательности в фазных проводах I_{A0} , I_{B0} , I_{C0} создают результирующий магнитный поток $\Phi_{П-Т0}$, охватывающий трос. Этот поток наводит в тросе ток $I_{Т0}$, имеющий направление противоположное токам в фазных проводах. Ток $I_{Т0}$, в свою очередь, создаёт магнитный поток $\Phi_{Т-П0}$, который охватывает фазные провода и размагничивающим образом действует на них. В результате, индуктивное сопротивление нулевой последовательности воздушной ЛЭП с тросом x_0 оказывается меньше, чем у ЛЭП без троса. С целью его увеличения, в настоящее время троса глухо заземляют только с одного конца участка ЛЭП, а на другом конце заземление выполняют через искровой промежуток, который пробивается лишь при ударе молнии.

Рассмотренное выше взаимное размещение фаз характерно для конструкций **воздушных и кабельных линий электропередач**, а также различных шинных мостов и токопроводов, в которых применяется параллельное расположение фазных проводников значительной длины, находящихся на относительно небольшом расстоянии друг от друга.

В схемах замещения отдельных последовательностей ЛЭП учитываются своими сопротивлениями, причём индуктивные сопротивления нулевой последовательности оказываются в несколько раз больше, чем прямой. При этом сопротивление нулевой последовательности существенно зависит от ряда факторов: вида ЛЭП (воздушная или кабельная); наличия заземлённого с обоих концов грозозащитного троса; количества параллельных цепей и др.

Заметим, что у двухцепных ЛЭП сопротивление нулевой последовательности одной цепи больше, чем у одноцепных. Это объясняется наличием близко расположенной параллельной цепи с токами того же направления, что вызывает дополнительное намагничивание проводов и, как следствие, увеличение их индуктивного сопротивления.



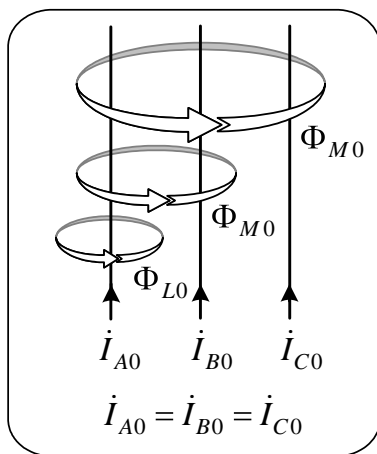
Φ_{L1} и Φ_{M1} - собственный и взаимный магнитные потоки, созданные токами прямой последовательности проводов

$$\Delta \dot{U}_{A1} = jx_L \dot{I}_{A1} + jx_M \dot{I}_{B1} + jx_M \dot{I}_{C1} = j(x_L - x_M) \dot{I}_{A1}$$

$$\dot{I}_{A1} = -(\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1})$$

$$x_1 = \frac{\Delta \dot{U}_{A1}}{\dot{I}_{A1}} = x_L - x_M$$

а)



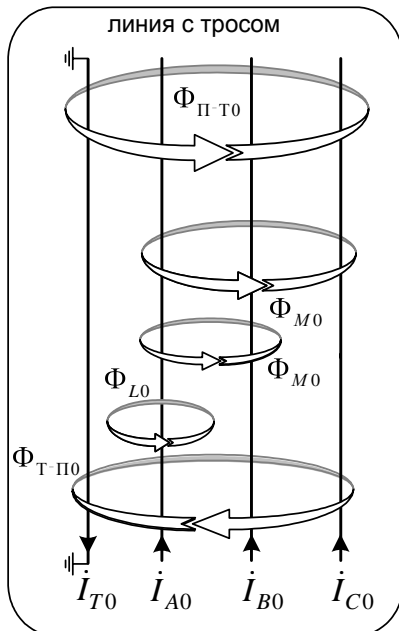
Φ_{L0} и Φ_{M0} - собственный и взаимный магнитные потоки, созданные токами нулевой последовательности проводов

$$\Delta \dot{U}_{A0} = jx_L \dot{I}_{A0} + jx_M \dot{I}_{B0} + jx_M \dot{I}_{C0} = j(x_L + 2x_M) \dot{I}_{A0}$$

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}$$

$$x_0 = \frac{\Delta U_{A0}}{I_{A0}} = x_L + 2x_M > x_1$$

б)



$\Phi_{П-Т0}$ - результирующий магнитный поток, созданный токами нулевой последовательности фазных проводов I_{A0} , I_{B0} и I_{C0} , охватывающий при этом трос

$\Phi_{Т-П0}$ - магнитный поток, созданный током нулевой последовательности троса I_{T0} и охватывающий фазные провода; направлен *встречно* потоку $\Phi_{П-Т0}$

$$(\dot{I}_{A0}, \dot{I}_{B0}, \dot{I}_{C0}) \rightarrow \Phi_{П-Т0} \rightarrow \dot{I}_{T0} \rightarrow \Phi_{Т-П0} \Rightarrow \downarrow x_0$$

размагничивает фазные провода

в)

Рис. 2.4.1. Влияние взаимной индукции на индуктивные сопротивления прямой (а) и нулевой (б, в) последовательностей параллельных проводов

Существуют расчётные выражения для достаточно точного определения индуктивного, активного и емкостного сопротивлений воздушных и кабельных ЛЭП [2, 3]. Однако для их использования необходимы данные о геометрических расположениях фазных проводов, расстояниях между ними и т. д. Поскольку подобная информация не всегда доступна, то при проведении приближённых практических расчётов индуктивные сопротивления ЛЭП определяются упрощенно.

Индуктивное сопротивление прямой последовательности x_1 ЛЭП известной длины, выполненной из провода заданного типа и сечения, находят через удельное сопротивление, аналогично тому, как это делается при расчёте трёхфазного КЗ. Индуктивное сопротивление нулевой последовательности определяют как

$$x_0 = k_0 \cdot x_1,$$

где k_0 – коэффициент, рекомендуемые значения которого даны в табл. 2.4.1.

При необходимости учёта активного сопротивления ЛЭП, можно воспользоваться следующими приближёнными соотношениями:

- для одноцепной воздушной ЛЭП без троса $r_0 = r_1 + 0,15$, Ом/км;
- для двухцепной воздушной ЛЭП без троса $r_0 = r_1 + 0,3$, Ом/км;
- для кабельной линии $r_0 = 10r_1$.

Таблица 2.4.1

Соотношения сопротивлений нулевой и прямой последовательностей ЛЭП [1, 5]

Характеристика линии	$k_0 = x_0/x_1$	
	Одноцепная ЛЭП	Двухцепная ЛЭП
Без тросов (или с тросами, заземлёнными с одного конца пролёта или участка)	3,5	5,5
Со стальными тросами	3,0	4,7
С хорошо проводящими тросами	2,0	3,0
Кабель трехжильный	3,5 – 4,6	
Кабель одножильный	0,8 – 1,0	

У **трансформаторов** схемы замещения нулевой последовательности имеют существенные отличия от схем прямой последовательности и зависят от наличия заземлённых нейтралей трансформаторов, схем соединения их обмоток и конструктивного исполнения. Обмотки трансформаторов могут быть соединены в треугольник (Δ), в звезду с заземлённой нейтралью (Y_0) и в звезду с изолированной нейтралью (Y). По своему конструктивному исполнению силовые трансформаторы подразделяются на трёх-, четырёх- и пятистержневые трёхфазные, а также трёхфазную группу из трёх однофазных автотрансформаторов. Условимся **первичной** обмоткой называть ту, которая электрически связана с местом КЗ, и для неё использовать индекс «I». Для **вторичных** обмоток будем применять, соответственно, индексы «II» и «III».

Характерной особенностью токов нулевой последовательности является их полное равенство во всех трёх фазах (см. рис. 2.1.1, в). Поэтому ток нулевой последовательности по существу является однофазным током, равномерно распределённым по трём параллельным ветвям, каковыми являются фазные проводники (рис. 2.4.2). Для того чтобы контур оказался замкнутым, а токи могли протекать, необходимо наличие дополнительного пути (обратного провода, земли), соединяющего начало и конец схемы. **Концом** схемы принято считать место повреждения (точка К), а **началом** – точку, в которой объединяются ветви с нулевым потенциалом (точка Н). В любой трехфазной симметричной цепи (каковой, в частности, является и трёхфазная схема нулевой последовательности) точками нулевого потенциала являются нейтрали трансформаторов. Поэтому для появления при коротком замыкании токов нулевой последовательности необходимо выполнение двух условий: возникновения замыкания на землю (т. е. однофазного или двухфазного на землю КЗ) и наличия хотя бы одной заземлённой нейтрали на той ступени напряжения, где произошло КЗ. Последнее и является отправным моментом для особенностей учёта трансформаторов в схемах замещения нулевой последовательности.

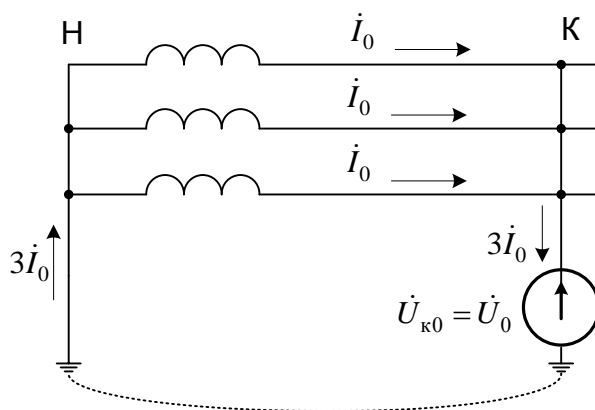


Рис. 2.4.2. Пути протекания токов нулевой последовательности

Так, не включаются в схемы замещения нулевой последовательности те трансформаторы и автотрансформаторы, которые не имеют заземлённой нейтрали в обмотке, электрически связанной с местом КЗ. Например, если КЗ на землю произошло со стороны обмотки, собранной по схеме Δ или Y , то данный трансформатор в схеме нулевой последовательности не участвует, т. е. его сопротивление $X_0 = \infty$.

Заметим, что наличие заземлённой нейтрали у первичной обмотки ещё не означает, что трансформатор обязательно будет участвовать в схеме замещения нулевой последовательности. Это зависит от схем соединения других его обмоток и конструкции магнитопровода (см. ниже).

Особо отметим, что в схеме нулевой последовательности необходимо учитывать ещё и те трансформаторы, которые хотя и электрически не связаны с местом КЗ, но имеют обмотку с заземлённой нейтралью, в которой будут циркулировать токи нулевой последовательности, наводимые при КЗ в рассматриваемой точке.

На рис. 2.4.3 представлены основные варианты соединения двухобмоточных трансформаторов и автотрансформатора, а также соответствующие однофазные схемы замещения нулевой последовательности, построенные на основе широко применяемой Т-образной схемы замещения. В схемах используются следующие сопротивления: x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; $x_{\mu 0}$ – реактивное сопротивление намагничивания нулевой последовательности; x_{II} и x_{III} – индуктивные сопротивления рассеяния вторичных обмоток.

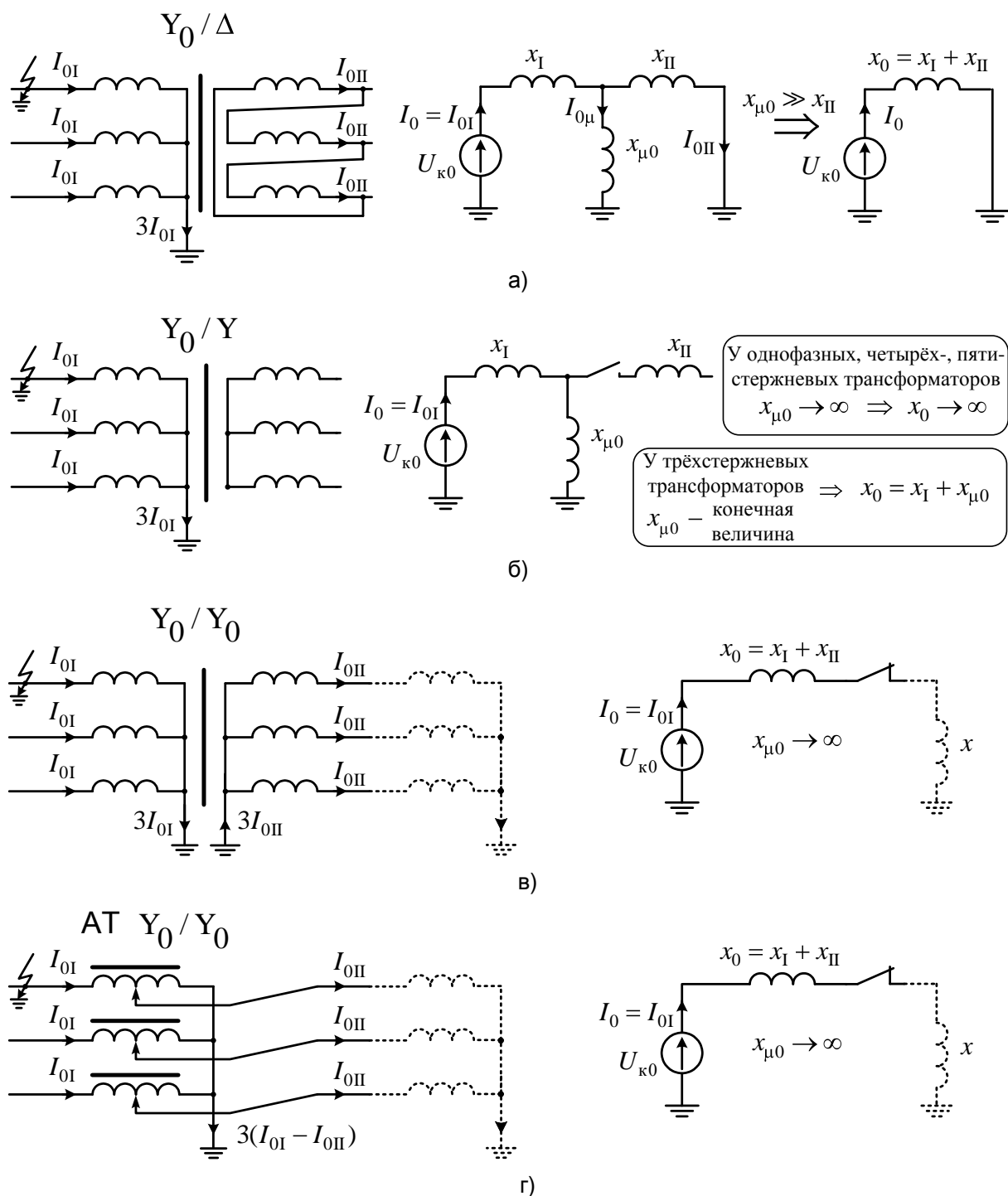


Рис. 2.4.3. Схемы соединения обмоток и схемы замещения нулевой последовательности двухобмоточных трансформаторов (а – в) и автотрансформатора (г)

Рассмотрим трансформатор со схемами соединения обмоток Y_0/Δ . Такие трансформаторы широко применяются в сетях с заземлённой нейтралью напряжением 110 кВ и выше. При возникновении несимметричного КЗ на землю со стороны первичной обмотки, собранной по схеме звезды с заземлённой нейтралью, обеспечивается прохождение токов нулевой последовательности I_{0I} (см. рис. 2.4.3, а). В результате, во вторичной обмотке, собранной по схеме треугольника, наводится ЭДС нулевой последовательности, под действием которой по фазам этой обмотки циркулирует ток I_{0II} . Поскольку этот ток во всех фазах один и тот же, то он замыкается по собранным в треугольник фазам вторичной обмотки трансформатора, не выходя за её пределы. Поэтому в схеме замещения закорачивается ветвь с сопротивлением рассеяния вторичной обмотки x_{II} , что соответствует завершению пути тока нулевой последовательности. По схеме замещения можно найти сопротивление трансформатора нулевой последовательности:

$$x_0 = x_I + \frac{x_{\mu 0} x_{II}}{x_{\mu 0} + x_{II}}.$$

У группы из трёх однофазных автотрансформаторов и трёхфазных трансформаторов с магнитопроводами, имеющими четыре или пять стержней, потоки нулевой последовательности имеют возможность замыкаться в основном только по магнитопроводу. Это обеспечивает на пути потоков незначительное магнитное сопротивление и, соответственно, значительное $x_{\mu 0}$, которое в данных расчётах можно принять стремящимся к бесконечности. Последнее означает, что в схеме замещения ветвь намагничивания даёт разрыв.

В трёхстержневых трансформаторах магнитные потоки фаз нулевой последовательности (все имеющие одно направление) взаимно вытесняют друг друга на пути рассеяния с большим магнитным сопротивлением, что ведёт к уменьшению величины $x_{\mu 0}$. У таких трансформаторов $x_{\mu 0*(ном)} = 0,3...1,0$. Однако, при соединении вторичной обмотки в треугольник, сопротивление намагничивания $x_{\mu 0}$ шунтируется сопротивлением рассеяния этой обмотки x_{II} , имеющей существенно меньшую величину. Поэтому цепью намагничивания также можно пренебречь.

Таким образом, у **двухобмоточных трансформаторов** со схемами соединения обмоток Y_0/Δ при любой конструкции магнитопровода сопротивление нулевой последовательности определяется как

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

причём в схеме замещения оно закорачивается на землю, а все элементы, отделённые от места КЗ рассматриваемым трансформатором, не учитываются. Иногда для трёхфазных трёхстержневых трансформаторов принимают $x_0 = (0,85...0,9)x_I$ [3].

При соединении обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y и коротком замыкании на землю со стороны обмотки I, собранной в звезду с заземлённой нейтралью, токи нулевой последовательности могут протекать только по этой обмотке, замыкаясь через цепь намагничивания (см. рис. 2.4.3, б). В обмотке II токи нулевой последовательности отсутствуют. Поскольку у группы из трёх

однофазных автотрансформаторов, а также у трёхфазных трансформаторов с четырёх- и пятистержневыми магнитопроводами допустимо полагать $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$, то для них обычно принимают x_0 бесконечно большим. Поэтому такие трансформаторы и расположенные за ними другие элементы в схеме замещения нулевой последовательности не учитываются.

По-другому обстоят дела, если трёхфазный трансформатор имеет трёхстержневой магнитопровод. Такова конструкция понижающих трансформаторов мощностью 25...1600 кВ·А с обмоткой высшего напряжения 35, 10 или 6 кВ, собранной по схеме Y , и обмоткой низшего напряжения 0,4 кВ, соединённой по схеме Y_0 . При КЗ на землю (или на нулевой провод) в сети 0,4 кВ по фазам обмотки I с заземлённой нейтралью протекают токи нулевой последовательности I_{0I} , замыкаясь, как и в предыдущем случае, через цепь намагничивания (см. рис. 2.4.3, б). При этом потоки намагничивания, наводимые в каждом из стержней магнитопровода, имеют одинаковое направление, что приводит к их взаимному вытеснению из ярма на пути рассеяния. В результате, у трансформаторов данной конструкции $x_{\mu 0}$ оказывается относительно небольшим. Поэтому такие трансформаторы необходимо учитывать в схеме замещения нулевой последовательности для расчёта токов однофазного или двухфазного на землю КЗ в сети 0,4 кВ. Поскольку в таких сетях существенно влияние активных сопротивлений, то трансформаторы (как и другие элементы) учитываются полными сопротивлениями. В очень приближённых расчётах можно принять для трансформаторов 35 кВ $z_0/z_1=5,35$ и для трансформаторов 10 и 6 кВ – $z_0/z_1=8,85$. Более точные данные по сопротивлениям нулевой последовательности таких трансформаторов можно найти в работе [12].

При соединении обмоток двухобмоточного трансформатора по схеме Y_0/Y_0 появление токов нулевой последовательности во вторичной обмотке I_{0II} возможно только в том случае, если в сети, электрически связанной с данной обмоткой, имеется ещё хотя бы одна заземлённая нейтраль (см. рис. 2.4.3, в). Для конструкций таких трансформаторов можно принимать $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$ и в схеме замещения не учитывать цепь намагничивания. Подобная же картина наблюдается и у двухобмоточного автотрансформатора АТ (см. рис. 2.4.3, г). В этих случаях в схеме замещения нулевой последовательности необходимо дополнительно учитывать и те трансформаторы, которые хотя и расположены на смежных ступенях напряжения по отношению к точке короткого замыкания на землю, но имеют заземлённые нейтрали, обеспечивающие протекание токов нулевой последовательности во вторичных обмотках трансформаторов, непосредственно связанных с местом повреждения.

Для трёхобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов схемы замещения нулевой последовательности (рис. 2.4.4) строятся на основании рассмотренных выше положений. Отличие состоит лишь в том, что появляется ещё одна вторичная обмотка, параметры которой имеют индекс «III».

С целью ограничения токов короткого замыкания на землю нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов иногда заземляют не напрямую, а через реак-

тор (рис. 2.4.5). Реактор оказывается включённым в контур циркуляции токов нулевой последовательности, и его сопротивление должно учитываться в схеме замещения нулевой последовательности трансформатора утроенной величиной. Последнее обусловлено тем, что схема составляется для одной фазы, а через реактор протекает сумма токов всех трёх фаз. Типичные схемы включения реактора, соответствующие им схемы замещения, а также расчётные выражения для определения сопротивлений представлены на рис. 2.4.5 [2, 3].

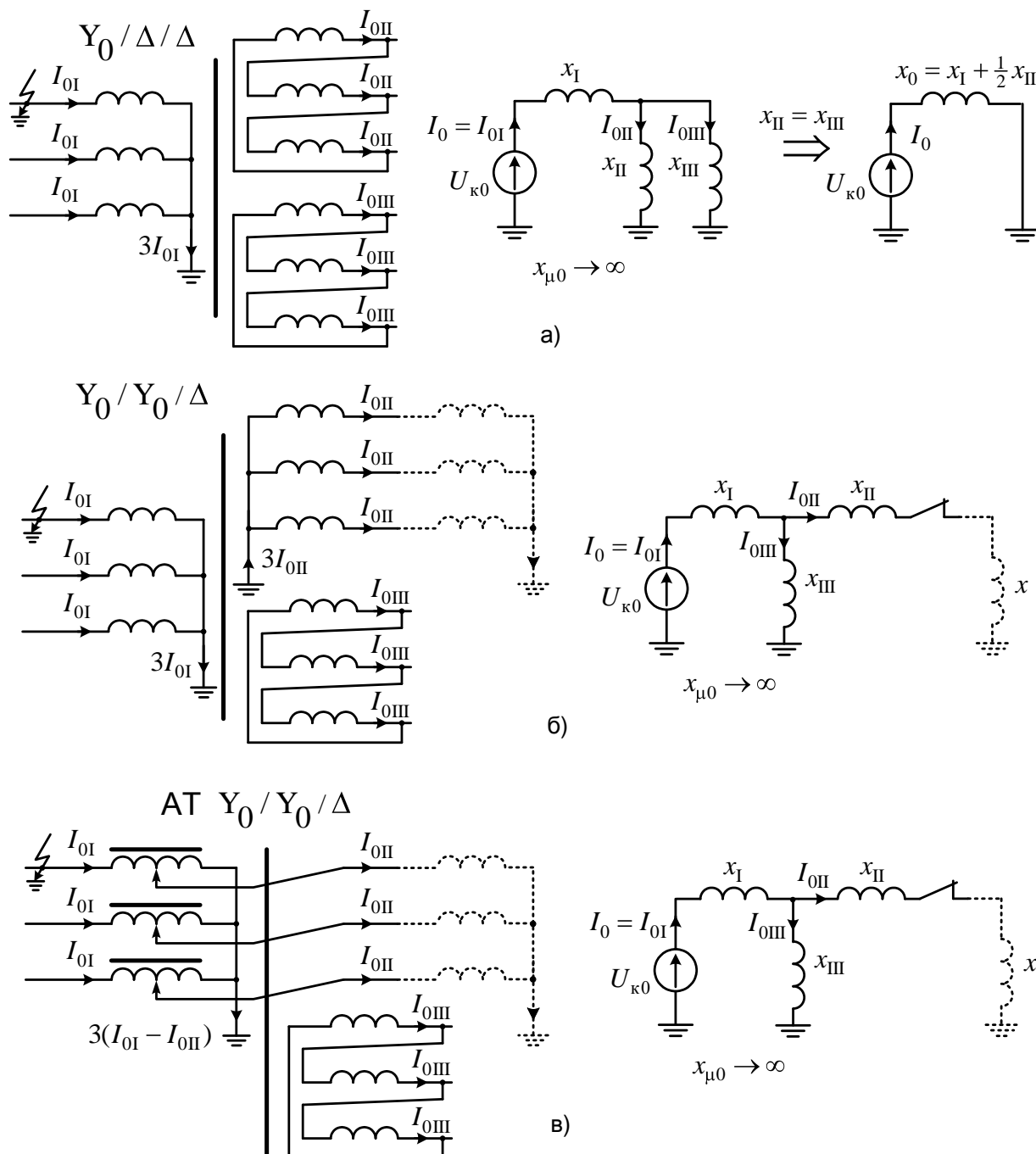


Рис. 2.4.4. Схемы соединения обмоток и схемы замещения нулевой последовательности трёхобмоточных трансформаторов (а, б) и автотрансформатора (в)

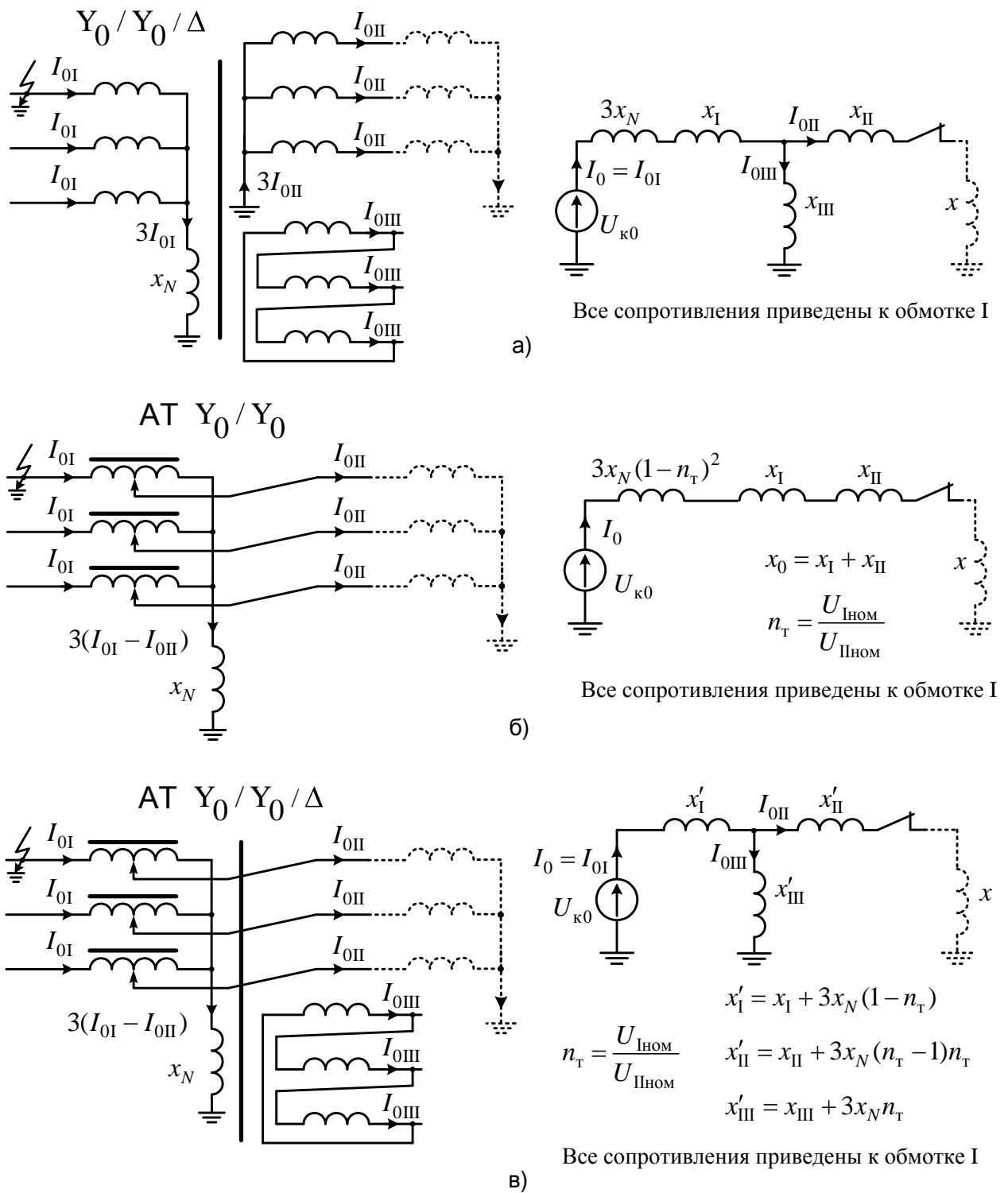


Рис. 2.4.5. Схемы соединения обмоток и схемы замещения нулевой последовательности трансформатора (а) и автотрансформаторов (б, в) с реактором в нейтрали

Одной из главных особенностей **синхронных машин** является наличие вращающегося в пространстве магнитного поля, наводимого токами трёх фаз статорной обмотки. Такой характер поля обусловлен тем, что каждый из фазных токов i_A, i_B, i_C , сдвинутых во времени на треть периода (что соответствует

120 град. эл.), протекает по своим частям (фазам) статорной обмотки, которые, в свою очередь, конструктивно смещены в пространстве друг относительно друга на 120 град. эл. При этом система токов прямой последовательности $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$ наводит магнитный поток реакции якоря прямой последовательности Φ_{a1} , вращающийся в том же направлении и с такой же скоростью $\omega = 2\pi f$, что и ротор. То есть магнитный поток прямой последовательности Φ_{a1} неподвижен относительно ротора. Напротив, система токов обратной последовательности $\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$ наводит магнитный поток Φ_{a2} , вращающийся с такой же скоростью $\omega = 2\pi f$, но в направлении, противоположном вращению ротора. Следовательно, магнитный поток реакции якоря обратной последовательности Φ_{a2} вращается относительно ротора с двойной скоростью -2ω .

В результате, при вращении ротора магнитное сопротивление на пути потока прямой последовательности остаётся неизменным, а на пути потока обратной последовательности – может изменяться при наличии электромагнитной несимметрии в синхронной машине. Последнее означает, что у синхронной машины индуктивное сопротивление обратной последовательности x_2 определяется значениями её сопротивлений как по оси d , так и по оси q и в общем случае не совпадает с сопротивлением прямой последовательности. Выражения для определения величины x_2 в зависимости от условий проведения испытаний можно найти, например, в работах [2, 3]. Для практических расчётов допустимо использовать приближённые соотношения [2, 3]:

– для машин без демпферных обмоток $x_2 \approx 1,45x'_d$;

– для турбогенераторов и машин с демпферными обмотками по обеим осям..... $x_2 \approx 1,22x''_d$

(более грубое допущение..... $x_2 \approx x''_d$);

или взять значение x_2 из справочной литературы.

У **асинхронных двигателей** поток реакции якоря обратной последовательности по отношению к ротору вращается со скольжением $s_2 = 2 - s$ (здесь s – скольжение ротора по отношению к магнитному потоку прямой последовательности). При этом сопротивление обратной последовательности x_2 незначительно отличается от сопротивления заторможенного двигателя (что соответствует условию $s = 1$), и в практических расчётах допустимо принимать [1, 4]:

$$x_{2\text{ ном}} \approx x''_{* \text{ ном}} = \frac{1}{K_{\Pi}} \quad (\text{здесь } K_{\Pi} \text{ – кратность пускового тока двигателя}).$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности x_0 **синхронных и асинхронных машин** определяется только рассеянием статорной обмотки. Действительно, токи нулевой последовательности фаз статорной обмотки наводят совпадающие по времени и одинаковые по величине, но сдвинутые в простран-

ве на 120 град. эл. пульсирующие магнитные потоки нулевой последовательности, которые взаимно компенсируют друг друга в зазоре и в ротор не попадают. Незначительная некомпенсированная часть этих потоков замыкается по путям рассеяния, обуславливая x_0 . При этом значение x_0 сильно зависит от типа и конструкции статорной обмотки и должно определяться в каждом случае опытным путём. Так, у синхронных машин величина x_0 колеблется в широком диапазоне $(0,15...0,6)x_d''$ [2]. Следует заметить, что генераторы и электродвигатели напряжением свыше 1 кВ, как правило, подключаются к обмоткам трансформаторов низшего напряжения, собранным по схеме треугольника, и работают в сетях с изолированной нейтралью. Поэтому, при возникновении КЗ на землю в сети обмотки высшего напряжения трансформатора ток нулевой последовательности в обмотках синхронных и асинхронных машин отсутствует, а сами машины в схемах замещения нулевой последовательности не участвуют.

Для **обобщённой нагрузки** в приближённых расчётах можно принять $x_{2*} = 0,35$ [2, 4] (что соответствует полной рабочей мощности нагрузки (МВ·А) и среднему номинальному напряжению той ступени, где нагрузка подключена). Для более точных расчётов необходимо воспользоваться данными из работ [1, 5] (см. **Приложение 7**). Сопротивление нулевой последовательности обобщённой нагрузки определяется схемой сети и трансформаторами, входящими в её состав. Заметим, что следует учитывать каждую обобщённую (комплексную) нагрузку, если ток в месте КЗ от этой нагрузки составляет не менее 5 % тока, определённого без её учёта [1].

2.5. Схемы замещения отдельных последовательностей

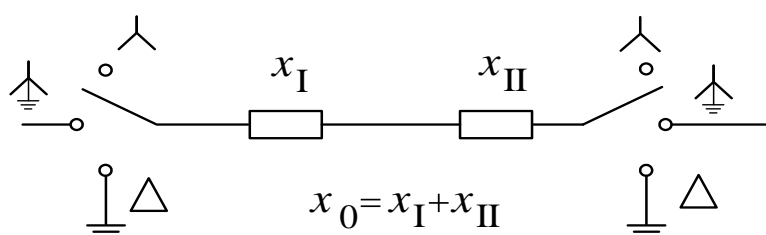
Расчёт любого вида короткого замыкания предполагает составление схем замещения, в общем случае всех трёх последовательностей – прямой, обратной и нулевой. Схемы замещения отдельных последовательностей содержат параметры только тех элементов, по которым протекают токи соответствующих последовательностей при рассматриваемом виде КЗ. Параметры элементов могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах, но обязательно должны быть приведены к одной (основной) ступени напряжения, за которую, как правило, принимают ступень напряжения точки КЗ (см. Глава 1, пп. 1.3–1.5).

Схема замещения прямой последовательности является по существу обычной схемой, которая применяется при расчёте трёхфазного КЗ. Однако в ней дополнительно между точкой КЗ (**концом схемы**) и точкой нулевого потенциала (**началом схемы**, где объединяются свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей) подключается источник с ЭДС, равной напряжению **прямой последовательности** \dot{U}_{k1} , возникающему в месте несимметрии.

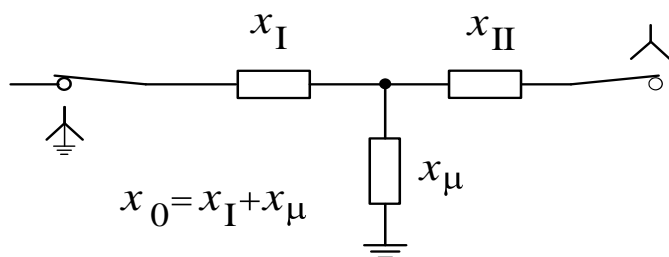
Схема замещения обратной последовательности по структуре аналогична схеме замещения прямой последовательности, поскольку пути циркуляции токов прямой и обратной последовательностей одинаковы. Отличия состоят в том, что,

во-первых, в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей принимаются равными нулю (источники ЭДС в этих ветвях отсутствуют); во-вторых, между концом (точкой КЗ) и началом схемы подключается источник с ЭДС, равной напряжению обратной последовательности $\dot{U}_{к2}$, возникающему в месте несимметрии. Следует отметить, что сопротивления обратной последовательности синхронных машин и нагрузок практически постоянны и не зависят от продолжительности и причины возникновения КЗ [2].

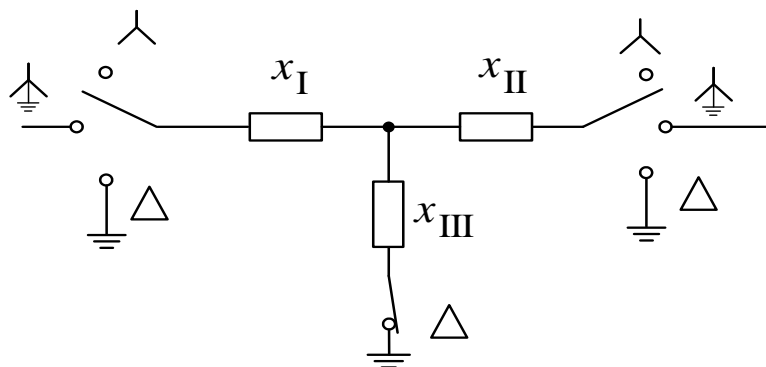
Особенности токов нулевой последовательности, пути их протекания, а также соответствующие параметры элементов электрических систем были рассмотрены в п. 2.4. Построение схемы замещения нулевой последовательности начинается от точки КЗ (конца схемы), в которую подключается источник с ЭДС, равной напряжению нулевой последовательности $\dot{U}_{к0}$, возникающему в месте



а) двухобмоточный трансформатор или автотрансформатор



б) двухобмоточный трёхстержневой трансформатор Y_0 / Y



в) трёхобмоточный трансформатор или автотрансформатор, одна из вторичных обмоток которого соединена в Δ

Рис. 2.5.1. Мнемонические схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов

несимметрии. Свободный вывод источника соединяется с землёй, являющейся точкой нулевого потенциала – началом схемы, куда в конечном итоге будут подключены все свободные выводы ветвей, по которым осуществляется циркуляция токов нулевой последовательности. Другие источники ЭДС (так же как и в схеме обратной последовательности) отсутствуют.

Далее схема строится в направлении одной из заземлённых нейтралей, электрически связанной с точкой КЗ, с учётом параметров нулевой последовательности расположенных на пути элементов. Построение схемы в данном направлении прекращается, в частности, после вторичных обмоток трансформаторов или автотрансформаторов, соединённых в треугольник. При этом свободный конец ветви сразу за трансформатором заземляется. Если вторичная обмотка трансформатора соединена в звезду с заземлённой

или изолированной нейтралью, то для дальнейшего построения следует руководствоваться правилами, разобранными в п. 2.4.

Для формального построения можно воспользоваться предложенными в работе [11] мнемоническими схемами замещения трансформаторов и автотрансформаторов (рис. 2.5.1), которые являются следствием схем, представленных на рис. 2.4.3 и 2.4.4. Положения переключателей на рис. 2.5.1 соответствуют указанным схемам соединения первичной (индекс «I») и вторичных (индексы «II» и «III») обмоток трансформатора или автотрансформатора.

Затем переходят к построению схемы в направлении другой заземлённой нейтрали, электрически связанной с точкой КЗ. Если в сети имеется несколько подобных нейтралей, то в схеме замещения образуется, соответственно, несколько параллельных контуров для токов нулевой последовательности. Напомним, что если нейтраль трансформатора (а в общем случае и генератора, двигателя, нагрузки) заземлена через сопротивление, то это сопротивление должно быть введено в схему замещения нулевой последовательности утроенной величиной.

Пример составления схем замещения нулевой последовательности и её расчёт рассмотрены в Главе 3.

2.6. Порядок расчёта токов несимметричных коротких замыканий

При практических расчётах токов несимметричных коротких замыканий рекомендуется следующий общепринятый порядок их проведения.

1. Для расчётной точки короткого замыкания составляются исходные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, рассчитываются ЭДС источников энергии и индуктивные сопротивления элементов для каждой из последовательностей, приведённые к основной ступени напряжения.

2. Исходные схемы замещения путём эквивалентных преобразований сворачиваются относительно точки КЗ, т. е. схемы приводятся к результирующему виду (см. рис. 2.1.3), что позволяет определить результирующие эквивалентные значения сопротивлений всех трёх последовательностей $x_{1\Sigma}$, $x_{2\Sigma}$, $x_{0\Sigma}$ и ЭДС прямой последовательности $\dot{E}_{1\Sigma}$.

Заметим, что в упрощённых расчётах, когда в качестве параметров элементов учитываются только индуктивные сопротивления, вместо комплексных величин ЭДС и сопротивлений можно использовать их модули. При этом будут определяться также не комплексные токи, а их модули.

3. Для заданного вида КЗ (n) по формулам табл. 2.3.1 рассчитывается величина дополнительного сопротивления $x_{\Delta}^{(n)}$.

4. Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности и в соответствии с выражением (2.3.1) определяется действующее значение тока прямой последовательности в точке КЗ в начальный момент времени:

$$I_{\text{к1}(0)}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}}. \quad (2.6.1)$$

Если расчёт проводится в относительных единицах, то для перехода к именованным полученную величину следует умножить на базисный ток.

5. Для заданного вида КЗ из табл. 2.3.1 выбирается необходимое значение коэффициента $m^{(n)}$ и в соответствии с выражением (2.3.2) рассчитывается действующее значение периодической составляющей тока в точке КЗ в начальный момент времени:

$$I_{п(0)}^{(n)} = I_{к(0)}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{к1(0)}^{(n)}. \quad (2.6.2)$$

Отметим, что обозначения $I_{п}^{(n)}$ и $I_{к}^{(n)}$ здесь и далее будем считать равнозначными и пользоваться ими в зависимости от контекста излагаемого материала.

6. Находится распределение токов по ветвям схемы замещения прямой последовательности при КЗ в рассматриваемой точке, в первую очередь для определения токов прямой последовательности в ветвях источников $I_{1(0)i}^{(n)}$. По методу типовых кривых (см. Глава 1, п. 1.8) определяется действующее значение тока прямой последовательности в точке КЗ в заданный момент времени t :

$$I_{к1(t)}^{(n)} = I_{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^l (\gamma_{(t)i} \cdot I_{*1(0)i}^{(n)}), \quad (2.6.3)$$

где i – номер источника энергии (генератора, эквивалентной системы, компенсатора, электродвигателя); l – число ветвей с источниками энергии; $I_{\sigma} = S_{\sigma} / (\sqrt{3}U_{\sigma})$ – базисный ток, кА; S_{σ} , U_{σ} – выбранные базисные мощность (МВ·А) и напряжение (кВ); $\gamma_{(t)i}$ – коэффициент, определяемый по типовым кривым для момента времени t в зависимости от коэффициента удалённости i -го источника от точки КЗ $\beta_i = I_{*1(0)i}^{(n)} \cdot S_{\sigma} / S_{ном.i}$; $S_{ном.i}$ – номинальная мощность i -го источника, МВ·А; $I_{1(0)i}^{(n)}$ – действующее значение тока прямой последовательности i -го источника при КЗ в рассматриваемой точке, выраженное в кА; $I_{*1(0)i}^{(n)} = I_{1(0)i}^{(n)} / I_{\sigma}$ – то же самое, но в относительных единицах.

Для ветви эквивалентной системы, а также ветвей с генераторами (компенсаторами, электродвигателями), которые находятся на значительном электрическом удалении от точки КЗ ($\beta_i < 2$), коэффициент $\gamma_{(t)i} = 1$, т. е. ток прямой последовательности в этих ветвях с течением времени не меняется.

Для сложной (не радиальной) расчётной схемы существует методика, позволяющая определять величину тока $I_{к1(t)}^{(n)}$, не выполняя распределения тока $I_{к1(0)}^{(n)}$ по всем ветвям с источниками исходной схемы замещения. Достаточно знать ток прямой последовательности только в ветви с ближайшим к точке КЗ генератором, однако при этом используются ещё и дополнительные кривые (подробнее см. [3]).

7. Вычисляется действующее значение периодической составляющей тока в точке КЗ в заданный момент времени t :

$$I_{п(t)}^{(n)} = I_{к(t)}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{к1(t)}^{(n)}. \quad (2.6.4)$$

8. Определяются апериодический ток в точке КЗ в заданный момент времени $i_{a(t)}$ и ударный ток i_y . Поскольку расчёт периодического тока проводился без учёта активных сопротивлений элементов, то эти токи находятся по упрощенной методике, наиболее подходящей для радиальных схем (см. Глава 1, п. 1.7):

$$i_{a(t)}^{(n)} = \sum_{i=1}^m (\sqrt{2} I_{п(0)i}^{(n)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{ai}}}); \quad (2.6.5)$$

$$i_y^{(n)} = \sum_{i=1}^m (K_{yi} \cdot \sqrt{2} I_{п(0)i}^{(n)}), \quad (2.6.6)$$

где m – число независимых ветвей в расчётной схеме, примыкающих к точке КЗ; $I_{п(0)i}^{(n)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ в i -й ветви схемы, примыкающей к точке КЗ; T_{ai} – эквивалентная постоянная времени i -й ветви схемы; K_{yi} – ударный коэффициент i -й ветви схемы.

В случае сложной многоконтурной схемы можно использовать эквивалентные величины постоянной времени $T_{a.эк}$ и ударного коэффициента $K_{y.эк}$:

$$i_{a(t)}^{(n)} = \sqrt{2} I_{п(0)}^{(n)} \cdot e^{-\frac{t}{T_{a.эк}}}; \quad (2.6.7)$$

$$i_y^{(n)} = K_{y.эк} \cdot \sqrt{2} I_{п(0)}^{(n)}. \quad (2.6.8)$$

При этом постоянные времени и ударные коэффициенты как для отдельных ветвей, так и их эквивалентные величины выбираются приближённо по таблицам в зависимости от характерной ветви или места КЗ (см. Приложение 6).

2.7. Расчёт токов несимметричных коротких замыканий в произвольной ветви

В п. 2.6 был подробно рассмотрен порядок расчёта тока несимметричного КЗ в точке повреждения, в частности, приведены выражения для определения действующего значения тока прямой последовательности $I_{к1}^{(n)}$ как для начального ($t = 0$), так и для произвольного момента времени t . При необходимости, можно определить и комплексную величину этого тока, воспользовавшись выражением (2.3.1). Для конкретного вида КЗ по известному току $I_{к1}^{(n)}$ легко найти токи обратной $I_{к2}^{(n)}$ и нулевой $I_{к0}^{(n)}$ последовательностей в точке повреждения, воспользовавшись соотношениями п. 2.2, которые для удобства приведены в табл. 2.7.1.

Зная токи прямой, обратной и нулевой последовательностей, можно определить несимметричные токи фаз, воспользовавшись выражениями (2.1.1), (2.1.9) и (2.1.10). Так, в точке КЗ справедливы соотношения, полученные в п. 2.2 и представленные в табл. 2.7.2 (столбец 2).

Таблица 2.7.1

Соотношения между токами отдельных последовательностей в точке КЗ

Расчётная величина	Однофазное КЗ, индекс (1)	Двухфазное КЗ, индекс (2)	Двухфазное КЗ на землю, индекс (1,1)
$\dot{I}_{\kappa 2}^{(n)}$	$\dot{I}_{\kappa 1}^{(1)}$	$-\dot{I}_{\kappa 1}^{(2)}$	$-\dot{I}_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
$\dot{I}_{\kappa 0}^{(n)}$	$\dot{I}_{\kappa 1}^{(1)}$	0	$-\dot{I}_{\kappa 1}^{(1,1)} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$

Таблица 2.7.2

Соотношения для определения фазных несимметричных токов КЗ

Вид КЗ	Расчётное соотношение	
	в точке КЗ	в произвольной ветви с номером j
1	2	3
Однофазное (замыкание фазы A на землю)	$\dot{I}_{\kappa A}^{(1)} = 3\dot{I}_{\kappa 1}^{(1)}$ $\dot{I}_{\kappa B}^{(1)} = \dot{I}_{\kappa C}^{(1)} = 0$	$\dot{I}_{Aj}^{(1)} = \dot{I}_{1j}^{(1)} + \dot{I}_{2j}^{(1)} + \dot{I}_{0j}^{(1)}$ $\dot{I}_{Bj}^{(1)} = a^2 \dot{I}_{1j}^{(1)} + a \dot{I}_{2j}^{(1)} + \dot{I}_{0j}^{(1)}$ $\dot{I}_{Cj}^{(1)} = a \dot{I}_{1j}^{(1)} + a^2 \dot{I}_{2j}^{(1)} + \dot{I}_{0j}^{(1)}$
Двухфазное (замыкание фаз B и C)	$\dot{I}_{\kappa A}^{(2)} = 0$ $\dot{I}_{\kappa B}^{(2)} = -\dot{I}_{\kappa C}^{(2)} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{\kappa 1}^{(2)}$	$\dot{I}_{Aj}^{(2)} = \dot{I}_{1j}^{(2)} + \dot{I}_{2j}^{(2)}$ $\dot{I}_{Bj}^{(2)} = a^2 \dot{I}_{1j}^{(2)} + a \dot{I}_{2j}^{(2)}$ $\dot{I}_{Cj}^{(2)} = a \dot{I}_{1j}^{(2)} + a^2 \dot{I}_{2j}^{(2)}$
Двухфазное на землю (замыкание фаз B и C на землю)	$\dot{I}_{\kappa A}^{(1,1)} = 0$ $\dot{I}_{\kappa B}^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa 1}^{(1,1)} (a^2 - a \cdot \alpha_2 - \alpha_0)$ $\dot{I}_{\kappa C}^{(1,1)} = \dot{I}_{\kappa 1}^{(1,1)} (a - a^2 \cdot \alpha_2 - \alpha_0)$ $\alpha_2 = x_{0\Sigma} / (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})$ $\alpha_0 = x_{2\Sigma} / (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})$	$\dot{I}_{Aj}^{(1,1)} = \dot{I}_{1j}^{(1,1)} + \dot{I}_{2j}^{(1,1)} + \dot{I}_{0j}^{(1,1)}$ $\dot{I}_{Bj}^{(1,1)} = a^2 \dot{I}_{1j}^{(1,1)} + a \dot{I}_{2j}^{(1,1)} + \dot{I}_{0j}^{(1,1)}$ $\dot{I}_{Cj}^{(1,1)} = a \dot{I}_{1j}^{(1,1)} + a^2 \dot{I}_{2j}^{(1,1)} + \dot{I}_{0j}^{(1,1)}$

Соотношения между токами, характерные для точки КЗ, могут меняться в зависимости от структуры рассматриваемой сети. Это зависит, в частности, от наличия участков с частичным разземлением нейтралей трансформаторов, присутствия в сети трансформаторов, у которых фазы одной из обмоток соединены по схеме звезды, а другой – треугольника. При переходе через такой трансформатор токи меняются не только по величине (за счёт коэффициента трансформации), но и по фазе из-за изменения схемы соединения обмоток.

Для расчёта токов в произвольных ветвях расчётной схемы необходимо сначала выполнить распределение по ветвям токов каждой из симметричных составляющих в отдельности, а затем уже находить несимметричные токи фаз как геометрические суммы (см. табл. 2.7.2, столбец 3). Важнейшим моментом в распределении токов симметричных составляющих является их трансформация, которую удобно выполнять, используя комплексные коэффициенты трансформации [2]:

– для прямой последовательности

$$\dot{I}_{a1}^{(n)} = \dot{I}_{A1}^{(n)} \cdot k_T e^{-j30^\circ \cdot N}; \quad (2.7.1)$$

– для обратной последовательности

$$\dot{I}_{a2}^{(n)} = \dot{I}_{A2}^{(n)} \cdot k_T e^{j30^\circ \cdot N}, \quad (2.7.2)$$

где $\dot{I}_{A1}^{(n)}$ и $\dot{I}_{A2}^{(n)}$ – токи прямой и обратной последовательностей на стороне обмотки высшего напряжения (ВН) (той, откуда осуществляется переход); $\dot{I}_{a1}^{(n)}$ и $\dot{I}_{a2}^{(n)}$ – токи прямой и обратной последовательностей на стороне обмотки низшего (НН) или среднего (СН) напряжения; $k_T = U_{ВН}/U_{НН}$ (или $k_T = U_{ВН}/U_{СН}$) – коэффициент трансформации; N – номер группы соединения обмоток трансформатора.

Следует особо подчеркнуть, что если токи выражены в относительных единицах, то при их трансформации должны учитываться только угловые сдвиги, обусловленные группой соединения обмоток, а k_T полагается равным единице.

В отечественной практике наибольшее распространение получили трансформаторы и автотрансформаторы со следующими группами соединения:

- двухобмоточные **Y/Y-0**, **Y/Y₀-0**, **Y₀/Y₀-0**, **Δ/Δ-0**, **Y/Δ-11**, **Y₀/Δ-11**, **Δ/Y₀-11**;
- трёхобмоточные **Y₀/Y₀/Δ-0-11**; **Y₀/Y/Δ-0-11**;
- с расщеплённой обмоткой НН **Y₀/Δ/Δ-11-11**.

Наиболее простые соотношения между первичными и вторичными токами получаются при $N = 0$ (или 12), что соответствует схемам соединения обмоток **Δ/Δ**, **Y/Y** и т. п. В этом случае угловые смещения вообще отсутствуют. При этом, когда имеется соединение **Y₀/Y₀**, должна быть учтена трансформируемая составляющая тока нулевой последовательности.

Рассмотрим трансформацию токов при соединении обмоток в трансформаторе по схеме **Y₀/Δ-11** при однофазном и двухфазном КЗ со стороны обмотки ВН (рис.2.7.1). Для определения токов симметричных составляющих за обмоткой НН, соединённой в треугольник, воспользуемся формулами (2.7.1) и (2.7.2):

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1}^{(n)} &= \dot{I}_{A1}^{(n)} \cdot k_T e^{-j30^\circ \cdot 11} = \dot{I}_{A1}^{(n)} \cdot k_T e^{-j330^\circ} = \dot{I}_{A1}^{(n)} \cdot k_T e^{j30^\circ}; \\ \dot{I}_{a2}^{(n)} &= \dot{I}_{A2}^{(n)} \cdot k_T e^{j30^\circ \cdot 11} = \dot{I}_{A2}^{(n)} \cdot k_T e^{j330^\circ} = \dot{I}_{A2}^{(n)} \cdot k_T e^{-j30^\circ} = \dot{I}_{A1}^{(n)} \cdot k_T e^{-j30^\circ}, \end{aligned}$$

т. е. при переходе через трансформатор происходит поворот тока прямой последовательности на 30° против часовой стрелки, а тока обратной последовательности – на 30° по часовой стрелке (см. рис. 2.7.1, в). Очевидно, что при обратном переходе углы поворота токов меняют свои знаки на противоположные.

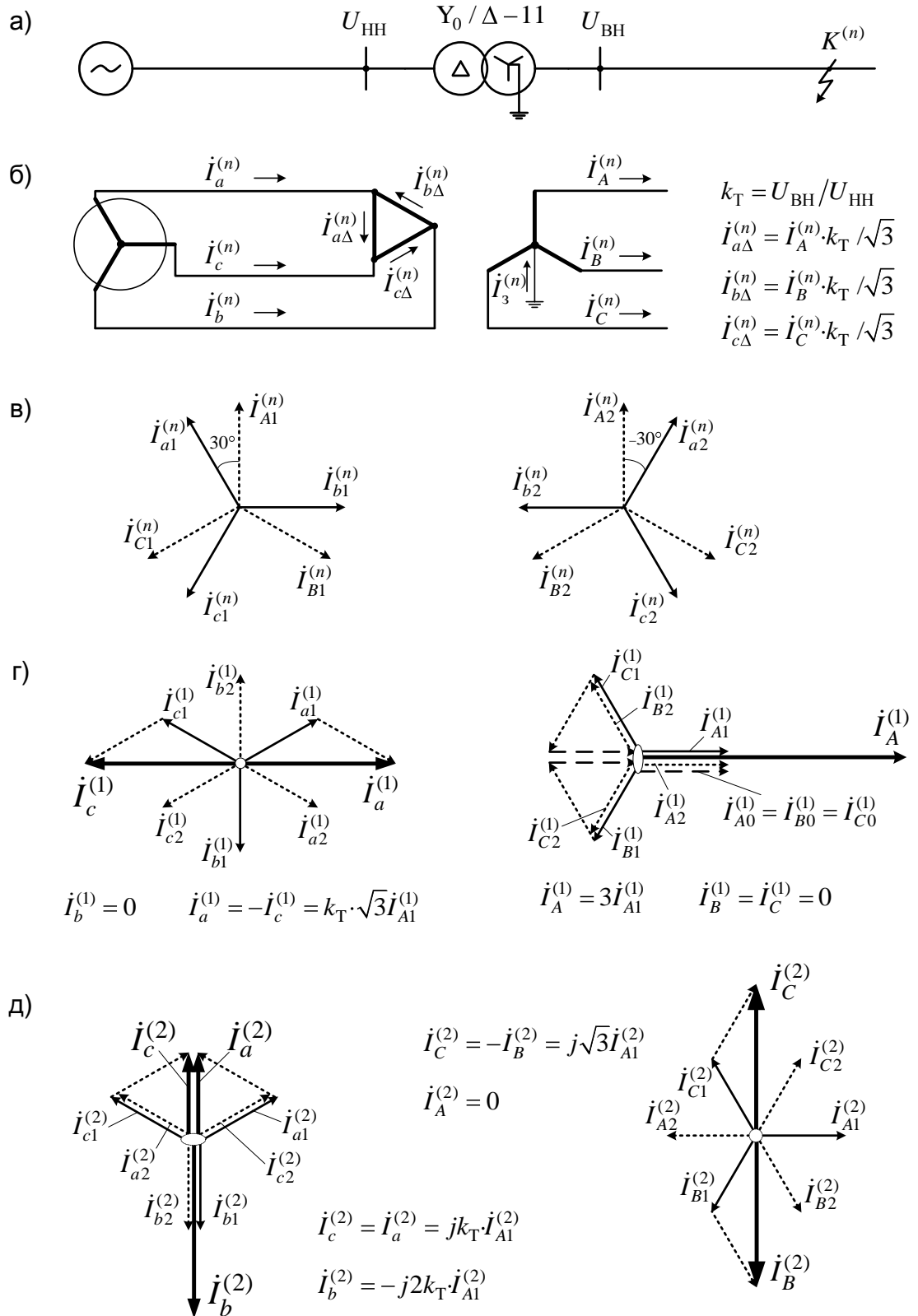


Рис. 2.7.1. Схема сети в однофазном (а) и трёхфазном (б) исполнении, векторные диаграммы трансформации токов прямой и обратной последовательностей (в), а также полных токов при однофазном (г) и двухфазном (д) КЗ

В случае однофазного КЗ ток нулевой последовательности, трансформируясь в фазы собранной в треугольник обмотки НН, замыкается внутри этой обмотки и за её пределы не выходит. При двухфазном КЗ тока нулевой последовательности во-

обще нет. Поэтому за обмоткой НН такого трансформатора токи фаз $\dot{I}_a^{(n)}$, $\dot{I}_b^{(n)}$, $\dot{I}_c^{(n)}$ формируются только из токов прямой и обратной последовательностей (см. рис. 2.7.1, г, д). При этом изменяются соотношения между несимметричными токами в фазах. Так, в случае замыкания на землю фазы A (однофазное КЗ) со стороны обмотки ВН, за трансформатором появляется ток в неповреждённой фазе C , находящийся в противофазе с током фазы A . При замыкании в том же месте фаз B и C (двухфазное КЗ), за трансформатором токи протекают во всех трёх фазах, причём в фазах B и C они различаются в два раза. Токи в самих фазах обмотки НН, соединённой в треугольник, находятся по выражениям:

$$\dot{I}_{a\Delta}^{(n)} = \dot{I}_A^{(n)} \cdot k_T / \sqrt{3}; \quad \dot{I}_{b\Delta}^{(n)} = \dot{I}_B^{(n)} \cdot k_T / \sqrt{3}; \quad \dot{I}_{c\Delta}^{(n)} = \dot{I}_C^{(n)} \cdot k_T / \sqrt{3}.$$

Проведённый анализ был выполнен для металлического КЗ и учёте только индуктивных сопротивлений элементов. При таких допущениях для однофазного и двухфазного коротких замыканий (которые наиболее часто и подлежат расчёту) является характерным, что несимметричные токи в фазах как до трансформатора, так и после него либо совпадают по фазе, либо находятся в противофазе (см. рис. 2.7.1, г, д). Это позволяет для простых схем, если не требуется знать истинные фазы токов, выполнять приблизительный расчёт, используя только абсолютные значения (модули) комплексных токов, а вместо геометрической суммы токов находить алгебраическую. Соотношения для определения **величин токов** при однофазном и двухфазном КЗ представлены в табл. 2.7.3.

Контроль правильности распределения тока КЗ по фазам расчётной схемы можно проводить по следующим критериям: сумма токов в любом узле схемы должна равняться нулю; в каждой электрически связанной части схемы алгебраическая сумма токов через нейтрали трансформаторов и в землю в точке КЗ должна равняться нулю.

Таблица 2.7.3

Соотношения для приближенного определения величин несимметричных токов

Вид КЗ	Расчётные соотношения (при условии, что во всех ветвях $I_{A2}^{(n)} \approx I_{A1}^{(n)}$)		
	За трансформатором с $N = 0$ (при однофазном КЗ только для $\mathbf{Y}_0/\mathbf{Y}_0$) ($k_T = U_{ВН} / U_{НН}$)	За трансформатором со схемой $\mathbf{Y}_0/\Delta\text{-}11$ ($k_T = U_{ВН} / U_{НН}$)	
		КЗ со стороны \mathbf{Y}_0 (переход $\mathbf{Y}_0 \rightarrow \Delta$)	КЗ со стороны Δ (переход $\Delta \rightarrow \mathbf{Y}_0$)
Однофазное (замыкание фазы A на землю)	$I_a^{(1)} = k_T(I_{A1}^{(1)} + I_{A2}^{(1)} + I_{A0}^{(1)})$ $I_b^{(1)} = I_{A0}^{(1)} - I_{A1}^{(1)}$ $I_c^{(1)} = I_{A0}^{(1)} - I_{A1}^{(1)}$	$I_a^{(1)} = k_T \cdot \sqrt{3} I_{A1}^{(1)}$ $I_b^{(1)} = 0$ $I_c^{(1)} = -k_T \cdot \sqrt{3} I_{A1}^{(1)}$	—
Двухфазное (замыкание фаз B и C)	$I_a^{(2)} = 0$ $I_b^{(2)} = -k_T \cdot \sqrt{3} I_{A1}^{(2)}$ $I_c^{(2)} = k_T \cdot \sqrt{3} I_{A1}^{(2)}$	$I_a^{(2)} = k_T \cdot I_{A1}^{(2)}$ $I_b^{(2)} = -k_T \cdot 2 I_{A1}^{(2)}$ $I_c^{(2)} = k_T \cdot I_{A1}^{(2)}$	$I_A^{(2)} = -I_{a1}^{(2)} / k_T$ $I_B^{(2)} = -I_{a1}^{(2)} / k_T$ $I_C^{(2)} = 2 I_{a1}^{(2)} / k_T$

Глава 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

3.1. Расчет тока при трёхфазном коротком замыкании

Рассчитаем режим трехфазного короткого замыкания сети (рис. 3.1.1) в точках К7 и К9. Типы и параметры элементов сети представлены в табл. 3.1.1. При отсутствии параметров, их можно взять из литературы, например, [10, 12–14].

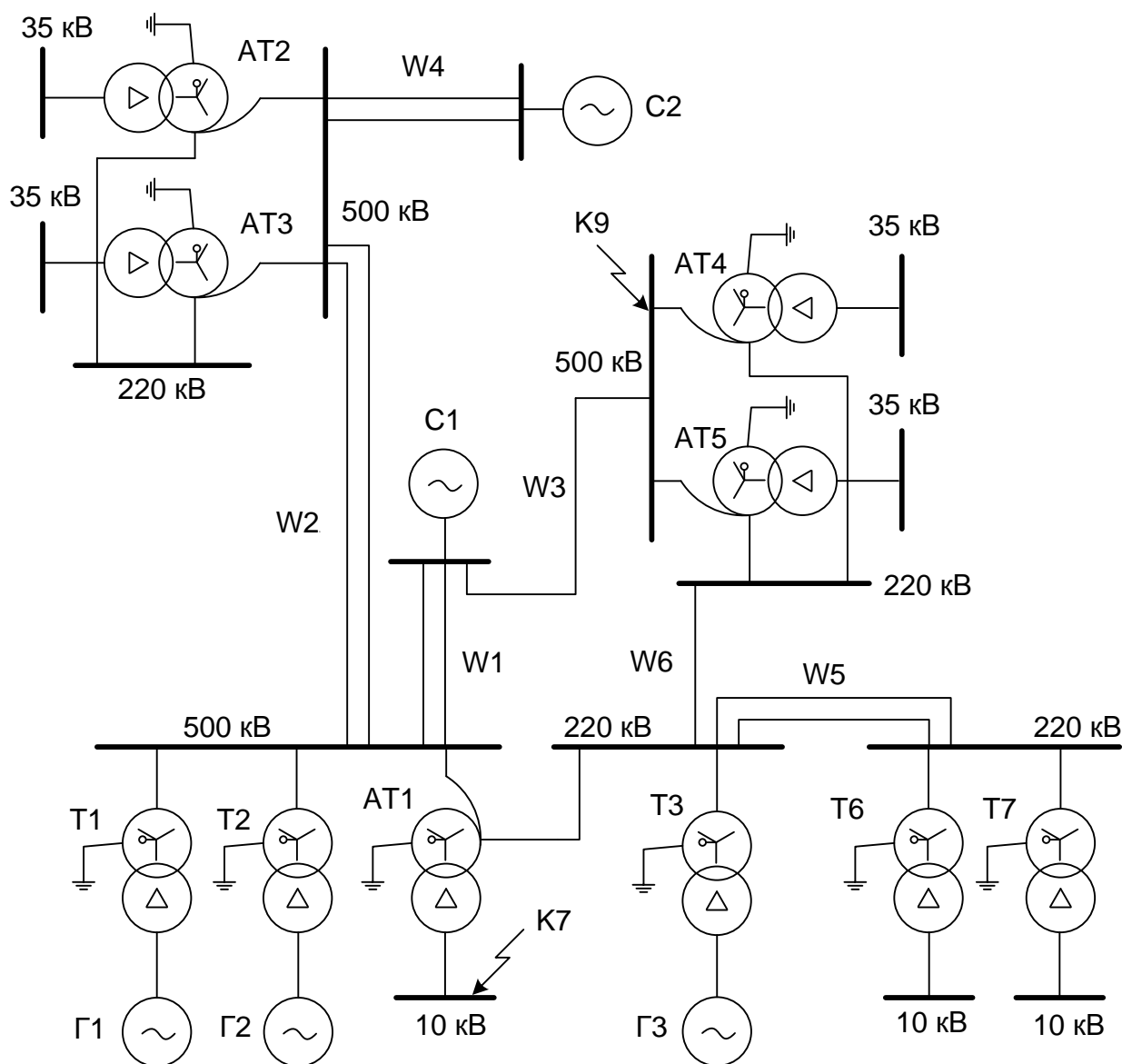


Рис. 3.1.1. Расчётная схема сети

Проведем расчет в относительных единицах при базисной мощности $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и базисном напряжении равном среднему номинальному напряжению ступени КЗ $U_{\text{б}} = U_{\text{ср.КЗ}}$.

Схема замещения для расчета трехфазного КЗ приведена на рис. 3.1.2. В ней не учтены параметры удаленных от точек КЗ нагрузок, находящихся за ступенями трансформации. Также отсутствуют параметры автотрансформаторов АТ2, АТ3 и обмоток низшего напряжения АТ4 и АТ5, трансформаторов Т6, Т7 и линии W5, так как ток короткого замыкания через эти элементы не протекает при трёхфазном КЗ в указанных расчётных точках.

Таблица 3.1.1

Элементы расчётной схемы и их параметры

Элемент	Тип (марка)	Параметры
Генераторы Г1, Г2, Г3	ТГВ-300	$P_{\text{НОМ}} = 300 \text{ МВт}$; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,85$; $U_{\text{НОМ}} = 20 \text{ кВ}$; $x''_{d(\text{НОМ})} = 0,195$
Автотрансформаторы АТ1–АТ5	АТДЦТН-250000/500	$S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}$; $U_{\text{ВННОМ}} = 500 \text{ кВ}$; $U_{\text{СННОМ}} = 230 \text{ кВ}$; $U_{\text{НННОМ}} = 10,5(38,5) \text{ кВ}$; $u_{\text{кВ-С}} = 13\%$; $u_{\text{кВ-Н}} = 33\%$; $u_{\text{кС-Н}} = 18,5\%$
Трансформаторы Т1–Т3	ТДЦ-400000/500 ТДЦ-400000/220	$S_{\text{НОМ}} = 400 \text{ МВА}$; $U_{\text{ВННОМ}} = 500(230) \text{ кВ}$; $U_{\text{НННОМ}} = 20 \text{ кВ}$; $u_{\text{к}} = 12,6(11)\%$
Трансформаторы Т6, Т7	ТРДН-40000/220	$S_{\text{НОМ}} = 40 \text{ МВА}$; $U_{\text{ВННОМ}} = 230 \text{ кВ}$; $U_{\text{НННОМ}} = 11 \text{ кВ}$; $u_{\text{к}} = 12\%$
Линии W1–W4	$3 \times \text{АС} - 400 / 51$ с грозозащитным тросом, заземленным с одного конца участка	$x_{\text{ПОГ}} = 0,303 \text{ Ом/км}$; $l_{W1} = 200 \text{ км}$, $l_{W2} = 250 \text{ км}$, $l_{W4} = 125 \text{ км}$, по две параллельные линии каждая; $l_{W3} = 200 \text{ км}$ одна линия
Линия W5, W6	$\text{АС} - 300 / 39$ со стальным грозозащитным тросом	$x_{\text{ПОГ}} = 0,429 \text{ Ом/км}$; $l_{W5} = 75 \text{ км}$, одна двухцепная линия; $l_{W6} = 75 \text{ км}$, одна одноцепная линия
Системы С1, С2	Эквивалентная система	Мощность трехфазного КЗ на шинах эквивалентной системы: $S_{\text{кС1}}^{(3)} = 7000 \text{ МВА}$; $S_{\text{кС2}}^{(3)} = 3000 \text{ МВА}$. Среднее номинальное напряжение системы $U_{\text{ср.С1}} = U_{\text{ср.С2}} = 500 \text{ кВ}$. Соотношение сопротивлений нулевой и прямой последовательностей $x_0/x_1 = 3$

Найдём параметры схемы замещения, приведённые к одной ступени напряжения по средним коэффициентам трансформации.

Для генераторов Г1, Г2, Г3 при предшествующем номинальном режиме:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x''_{d(\text{НОМ})} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = x''_{d(\text{НОМ})} \frac{S_6}{P_{\text{НОМ}}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,195 \cdot \frac{1000}{300} \cdot 0,85 = 0,553;$$

$$E''_3 = E''_4 = E''_5 = \sqrt{(I_0 x''_{d(\text{НОМ})} \cos \varphi_0)^2 + (U_0 + I_0 x''_{d(\text{НОМ})} \sin \varphi_0)^2} = \\ = \sqrt{(1 \cdot 0,195 \cdot \cos 31,79^\circ)^2 + (1 + 1 \cdot 0,195 \cdot \sin 31,79^\circ)^2} = 1,115.$$

Для эквивалентных систем С1, С2 соответственно:

$$x_5 = \frac{S_6}{S_{\text{КС1}}^{(3)}} = \frac{1000}{7000} = 0,143; \quad E_1 = 1;$$

$$x_4 = \frac{S_6}{S_{\text{КС2}}^{(3)}} = \frac{1000}{3000} = 0,333; \quad E_2 = 1.$$

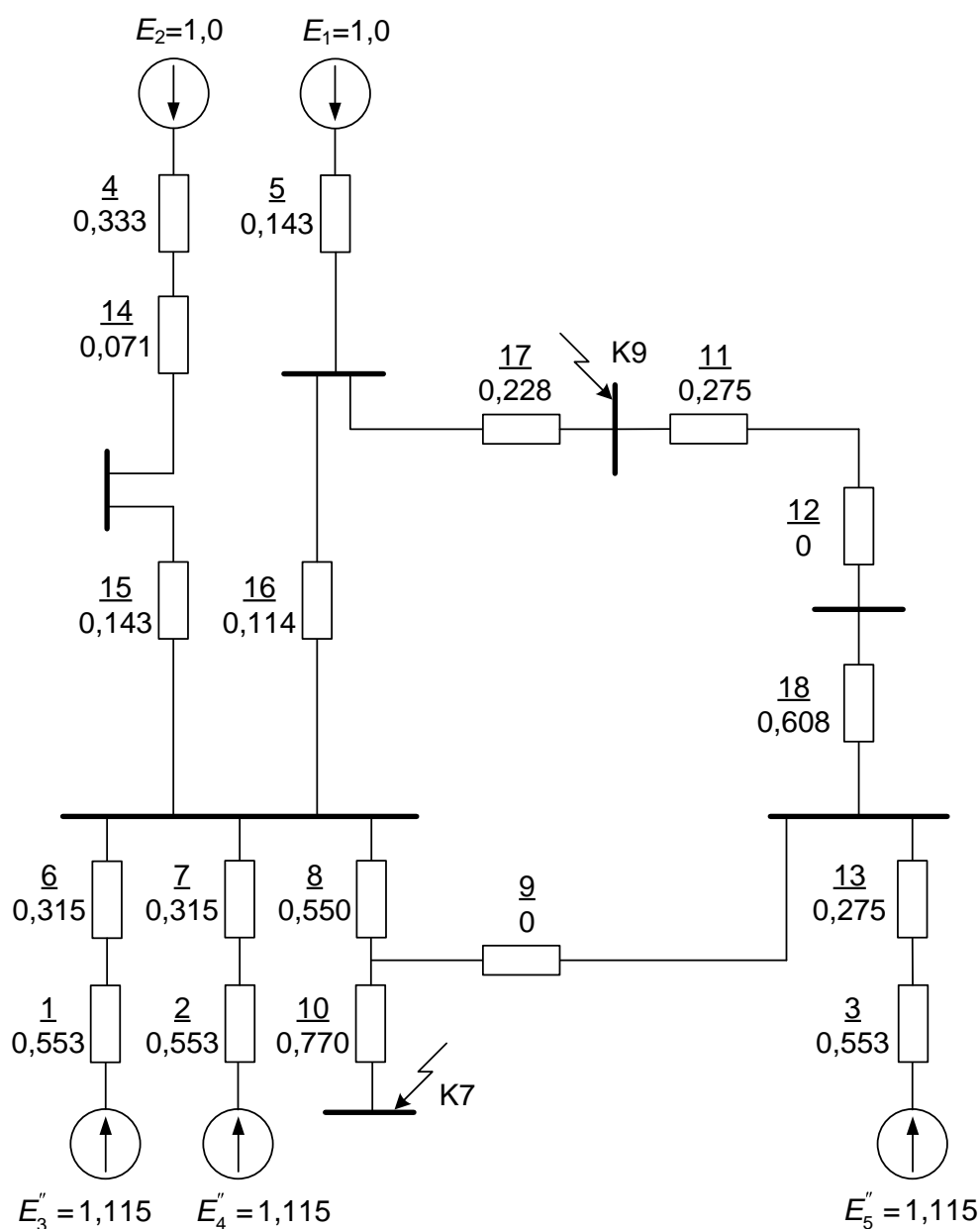


Рис. 3.1.2. Схема замещения сети для расчета трехфазных КЗ

Для трансформаторов Т1, Т2, Т3:

$$x_6 = x_7 = \frac{u_k \%}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{12,6}{100} \cdot \frac{1000}{400} = 0,315;$$

$$x_{13} = \frac{u_k \%}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{400} = 0,275.$$

Для автотрансформаторов АТ1, АТ4, АТ5:

$$x_8 = \frac{1}{100} \cdot \frac{u_{\text{KB-H}} + u_{\text{KB-C}} - u_{\text{KC-H}}}{2} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{100} \cdot \frac{33 + 13 - 18,5}{2} \cdot \frac{1000}{250} = 0,550;$$

$$x_9 = \frac{1}{100} \cdot \frac{u_{\text{KB-C}} + u_{\text{KC-H}} - u_{\text{KB-H}}}{2} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{100} \cdot \frac{13 + 18,5 - 33}{2} \cdot \frac{1000}{250} = -0,03 \approx 0;$$

$$x_{10} = \frac{1}{100} \cdot \frac{u_{\text{KB-H}} + u_{\text{KC-H}} - u_{\text{KB-C}}}{2} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{100} \cdot \frac{33 + 18,5 - 13}{2} \cdot \frac{1000}{250} = 0,770;$$

$$x_{11} = \frac{x_8}{2} = \frac{0,550}{2} = 0,275; \quad x_{12} = \frac{x_9}{2} = 0.$$

Параметры линий:

$$x_{14} = \frac{1}{2} x_{\text{пог}} l_{W4} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,303 \cdot 125 \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,071;$$

$$x_{15} = \frac{1}{2} x_{\text{пог}} l_{W2} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,303 \cdot 250 \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,143;$$

$$x_{16} = \frac{1}{2} x_{\text{пог}} l_{W1} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,303 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,114;$$

$$x_{17} = x_{\text{пог}} l_{W3} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = 0,303 \cdot 200 \cdot \frac{1000}{515^2} = 0,228;$$

$$x_{18} = x_{\text{пог}} l_{W6} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = 0,429 \cdot 75 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,608.$$

Расчет тока трехфазного короткого замыкания в точке К7

Проведем преобразование исходной схемы замещения (см. рис. 3.1.2) путем ее сворачивания относительно точки К7. Сложив последовательно соединённые сопротивления, определим эквивалентные сопротивления ветвей генераторов Г1, Г2, Г3 и системы С1:

$$x_{19} = x_{20} = x_1 + x_6 = 0,553 + 0,315 = 0,867;$$

$$x_{21} = x_3 + x_{13} = 0,553 + 0,275 = 0,828;$$

$$x_{22} = x_4 + x_{14} + x_{15} = 0,333 + 0,071 + 0,143 = 0,548,$$

а также сопротивление

$$x_{23} = x_{17} + x_{11} + x_{12} + x_{18} = 0,228 + 0,275 + 0 + 0,608 = 1,112.$$

В результате проведённых упрощений получим схему, представленную на рис. 3.1.3.

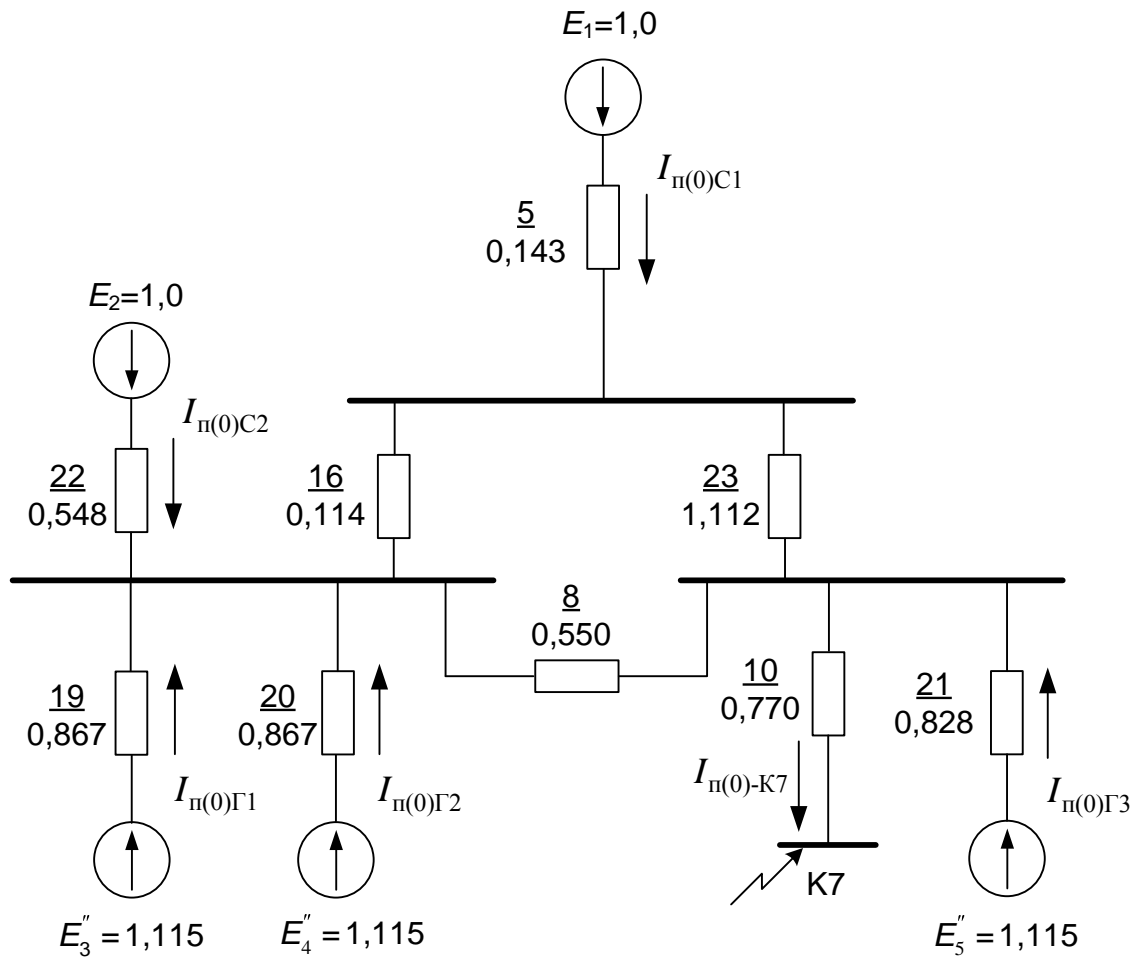


Рис. 3.1.3. Схема замещения для КЗ в точке К7 после первого этапа преобразования

Преобразуем треугольник сопротивлений $x_{16} - x_{23} - x_8$ в звезду $x_{25} - x_{26} - x_{27}$:

$$x_{25} = \frac{x_{16}x_{23}}{x_{16} + x_{23} + x_8} = \frac{0,114 \cdot 1,112}{0,114 + 1,112 + 0,550} = 0,072 ;$$

$$x_{26} = \frac{x_{16}x_8}{x_{16} + x_{23} + x_8} = \frac{0,114 \cdot 0,550}{0,114 + 1,112 + 0,550} = 0,035 ;$$

$$x_{27} = \frac{x_{23}x_8}{x_{16} + x_{23} + x_8} = \frac{1,112 \cdot 0,550}{0,114 + 1,112 + 0,550} = 0,344 .$$

Заменим ветви с источниками E_2 , E_3'' , E_4'' на эквивалентную ветвь:

$$x_{24} = \left(\frac{1}{x_{22}} + \frac{1}{x_{19}} + \frac{1}{x_{20}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,548} + \frac{1}{0,867} + \frac{1}{0,867} \right)^{-1} = 0,242 ;$$

$$E_6 = x_{24} \left(\frac{E_2}{x_{22}} + \frac{E_3''}{x_{19}} + \frac{E_4''}{x_{20}} \right) = 0,242 \cdot \left(\frac{1,0}{0,548} + \frac{1,115}{0,867} + \frac{1,115}{0,867} \right) = 1,064 .$$

Соответствующая схема замещения приведена на рис. 3.1.4, а.

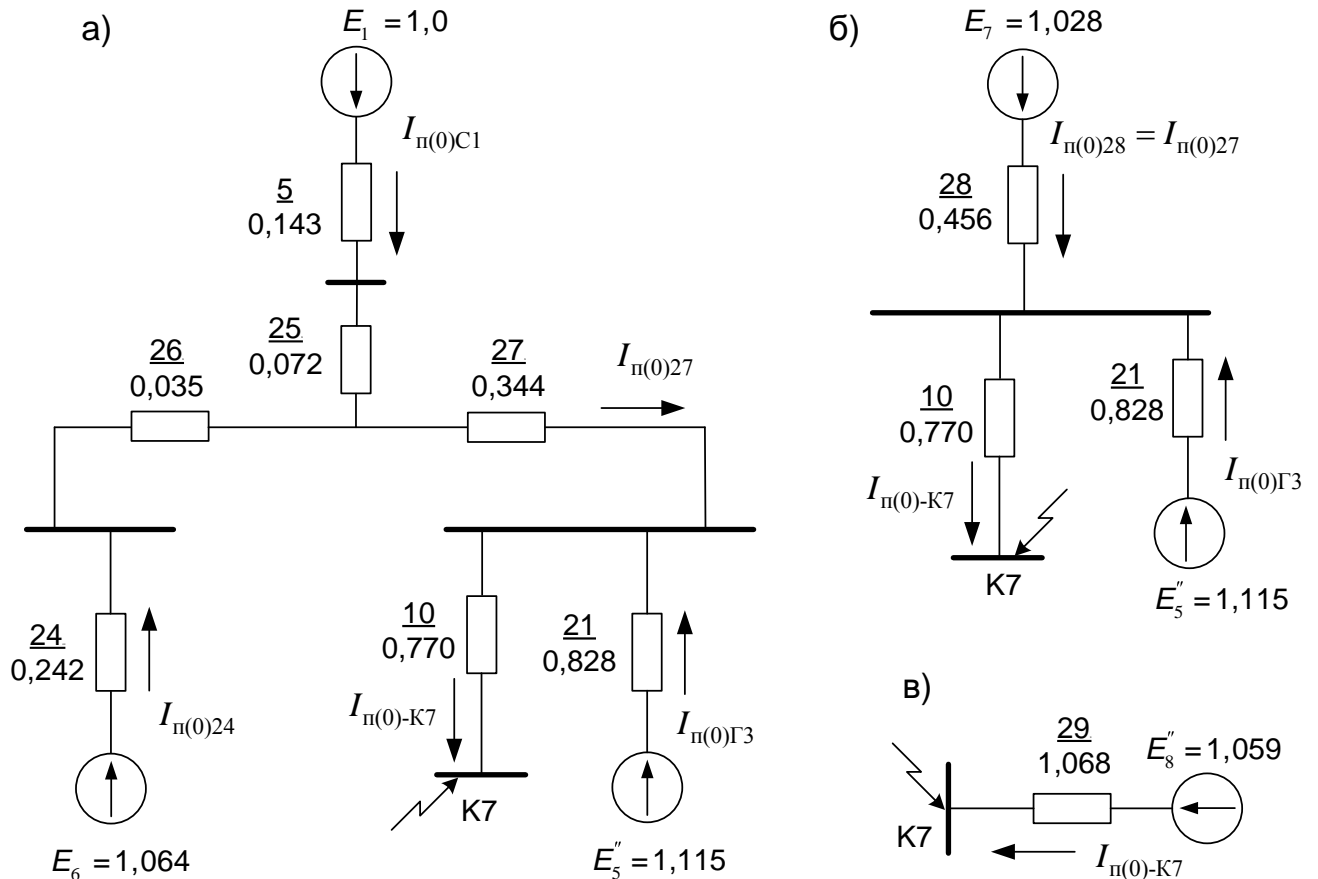


Рис. 3.1.4. Схема замещения для КЗ в точке К7 на различных этапах преобразования

Заменяем ветви с источниками ЭДС E_1 , E_6 и с сопротивлением x_{27} на эквивалентную ветвь (см. рис. 3.1.4, б):

$$x_{28} = \left(\frac{1}{x_{24} + x_{26}} + \frac{1}{x_5 + x_{25}} \right)^{-1} + x_{27} = \left(\frac{1}{0,242 + 0,035} + \frac{1}{0,143 + 0,072} \right)^{-1} + 0,344 = 0,465;$$

$$E_7 = (x_{28} - x_{27}) \left(\frac{E_6}{x_{24} + x_{26}} + \frac{E_1}{x_{25} + x_5} \right) = \\ = (0,465 - 0,344) \cdot \left(\frac{1,064}{0,242 + 0,035} + \frac{1,0}{0,143 + 0,072} \right) = 1,028.$$

Определим результирующее сопротивление и ЭДС (см. рис. 3.1.4, в):

$$x_{29} = \left(\frac{1}{x_{28}} + \frac{1}{x_{21}} \right)^{-1} + x_{10} = \left(\frac{1}{0,465} + \frac{1}{0,828} \right)^{-1} + 0,770 = 1,068;$$

$$E_8'' = (x_{29} - x_{10}) \left(\frac{E_7}{x_{28}} + \frac{E_5''}{x_{21}} \right) = (1,068 - 0,770) \cdot \left(\frac{1,028}{0,465} + \frac{1,115}{0,828} \right) = 1,059.$$

Рассчитаем базисный ток при $U_6 = U_{\text{ср.К7}}$ и определим действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в точке К7 в начальный момент времени в относительных и именованных единицах:

$$I_{6-K7} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{cp.K7}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,986 \text{ кА};$$

$$I_{*п(0)-K7} = E_8 / x_{29} = 1,059 / 1,068 = 0,992 ;$$

$$I_{п(0)-K7} = I_{*п(0)-K7} \cdot I_6 = 0,992 \cdot 54,986 = 54,546 \text{ кА}.$$

Используя изображения схемы замещения на различных этапах преобразования, определим токи в её ветвях, выраженные в относительных единицах.

Для схемы на рис. 3.1.4, б:

$$I_{п(0)28} = I_{*п(0)-K7} \frac{x_{29} - x_{10}}{x_{28}} + \frac{E_7 - E_8}{x_{28}} = 0,992 \cdot \frac{1,068 - 0,770}{0,465} + \frac{1,028 - 1,059}{0,465} = 0,568;$$

$$I_{п(0)Г3} = I_{*п(0)-K7} \frac{x_{29} - x_{10}}{x_{21}} + \frac{E_5'' - E_8}{x_{21}} = 0,992 \cdot \frac{1,068 - 0,770}{0,828} + \frac{1,115 - 1,059}{0,828} = 0,424.$$

$$\text{Проверка: } I_{п(0)28} + I_{п(0)Г3} = 0,568 + 0,424 = 0,992 = I_{*п(0)-K7}.$$

Для схемы на рис. 3.1.4, а, учитывая, что $I_{п(0)27} = I_{*п(0)28}$:

$$I_{п(0)C1} = I_{п(0)27} \frac{x_{28} - x_{27}}{x_5 + x_{25}} + \frac{E_1 - E_7}{x_5 + x_{25}} = 0,568 \cdot \frac{0,465 - 0,344}{0,143 + 0,072} + \frac{1,0 - 1,028}{0,143 + 0,072} = 0,190;$$

$$I_{п(0)24} = I_{п(0)27} \frac{x_{28} - x_{27}}{x_{24} + x_{26}} + \frac{E_6'' - E_7}{x_{24} + x_{26}} = 0,568 \cdot \frac{0,465 - 0,344}{0,242 + 0,035} + \frac{1,064 - 1,028}{0,242 + 0,035} = 0,378.$$

$$\text{Проверка: } I_{п(0)C1} + I_{п(0)24} = 0,190 + 0,378 = 0,568 = I_{п(0)27}.$$

Для схемы на рис. 3.1.3, учитывая, что $I_{п(0)24} = I_{п(0)C2} + I_{п(0)Г1} + I_{п(0)Г2}$:

$$I_{п(0)C2} = I_{п(0)24} \frac{x_{24}}{x_{22}} + \frac{E_2 - E_6}{x_{22}} = 0,378 \cdot \frac{0,242}{0,548} + \frac{1,0 - 1,064}{0,548} = 0,050 ;$$

$$I_{п(0)Г2} = I_{п(0)Г1} = I_{п(0)24} \frac{x_{24}}{x_{19}} + \frac{E_3'' - E_6}{x_{19}} = 0,378 \cdot \frac{0,242}{0,867} + \frac{1,115 - 1,064}{0,867} = 0,164.$$

$$\text{Проверка: } I_{п(0)C2} + I_{п(0)Г2} + I_{п(0)Г1} = 0,050 + 0,164 + 0,164 = 0,378 = I_{п(0)24}.$$

Вычислим для генераторов Г1, Г2, Г3 коэффициенты удалённости β_i :

$$\beta_{Г2} = \beta_{Г1} = I_{п(0)Г1} \frac{S_6}{P_{ном.Г1} / \cos \varphi_{ном.Г1}} = 0,164 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 0,465 ;$$

$$\beta_{Г3} = I_{п(0)Г3} \frac{S_6}{P_{ном.Г3} / \cos \varphi_{ном.Г3}} = 0,424 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 1,202.$$

У всех генераторов коэффициенты удалённости β_i оказались меньше 2. Это означает (см. п. 1.8), что КЗ в точке К7 по отношению ко всем источникам энергии (генераторам Г1–Г3 и эквивалентным системам С1 и С2) является удалённым. Поэтому затухание периодической составляющей тока отсутствует, и её дейст-

вующее значение не зависит от времени (в частности, для момента времени $t=0,3$ с), оставаясь равным начальному значению:

$$I_{п(0,3)-K7} = I_{п(0)-K7} = 54,546 \text{ кА}.$$

Рассчитаем ударный ток и апериодическую составляющую тока КЗ, используя усреднённые значения постоянных времени и ударных коэффициентов из табл. П6.2 (см. **Приложение 6**). При этом учтём, что точка короткого замыкания К7 отделена от всех источников обмоткой низшего напряжения 10 кВ автотрансформатора АТ1 типа АТДЦТН-250000/500 (см. рис. 3.1.1), а в схеме замещения находится за общим сопротивлением x_{10} (см. рис. 3.1.2). Поэтому можно принять, что эквивалентная ветвь всех источников (см. рис. 3.1.4, в) имеет следующие усреднённые параметры (как «система, связанная со сборными шинами РУ НН через трансформатор мощностью 80 МВА и выше»):

$$T_a=0,15 \text{ с}; \quad K_y=1,935.$$

Тогда ударный ток трёхфазного КЗ в точке К7

$$i_{y-K7} = \sqrt{2} I_{п(0)-K7} \cdot K_y = \sqrt{2} \cdot 54,546 \cdot 1,935 = 149 \text{ кА},$$

а выражение для апериодической составляющей тока КЗ

$$i_{a-K7}(t) = \sqrt{2} I_{п(0)-K7} e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 54,546 e^{-\frac{t}{0,15}} = 77,14 e^{-\frac{t}{0,15}}, \text{ кА}.$$

Значения апериодической составляющей для моментов времени $t=0$ и $t=0,3$ с:

$$i_{a-K7}(0) = 77,14 \cdot e^{-\frac{0}{0,15}} = 77,14 \text{ кА}; \quad i_{a-K7}(0,3) = 77,14 \cdot e^{-\frac{0,3}{0,15}} = 10,44 \text{ кА}.$$

Расчет тока трехфазного короткого замыкания в точке К9

Исходную схему замещения (см. рис. 3.1.2) преобразуем относительно точки К9 к четырехугольнику с отходящими ветвями (рис. 3.1.5). При этом было учтено, что сопротивление $x_9 = 0$, а по сопротивлению x_{10} ток при трёхфазном КЗ в точке К9 не протекает. Используемые в схеме эквивалентные сопротивление x_{24} и ЭДС E_6 были найдены выше (см. рис. 3.1.3 и 3.1.4, а), а эквивалентное сопротивление x_{30} равно сумме последовательно соединённых сопротивлений:

$$x_{30} = x_{11} + x_{12} + x_{18} = 0,275 + 0 + 0,608 = 0,883.$$

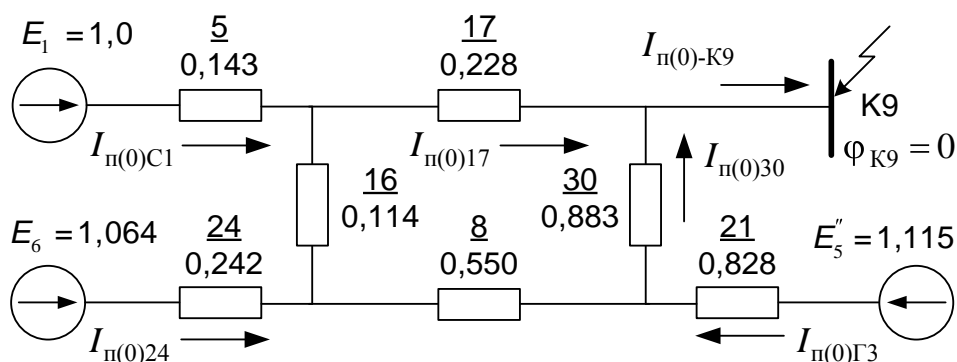


Рис. 3.1.5. Схема замещения для расчета трёхфазного КЗ в точке К9 после первого этапа преобразований

Звезду сопротивлений $x_{16} - x_{24} - x_8$ преобразуем в треугольник с сопротивлениями в ветвях (рис. 3.1.6, а):

$$x_{31} = x_{16} + x_{24} + \frac{x_{16}x_{24}}{x_8} = 0,114 + 0,242 + \frac{0,114 \cdot 0,242}{0,550} = 0,406;$$

$$x_{32} = x_{16} + x_8 + \frac{x_{16}x_8}{x_{24}} = 0,114 + 0,550 + \frac{0,114 \cdot 0,550}{0,242} = 0,923;$$

$$x_{33} = x_{24} + x_8 + \frac{x_{24}x_8}{x_{16}} = 0,242 + 0,550 + \frac{0,242 \cdot 0,550}{0,114} = 1,9595,$$

а затем треугольник сопротивлений $x_{31} - x_{32} - x_{33}$ разрежем в узле М, введя в каждую из присоединённых к узлу ветвей источник ЭДС E_6 (рис. 3.1.6, б).

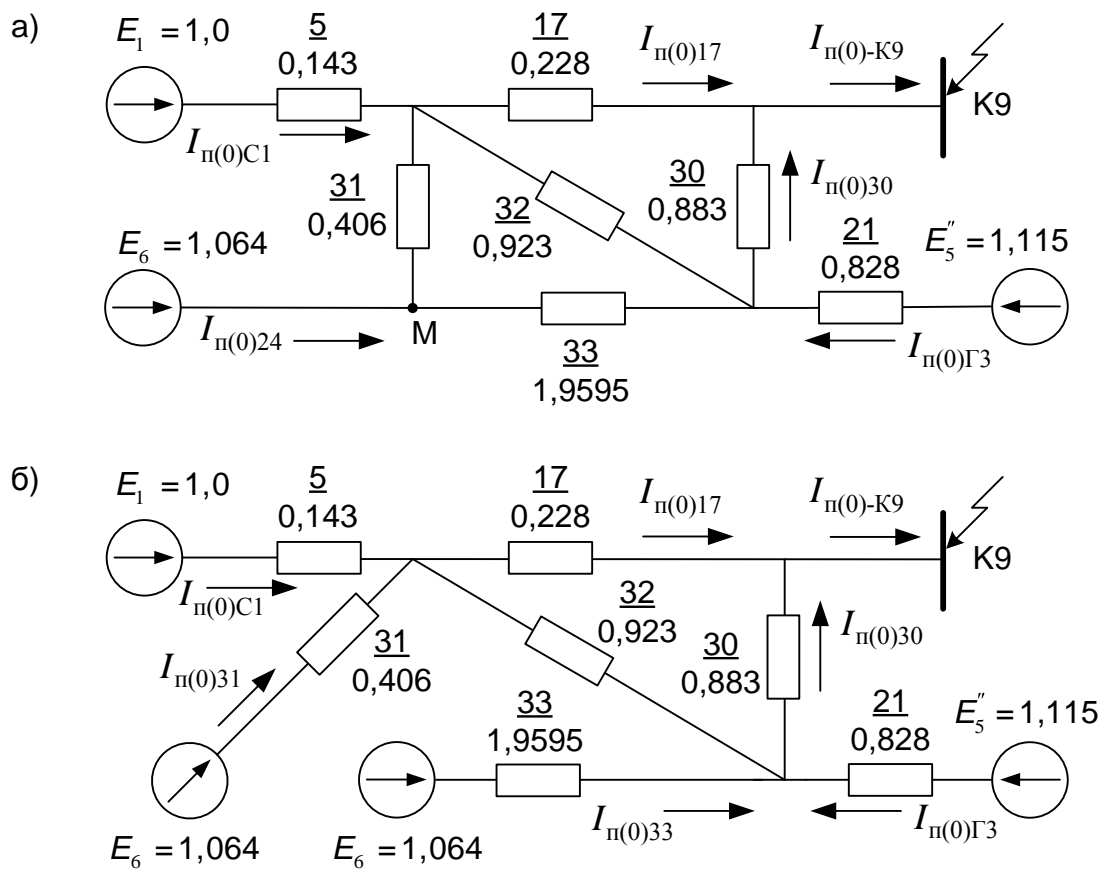


Рис. 3.1.6. Схема замещения для расчета трёхфазного КЗ в точке К9 до (а) и после (б) разрезания треугольника сопротивлений $x_{31} - x_{32} - x_{33}$

Каждую из пар параллельных ветвей с источниками ЭДС E_6 и E_5'' , E_1 и E_6 заменим эквивалентной ветвью, соответственно, с параметрами (рис. 3.1.7, а):

$$x_{34} = \left(\frac{1}{x_{33}} + \frac{1}{x_{21}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,9595} + \frac{1}{0,828} \right)^{-1} = 0,582;$$

$$E_9 = x_{34} \left(\frac{E_6}{x_{33}} + \frac{E_5''}{x_{21}} \right) = 0,582 \cdot \left(\frac{1,064}{1,9595} + \frac{1,115}{0,828} \right) = 1,10;$$

$$x_{35} = \left(\frac{1}{x_5} + \frac{1}{x_{31}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,143} + \frac{1}{0,406} \right)^{-1} = 0,1058;$$

$$E_{10} = x_{35} \left(\frac{E_1}{x_5} + \frac{E_6}{x_{31}} \right) = 0,1058 \cdot \left(\frac{1,0}{0,143} + \frac{1,115}{0,406} \right) = 1,017,$$

а затем преобразуем треугольник сопротивлений $x_{17}-x_{30}-x_{32}$ в звезду с сопротивлениями в ветвях (рис. 3.1.7, б):

$$x_{36} = \frac{x_{17}x_{30}}{x_{17} + x_{30} + x_{32}} = \frac{0,228 \cdot 0,883}{0,228 + 0,883 + 0,923} = 0,099;$$

$$x_{37} = \frac{x_{17}x_{32}}{x_{17} + x_{30} + x_{32}} = \frac{0,228 \cdot 0,923}{0,228 + 0,883 + 0,923} = 0,1035;$$

$$x_{38} = \frac{x_{30}x_{32}}{x_{17} + x_{30} + x_{32}} = \frac{0,883 \cdot 0,923}{0,228 + 0,883 + 0,923} = 0,401.$$

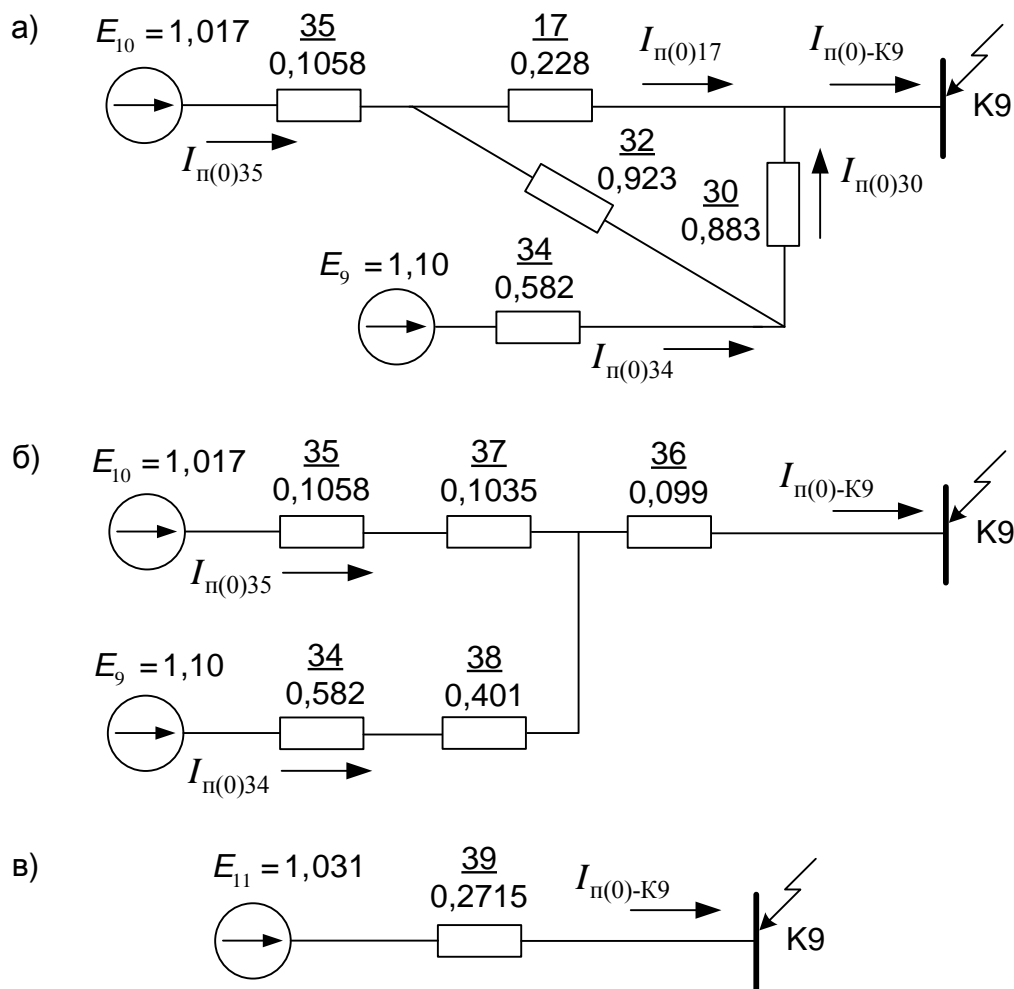


Рис. 3.1.7. Схема замещения для расчета трёхфазного КЗ в точке К9 на этапах последующих преобразований

Найдём результирующие сопротивление и ЭДС относительно точки К9, заменив параллельные ветви с ЭДС E_{10} и E_9 эквивалентной и добавив к ней сопротивление x_{36} (см. рис. 3.1.7, в):

$$x_{39} = \left(\frac{1}{x_{35} + x_{37}} + \frac{1}{x_{34} + x_{38}} \right)^{-1} + x_{36} = \left(\frac{1}{0,1058 + 0,1035} + \frac{1}{0,582 + 0,401} \right)^{-1} + 0,099 = 0,2715;$$

$$E_{11} = (x_{39} - x_{36}) \left(\frac{E_{10}}{x_{35} + x_{37}} + \frac{E_9}{x_{34} + x_{38}} \right) = (0,2715 - 0,099) \cdot \left(\frac{1,017}{0,1058 + 0,1035} + \frac{1,10}{0,582 + 0,401} \right) = 1,031.$$

Рассчитаем базисный ток при $U_6 = U_{\text{ср.К9}}$ и определим действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного КЗ в точке К9 в начальный момент времени в относительных и именованных единицах:

$$I_{6\text{-К9}} = \frac{S_6}{\sqrt{3} U_{\text{ср.К9}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 515} = 1,121 \text{ кА};$$

$$I_{* \text{п(0)-К9}} = E_{11} / x_{39} = 1,031 / 0,2715 = 3,797;$$

$$I_{\text{п(0)-К9}} = I_{* \text{п(0)-К9}} \cdot I_6 = 3,797 \cdot 1,121 = 4,256 \text{ кА}.$$

Используя изображения схемы замещения на различных этапах преобразования, определим токи в её ветвях в начальный момент времени, выраженные в относительных единицах.

Для схемы на рис. 3.1.7, б:

$$I_{\text{п(0)34}} = \frac{E_9 - I_{* \text{п(0)-К9}} x_{36}}{x_{34} + x_{38}} = \frac{1,10 - 3,797 \cdot 0,099}{0,582 + 0,401} = 0,736;$$

$$I_{\text{п(0)35}} = \frac{E_{10} - I_{* \text{п(0)-К9}} x_{36}}{x_{35} + x_{37}} = \frac{1,017 - 3,797 \cdot 0,099}{0,1058 + 0,1035} = 3,062.$$

Для схемы на рис. 3.1.6, б, учитывая, что $I_{\text{п(0)35}} = I_{\text{п(0)C1}} + I_{\text{п(0)31}}$:

$$I_{\text{п(0)C1}} = \frac{E_1 - E_{10} + I_{\text{п(0)35}} x_{35}}{x_5} = \frac{1,0 - 1,017 + 3,062 \cdot 0,1058}{0,143} = 2,147;$$

$$I_{\text{п(0)31}} = \frac{E_6 - E_{10} + I_{\text{п(0)35}} x_{35}}{x_{31}} = \frac{1,064 - 1,017 + 3,062 \cdot 0,1058}{0,406} = 0,914;$$

учитывая, что $I_{\text{п(0)34}} = I_{\text{п(0)Г3}} + I_{\text{п(0)33}}$:

$$I_{\text{п(0)33}} = \frac{E_6 - E_9 + I_{\text{п(0)34}} x_{34}}{x_{33}} = \frac{1,064 - 1,10 + 0,736 \cdot 0,582}{1,9595} = 0,200;$$

$$I_{\text{п(0)Г3}} = \frac{E_5'' - E_9 + I_{\text{п(0)34}} x_{34}}{x_{21}} = \frac{1,115 - 1,10 + 0,736 \cdot 0,582}{0,828} = 0,535.$$

Для схемы на рис. 3.1.6, а:

$$I_{\text{п(0)24}} = I_{\text{п(0)31}} + I_{\text{п(0)33}} = 0,914 + 0,200 = 1,114.$$

Для схемы на рис. 3.1.5, учитывая, что $\varphi_{K9} = 0$:

$$I_{п(0)17} = \frac{E_1 - I_{п(0)C1} x_5}{x_{17}} = \frac{1,0 - 2,147 \cdot 0,143}{0,228} = 3,038;$$

$$I_{п(0)30} = \frac{E_5'' - I_{п(0)Г3} x_{21}}{x_{30}} = \frac{1,115 - 0,535 \cdot 0,828}{0,883} = 0,761.$$

Воспользуемся также схемой на рис. 3.1.3 с учётом выполнения соотношения для токов $I_{п(0)24} = I_{п(0)C2} + I_{п(0)Г1} + I_{п(0)Г2}$ при КЗ в точке К9:

$$I_{п(0)C2} = \frac{E_2 - E_6 + I_{п(0)24} x_{24}}{x_{22}} = \frac{1,0 - 1,064 + 1,114 \cdot 0,242}{0,548} = 0,375;$$

$$I_{п(0)Г2} = I_{п(0)Г1} = \frac{E_3'' - E_6 + I_{п(0)24} x_{24}}{x_{19}} = \frac{1,115 - 1,064 + 1,114 \cdot 0,242}{0,867} = 0,370.$$

Проверка:

$$I_{п(0)C1} + I_{п(0)C2} + 2I_{п(0)Г1} + I_{п(0)Г3} = 2,147 + 0,375 + 2 \cdot 0,370 + 0,535 = 3,797 = I_{* п(0)-К9}.$$

Вычислим для генераторов Г1, Г2, Г3 коэффициенты удалённости β_i :

$$\beta_{Г2} = \beta_{Г1} = I_{п(0)Г1} \frac{S_6}{P_{ном.Г1} / \cos \varphi_{ном.Г1}} = 0,370 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 1,048;$$

$$\beta_{Г3} = I_{п(0)Г3} \frac{S_6}{P_{ном.Г3} / \cos \varphi_{ном.Г3}} = 0,535 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 1,52.$$

Поскольку для всех генераторов $\beta_i < 2$, то согласно изложенному в Стандарте [1] **методу типовых кривых** из-за большой удалённости расчётной точки КЗ действующее значение периодической составляющей тока КЗ следует принимать неизменным для любого момента времени, т. е.

$$I_{п(t)-К7} = I_{п(0)-К7} = 4,256 \text{ кА}.$$

С целью ознакомления с порядком применения метода типовых кривых воспользуемся предыдущей версией метода, представленной, например, в работе [13]. В соответствии с ней затухание периодической составляющей тока КЗ от синхронных машин следовало учитывать при $\beta_i \geq 1$, используя обобщённый набор типовых кривых ([13], рис. П5.5 из **Приложения 5**). С помощью этих кривых для найденных выше коэффициентов удалённости ($\beta_{Г1} = \beta_{Г2} = 1,048$ и $\beta_{Г3} = 1,52$) и момента времени $t=0,3$ с определим коэффициенты затухания γ_i токов генераторов: $\gamma_{Г1} = \gamma_{Г2} = 0,984$; $\gamma_{Г3} = 0,941$.

Поскольку для эквивалентных систем всегда $\gamma_{C1} = \gamma_{C2} = 1$, то, при использовании ранее применяемого набора типовых кривых, действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент времени 0,3 с определяется как

$$I_{п(0,3)-K9} = \left[2I_{п(0)Г1} \cdot \gamma_{Г1} + I_{п(0)Г3} \cdot \gamma_{Г3} + (I_{п(0)C1} + I_{п(0)C2}) \cdot \gamma_{C1} \right] \cdot I_{6-K9} = \\ = 2 \cdot 0,370 \cdot 0,984 + 0,535 \cdot 0,941 + (2,147 + 0,375) \cdot 1 \cdot 1,121 = 4,208 \text{ кА}.$$

Рассчитаем ударный ток и апериодическую составляющую тока КЗ, используя усреднённые значения постоянных времени и ударных коэффициентов для характерных ветвей (см. **Приложение 6**). Поскольку все источники отделены от точки короткого замыкания К9 длинными линиями, то при приближённом выборе T_a и K_y для всех примыкающих к точке КЗ ветвей можно принять расчётный случай «КЗ на присоединении распределительного устройства повышенного напряжения подстанции» (см. табл. П6.1): $T_a = 0,05 \text{ с}$; $K_y = 1,8$.

Тогда ударный ток трёхфазного КЗ в точке К9

$$i_{y-K9} = \sqrt{2} I_{п(0)-K9} \cdot K_y = \sqrt{2} \cdot 4,256 \cdot 1,8 = 10,83 \text{ кА},$$

а выражение для апериодической составляющей тока КЗ

$$i_{a-K9}(t) = \sqrt{2} I_{п(0)-K9} e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4,256 e^{-\frac{t}{0,05}} = 6,019 e^{-\frac{t}{0,05}}, \text{ кА}.$$

Значения апериодической составляющей для моментов времени $t=0$ и $t=0,3 \text{ с}$:

$$i_{a-K9}(0) = 6,019 \cdot e^{-\frac{0}{0,05}} = 6,019 \text{ кА}; \quad i_{a-K9}(0,3) = 6,019 \cdot e^{-\frac{0,3}{0,05}} = 0,0149 \text{ кА}.$$

3.2. Расчет токов при однофазном и двухфазном коротких замыканиях

Определим токи однофазного и двухфазного КЗ в точке К9 (см. рис.3.1.1), используя метод симметричных составляющих и правило эквивалентности прямой последовательности. Расчёт выполним в относительных единицах при выбранных выше базисных условиях.

Расчет тока однофазного короткого замыкания в точке К9

Схема замещения прямой последовательности имеет практически такой же вид и параметры, что и схема для расчета тока трехфазного КЗ (см. рис. 3.1.2, 3.1.5–3.1.7). Отличие состоит лишь в том, что к точке КЗ дополнительно подключается источник напряжения прямой последовательности U_{K1} (рис. 3.2.1, а) и, следовательно, потенциал в точке К9 на схеме замещения не равен нулю. Соответственно, значения результирующих ЭДС и сопротивления прямой последовательности определяются по результатам проведённого выше сворачивания схемы замещения для расчёта трёхфазного КЗ: $E_{1\Sigma} = E_{11} = 1,031$, $x_{1\Sigma} = x_{39} = 0,2715$.

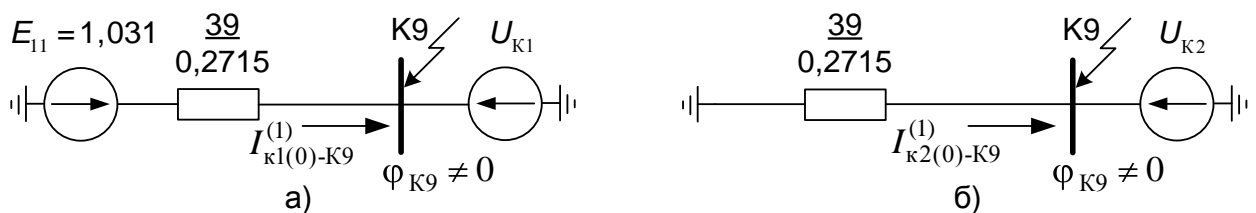


Рис. 3.2.1. Результирующие схемы замещения при КЗ в точке К9 прямой (а) и обратной (б) последовательностей

Заметим, что появление условного изображения «земли» в схемах на рис. 3.2.1 не означает обязательного фактического заземления, а лишь указывает на нулевой потенциал точек и подчеркивает наличие замкнутого контура в однолинейных схемах замещения.

Схема замещения обратной последовательности по своей конфигурации аналогична схеме прямой последовательности за исключением того, что в ней отсутствуют ЭДС источников, а к точке КЗ подключен источник напряжения обратной последовательности U_{K2} (см. рис. 3.2.1, б). Для упрощения расчётов примем, что сопротивления обратной последовательности генераторов равны их сверхпереходным сопротивлениям. Тогда результирующее сопротивление схемы обратной последовательности относительно точки КЗ $x_{2\Sigma} = x_{1\Sigma} = x_{39} = 0,2715$.

Схема замещения нулевой последовательности, как и схема обратной последовательности, не содержит ЭДС источников, а к точке КЗ должен быть подключен источник напряжения нулевой последовательности U_{K0} . Ее конфигурация (рис. 3.2.2) определяется схемами соединения обмоток трансформаторов и режимом заземления их нейтралей (см. пп. 2.4 и 2.5).

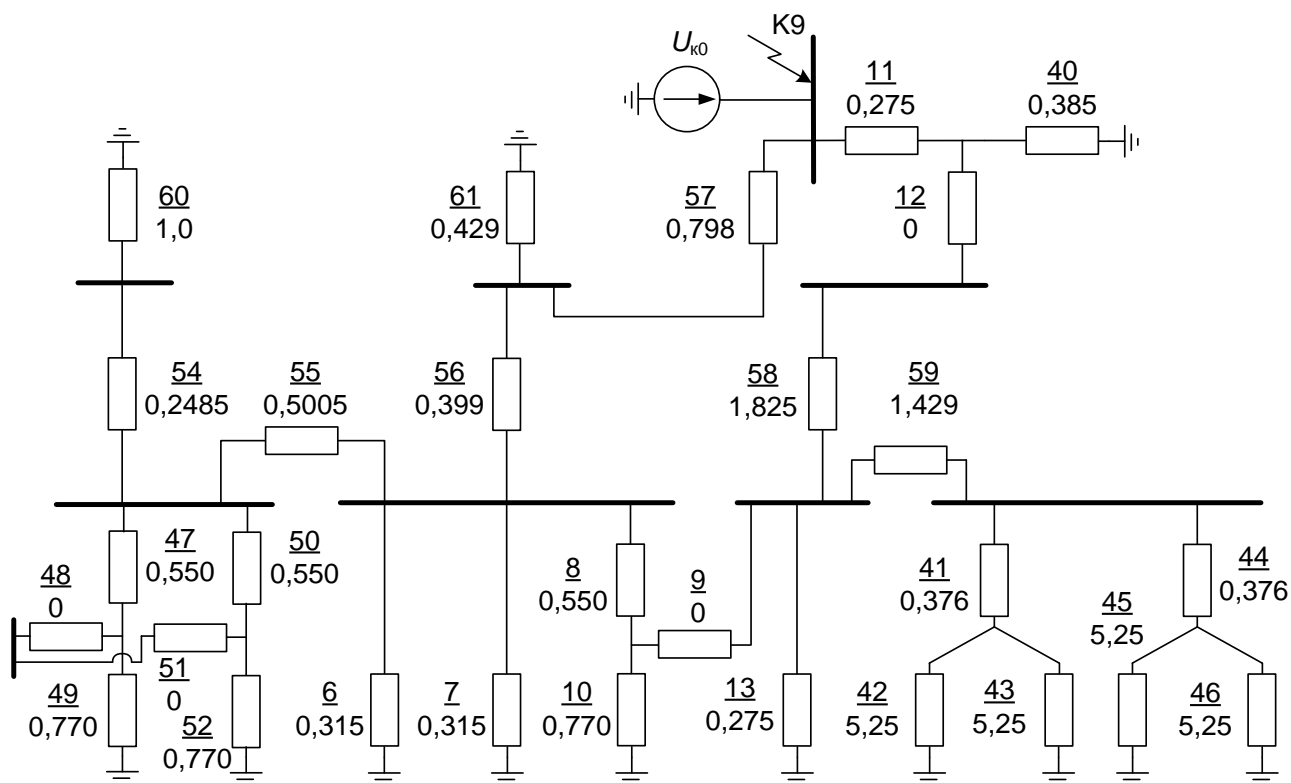


Рис. 3.2.2. Схема замещения нулевой последовательности при КЗ в точке К9

Определим параметры схемы замещения нулевой последовательности, используя данные табл. 3.1.1 и ранее найденные величины сопротивлений схемы замещения для расчёта тока трёхфазного КЗ (см. рис. 3.1.2).

Эквивалентное сопротивление обмоток низшего напряжения параллельно включенных автотрансформаторов АТ4 и АТ5

$$x_{40} = x_{10} / 2 = 0,770 / 2 = 0,385.$$

Сопротивления трансформаторов Т6 и Т7 с расщепленными обмотками:

$$x_{41} = x_{44} = \frac{0,125 u_k \%}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{0,125 \cdot 12}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 0,376;$$

$$x_{42} = x_{43} = x_{45} = x_{46} = \frac{1,75 u_k \%}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}} = \frac{1,75 \cdot 12}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 5,25.$$

Сопротивления автотрансформаторов АТ2 и АТ3:

$$x_{47} = x_{50} = x_8 = 0,550;$$

$$x_{48} = x_{51} = x_9 \approx 0;$$

$$x_{49} = x_{52} = x_{10} = 0,770.$$

Отметим, что в расчётной схеме (см. рис. 3.1.1) не учтён участок сети 220 кВ от подстанции с АТ2 и АТ3. Поэтому схема замещения нулевой последовательности на данном участке обрывается на сопротивлениях x_{48} и x_{51} . По этим сопротивлениям ток не протекает, а сами они в дальнейшем расчёте не учитываются.

Расчёт сопротивлений нулевой последовательности воздушных ЛЭП выполним упрощенно, используя усреднённые соотношения сопротивлений нулевой и прямой последовательностей x_0/x_1 (см. табл. 2.4.1, [1, 5]).

$$\text{ЛЭП W4: } x_{54} = 3,5 \cdot x_{14} = 3,5 \cdot 0,071 = 0,2485.$$

$$\text{ЛЭП W2: } x_{55} = 3,5 \cdot x_{15} = 3,5 \cdot 0,143 = 0,5005.$$

$$\text{ЛЭП W1: } x_{56} = 3,5 \cdot x_{16} = 3,5 \cdot 0,114 = 0,399.$$

$$\text{ЛЭП W3: } x_{57} = 3,5 \cdot x_{17} = 3,5 \cdot 0,228 = 0,798.$$

$$\text{ЛЭП W6: } x_{58} = 3,0 \cdot x_{18} = 3,0 \cdot 0,608 = 1,825.$$

$$\text{ЛЭП W5: } x_{59} = \frac{1}{2} \cdot 4,7 \cdot x_{\text{пор}} l_{W3} \frac{S_6}{U_{\text{ср.ст}}^2} = \frac{1}{2} \cdot 4,7 \cdot 0,429 \cdot 75 \cdot \frac{1000}{230^2} = 1,429.$$

Сопротивления нулевой последовательности эквивалентных систем С1 и С2:

$$x_{61} = 3 \cdot x_5 = 3 \cdot 0,143 = 0,429;$$

$$x_{60} = 3 \cdot x_4 = 3 \cdot 0,333 = 1,0.$$

Проведём упрощение исходной схемы замещения нулевой последовательности (см. рис. 3.2.2), заменяя ветви с последовательно и параллельно соединёнными сопротивлениями эквивалентными со следующими параметрами:

$$x_{62} = \frac{1}{2} (x_{47} + x_{49}) = \frac{1}{2} (0,550 + 0,770) = 0,660;$$

$$x_{63} = x_{60} + x_{54} = 1,0 + 0,2485 = 1,2485;$$

$$x_{64} = \left(\frac{1}{x_{62}} + \frac{1}{x_{63}} \right)^{-1} + x_{55} = \left(\frac{1}{0,660} + \frac{1}{1,2485} \right)^{-1} + 0,5005 = 0,932;$$

$$x_{65} = \left(\frac{1}{x_{64}} + \frac{1}{x_6} + \frac{1}{x_7} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,932} + \frac{1}{0,315} + \frac{1}{0,315} \right)^{-1} = 0,135;$$

$$x_{66} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} x_{42} + x_{41} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \cdot 5,25 + 0,376 \right) = 1,5005;$$

$$x_{67} = \left(\frac{1}{x_{66} + x_{59}} + \frac{1}{x_{10}} + \frac{1}{x_{13}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,5005 + 1,429} + \frac{1}{0,770} + \frac{1}{0,275} \right)^{-1} = 0,1895.$$

Схема замещения нулевой последовательности, соответствующая первому этапу преобразований, изображена на рис. 3.2.3, а.

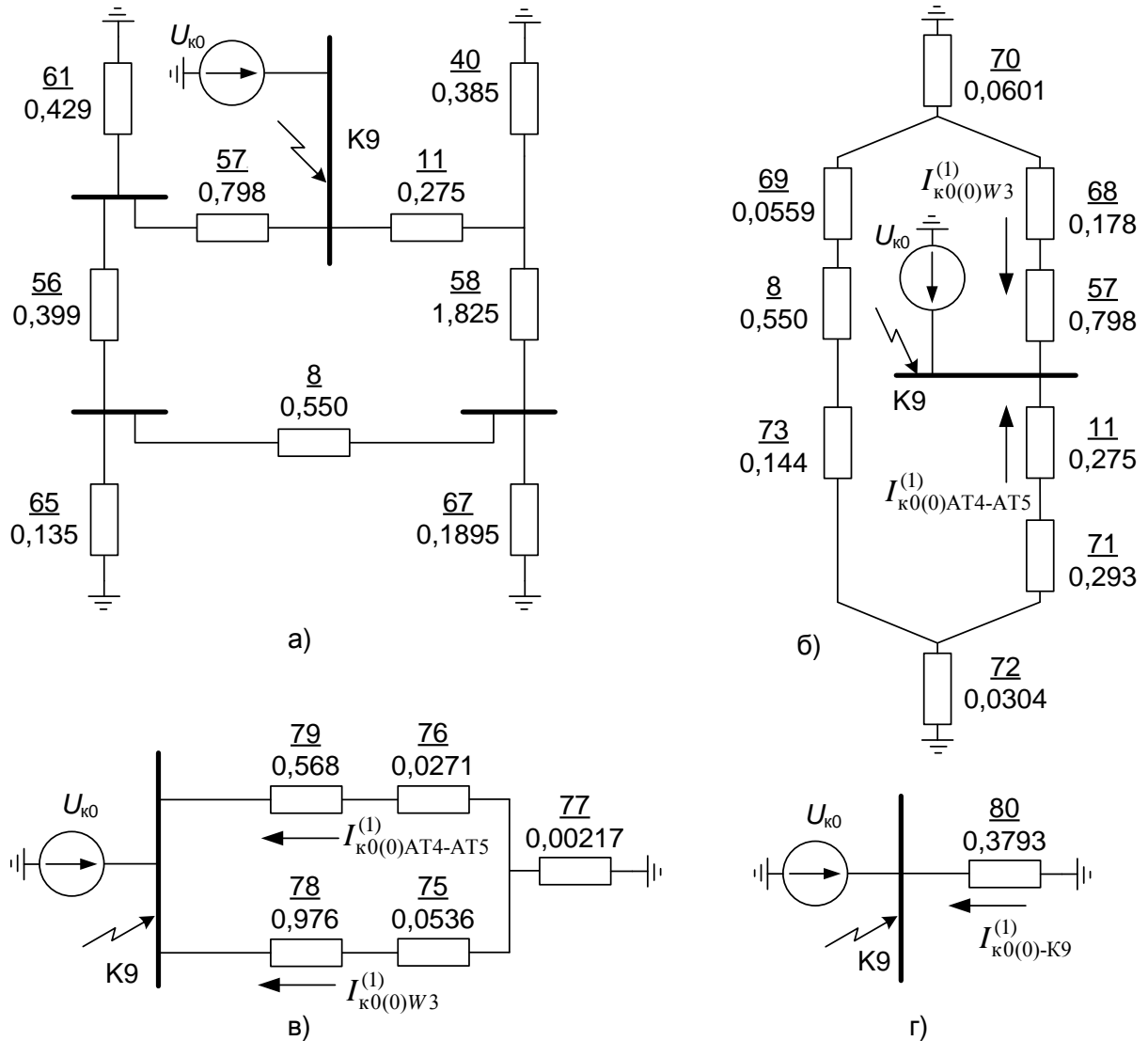


Рис. 3.2.3. Схема замещения нулевой последовательности при КЗ в точке К9 на различных этапах своего преобразования

Преобразуем треугольник сопротивлений $x_{61} - x_{56} - x_{65}$ в звезду $x_{68} - x_{69} - x_{70}$:

$$x_{68} = \frac{x_{61}x_{56}}{x_{61} + x_{56} + x_{65}} = \frac{0,429 \cdot 0,399}{0,429 + 0,399 + 0,135} = 0,178;$$

$$x_{69} = \frac{x_{65}x_{56}}{x_{61} + x_{56} + x_{65}} = \frac{0,135 \cdot 0,399}{0,429 + 0,399 + 0,135} = 0,0559;$$

$$x_{70} = \frac{x_{61}x_{65}}{x_{61} + x_{56} + x_{65}} = \frac{0,429 \cdot 0,135}{0,429 + 0,399 + 0,135} = 0,0601,$$

а треугольник сопротивлений $x_{58}-x_{40}-x_{67}$ в звезду $x_{71}-x_{72}-x_{73}$:

$$x_{71} = \frac{x_{58}x_{40}}{x_{40} + x_{58} + x_{67}} = \frac{1,825 \cdot 0,385}{0,385 + 1,825 + 0,1895} = 0,293;$$

$$x_{72} = \frac{x_{67}x_{40}}{x_{40} + x_{58} + x_{67}} = \frac{0,1895 \cdot 0,385}{0,385 + 1,825 + 0,1895} = 0,0304;$$

$$x_{73} = \frac{x_{58}x_{67}}{x_{40} + x_{58} + x_{67}} = \frac{1,825 \cdot 0,1895}{0,385 + 1,825 + 0,1895} = 0,144,$$

после чего схема замещения примет вид, представленный на рис. 3.2.3, б.

Группы последовательных сопротивлений заменим эквивалентными:

$$x_{74} = x_{69} + x_8 + x_{73} = 0,0559 + 0,550 + 0,144 = 0,750;$$

$$x_{78} = x_{68} + x_{57} = 0,178 + 0,798 = 0,976;$$

$$x_{79} = x_{11} + x_{71} = 0,275 + 0,293 = 0,568,$$

а затем треугольник сопротивлений $x_{70}-x_{74}-x_{72}$ преобразуем в звезду $x_{75}-x_{76}-x_{77}$:

$$x_{75} = \frac{x_{70}x_{74}}{x_{70} + x_{74} + x_{72}} = \frac{0,0601 \cdot 0,750}{0,0601 + 0,750 + 0,0304} = 0,0536;$$

$$x_{76} = \frac{x_{72}x_{74}}{x_{70} + x_{74} + x_{72}} = \frac{0,0304 \cdot 0,750}{0,0601 + 0,750 + 0,0304} = 0,0271;$$

$$x_{77} = \frac{x_{70}x_{72}}{x_{70} + x_{74} + x_{72}} = \frac{0,0601 \cdot 0,0304}{0,0601 + 0,750 + 0,0304} = 0,0217,$$

после чего схема замещения примет вид, представленный на рис. 3.2.3, в.

Определим результирующее сопротивление нулевой последовательности, завершив сворачивание схемы относительно точки К9 (рис. 3.2.3, г):

$$x_{0\Sigma} = x_{80} = x_{77} + \left(\frac{1}{x_{78} + x_{75}} + \frac{1}{x_{79} + x_{76}} \right)^{-1} = 0,00217 + \left(\frac{1}{0,976 + 0,0536} + \frac{1}{0,568 + 0,0271} \right)^{-1} = 0,3793.$$

Для однофазного КЗ в точке К9 найдём дополнительное сопротивление (см. табл. 2.3.1):

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 0,2715 + 0,3793 = 0,6508,$$

а затем по формуле (2.6.1) определим действующее значение тока прямой последовательности для начального момента времени:

$$I_{\text{к1(0)-К9}}^{(1)} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)}} = \frac{1,031}{0,2715 + 0,6508} = 1,118,$$

а также токи обратной и нулевой последовательностей (см. табл. 2.7.1):

$$I_{\text{к2(0)-К9}}^{(1)} = I_{\text{к0(0)-К9}}^{(1)} = I_{\text{к1(0)-К9}}^{(1)} = 1,118.$$

В соответствии с выражением (2.3.2) при значении коэффициента $m^{(1)}=3$ (см. табл. 2.3.1) найдём действующее значение периодической составляющей тока

поврежденной фазы в месте КЗ в начальный момент времени в относительных и именованных единицах:

$$I_{*п(0)-К9}^{(1)} = m^{(1)} I_{кл(0)-К9}^{(1)} = 3 \cdot 1,118 = 3,354;$$

$$I_{п(0)-К9}^{(1)} = I_{*п(0)-К9}^{(1)} \cdot I_{6-К9} = 3,354 \cdot 1,121 = 3,759 \text{ кА.}$$

Используя схему замещения для трехфазного КЗ на различных этапах её преобразования (см. рис. 3.1.2, 3.1.5–3.1.7) и ранее полученные выражения для нахождения токов в ветвях этой схемы, а также условие, что потенциал в точке К9 в схеме замещения прямой последовательности (см. рис. 3.2.1, а) равен

$$\varphi_{К9} = E_{11} - I_{кл(0)-К9}^{(1)} x_{39} = 1,031 - 1,118 \cdot 0,2715 = 0,728,$$

найдем распределение тока прямой последовательности по ветвям схемы замещения в начальный момент времени:

$$I_{кл(0)34}^{(1)} = \frac{E_9 - \varphi_{К9} - I_{кл(0)-К9}^{(1)} x_{36}}{x_{34} + x_{38}} = \frac{1,10 - 0,728 - 1,118 \cdot 0,099}{0,582 + 0,401} = 0,266;$$

$$I_{кл(0)35}^{(1)} = \frac{E_{10} - \varphi_{К9} - I_{кл(0)-К9}^{(1)} x_{36}}{x_{35} + x_{37}} = \frac{1,017 - 0,728 - 1,118 \cdot 0,099}{0,1058 + 0,1035} = 0,852;$$

$$I_{кл(0)C1}^{(1)} = \frac{E_1 - E_{10} + I_{кл(0)35}^{(1)} x_{35}}{x_5} = \frac{1,0 - 1,017 + 0,852 \cdot 0,1058}{0,143} = 0,512;$$

$$I_{кл(0)31}^{(1)} = \frac{E_6 - E_{10} + I_{кл(0)35}^{(1)} x_{35}}{x_{31}} = \frac{1,064 - 1,017 + 0,852 \cdot 0,1058}{0,406} = 0,338;$$

$$I_{кл(0)33}^{(1)} = \frac{E_6 - E_9 + I_{кл(0)34}^{(1)} x_{34}}{x_{33}} = \frac{1,064 - 1,10 + 0,266 \cdot 0,582}{1,9595} = 0,0606;$$

$$I_{кл(0)Г3}^{(1)} = \frac{E_5'' - E_9 + I_{кл(0)34}^{(1)} x_{34}}{x_{21}} = \frac{1,115 - 1,10 + 0,266 \cdot 0,582}{0,828} = 0,205;$$

$$I_{кл(0)24}^{(1)} = I_{кл(0)31}^{(1)} + I_{кл(0)33}^{(1)} = 0,338 + 0,0606 = 0,3986;$$

$$I_{кл(0)W3}^{(1)} = I_{кл(0)17}^{(1)} = \frac{E_1 - \varphi_{К9} - I_{кл(0)C1}^{(1)} x_5}{x_{17}} = \frac{1,0 - 0,728 - 0,512 \cdot 0,143}{0,228} = 0,872;$$

$$I_{кл(0)AT4-AT5}^{(1)} = I_{кл(0)30}^{(1)} = \frac{E_5'' - \varphi_{К9} - I_{кл(0)Г3}^{(1)} x_{21}}{x_{30}} = \frac{1,115 - 0,728 - 0,205 \cdot 0,828}{0,883} = 0,246;$$

$$I_{кл(0)C2}^{(1)} = \frac{E_2 - E_6 + I_{кл(0)24}^{(1)} x_{24}}{x_{22}} = \frac{1,0 - 1,064 + 0,3986 \cdot 0,242}{0,548} = 0,0592;$$

$$I_{кл(0)Г2}^{(1)} = I_{кл(0)Г1}^{(1)} = \frac{E_3'' - E_6 + I_{кл(0)24}^{(1)} x_{24}}{x_{19}} = \frac{1,115 - 1,064 + 0,3986 \cdot 0,242}{0,867} = 0,170.$$

Проверка:

$$I_{\text{к1(0)C1}}^{(1)} + I_{\text{к1(0)C2}}^{(1)} + 2I_{\text{к1(0)Г1}}^{(1)} + I_{\text{к1(0)Г2}}^{(1)} = 0,512 + 0,0592 + 2 \cdot 0,170 + 0,205 = 1,116 \approx I_{\text{к1(0)-К9}}^{(1)}.$$

Вычислим для генераторов Г1, Г2, Г3 коэффициенты удалённости β_i :

$$\beta_{\text{Г1}} = \beta_{\text{Г2}} = I_{\text{к1(0)Г1}}^{(1)} \frac{S_{\delta}}{P_{\text{ном.Г1}} / \cos \varphi_{\text{ном.Г1}}} = 0,170 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 0,482;$$

$$\beta_{\text{Г3}} = I_{\text{к1(0)Г3}}^{(1)} \frac{S_{\delta}}{P_{\text{ном.Г3}} / \cos \varphi_{\text{ном.Г3}}} = 0,205 \cdot \frac{1000}{300 / 0,85} = 0,581.$$

Так как все коэффициенты $\beta_i < 2$, то $\gamma_i = 1$ и величина тока прямой последовательности не изменится с течением времени. Следовательно, имеем:

$$I_{\text{к1(0,3)-К9}}^{(1)} = I_{\text{к1(0)-К9}}^{(1)} = 1,118;$$

$$I_{\text{п(0,3)-К9}}^{(1)} = m^{(1)} I_{\text{к1(0,3)-К9}}^{(1)} \cdot I_{\text{б-К9}} = 3 \cdot 1,118 \cdot 1,121 = 3,759 \text{ кА}.$$

Все источники по отношению к точке короткого замыкания К9 находятся примерно в одинаковых условиях. Поэтому приближённо можно принять для всех примыкающих к точке К9 ветвей (ЛЭП W3 и автотрансформаторы АТ4 и АТ5 (см. рис. 3.1.1)) одинаковые значения $T_a = 0,05$ с и $K_y = 1,8$ (см. табл. П6.1). Тогда ударный ток однофазного КЗ в точке К9

$$i_{\text{у-К9}}^{(1)} = \sqrt{2} I_{\text{п(0)-К9}}^{(1)} \cdot K_y = \sqrt{2} \cdot 3,759 \cdot 1,8 = 9,57 \text{ кА},$$

а выражение для апериодической составляющей тока КЗ

$$i_{\text{а-К9}}^{(1)}(t) = \sqrt{2} I_{\text{п(0)-К9}}^{(1)} e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 3,759 e^{-\frac{t}{0,05}} = 5,316 e^{-\frac{t}{0,05}}, \text{ кА}.$$

Значения апериодической составляющей для моментов времени $t=0$ и $t=0,3$ с:

$$i_{\text{а-К9}}^{(1)}(0) = 5,316 e^{-\frac{0}{0,05}} = 5,316 \text{ кА}; \quad i_{\text{а-К9}}^{(1)}(0,3) = 5,316 e^{-\frac{0,3}{0,05}} = 0,0132 \text{ кА}.$$

При существенном отличии в расположении относительно точки КЗ хотя бы одного источника по сравнению с другими (например, при КЗ на шинах РУ высшего напряжения электростанции или на выводах генератора) для расчёта ударного тока и апериодической составляющей тока КЗ пришлось бы определять распределение токов прямой (уже выполнено выше), обратной и нулевой последовательностей по примыкающим к точке КЗ ветвям. В данном случае этого не требуется, но в качестве примера найдем распределения токов обратной и нулевой последовательностей между ветвью ЛЭП W3 и эквивалентной ветвью автотрансформаторов АТ4 и АТ5 (см. рис. 3.1.1).

Учитывая, что схема замещения обратной последовательности (рис. 3.2.4, а) отличается от схемы замещения прямой последовательности (см. рис. 3.1.5) отсутствием ЭДС источников и дополнительным подключением к месту КЗ источника напряжения обратной последовательности $U_{\text{к2}}$, а токи всех последовательностей в месте однофазного КЗ равны ($I_{\text{к2(0)-К9}}^{(1)} = I_{\text{к0(0)-К9}}^{(1)} = I_{\text{к1(0)-К9}}^{(1)} = 1,118$), найдём распределение тока обратной последовательности по ветвям, примыкающим к точке К9 (см. рис. 3.2.4).

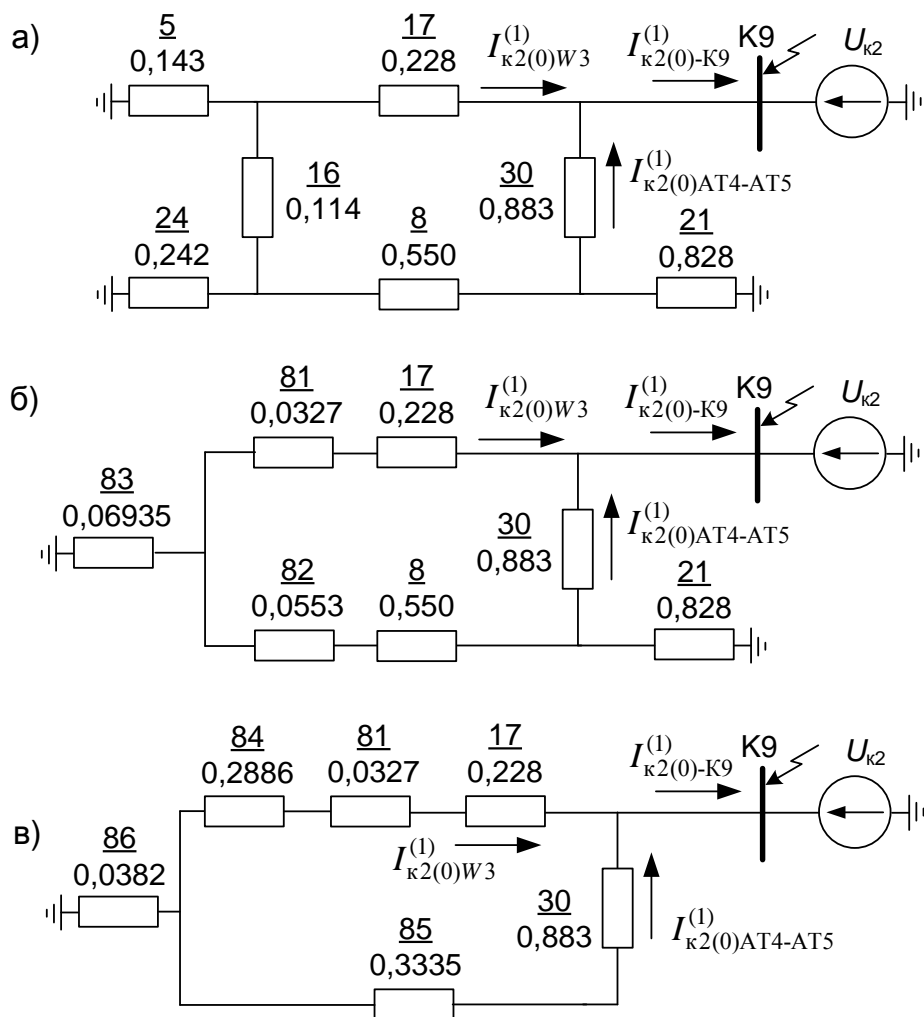


Рис. 3.2.4. Схема замещения обратной последовательности при КЗ в точке К9 на различных этапах своего преобразования

Преобразуем треугольник сопротивлений $x_5-x_{16}-x_{24}$ (см. рис. 3.2.4, а) в звезду:

$$x_{81} = \frac{x_5 x_{16}}{x_5 + x_{16} + x_{24}} = \frac{0,143 \cdot 0,114}{0,143 + 0,114 + 0,242} = 0,0327;$$

$$x_{82} = \frac{x_{24} x_{16}}{x_5 + x_{16} + x_{24}} = \frac{0,242 \cdot 0,114}{0,143 + 0,114 + 0,242} = 0,0553;$$

$$x_{83} = \frac{x_5 x_{24}}{x_5 + x_{16} + x_{24}} = \frac{0,143 \cdot 0,242}{0,143 + 0,114 + 0,242} = 0,06935.$$

Образовавшийся треугольник сопротивлений $x_{83}-(x_{82}+x_8)-x_{21}$ (см. рис. 3.2.4, б) преобразуем в звезду сопротивлений $x_{84}-x_{85}-x_{86}$ (см. рис. 3.2.4, в):

$$x_{84} = \frac{x_{83}(x_{82} + x_8)}{x_{83} + (x_{82} + x_8) + x_{21}} = \frac{0,06935 \cdot (0,0553 + 0,550)}{0,06935 + (0,0553 + 0,550) + 0,828} = 0,0279;$$

$$x_{85} = \frac{(x_{82} + x_8)x_{21}}{x_{83} + (x_{82} + x_8) + x_{21}} = \frac{(0,0553 + 0,550) \cdot 0,828}{0,06935 + (0,0553 + 0,550) + 0,828} = 0,3335;$$

$$x_{86} = \frac{x_{83}x_{21}}{x_{83} + (x_{82} + x_8) + x_{21}} = \frac{0,06935 \cdot 0,828}{0,06935 + (0,0553 + 0,550) + 0,828} = 0,0382,$$

а группы последовательных сопротивлений заменим эквивалентными:

$$x_{87} = x_{84} + x_{81} + x_{17} = 0,0279 + 0,0327 + 0,228 = 0,2886;$$

$$x_{88} = x_{85} + x_{30} = 0,3335 + 0,883 = 1,2165.$$

Дальнейшее упрощение приведёт схему к виду, показанному на рис. 3.2.1, б.

Используя законы электрических цепей, определим искомые токи:

$$I_{\kappa 2(0)W3}^{(1)} = \frac{x_{88}}{x_{87} + x_{88}} I_{\kappa 2(0)-K9}^{(1)} = \frac{1,2165}{0,2886 + 1,2165} \cdot 1,118 = 0,9036;$$

$$I_{\kappa 2(0)AT4-AT5}^{(1)} = \frac{x_{87}}{x_{87} + x_{88}} \cdot I_{\kappa 2(0)-K9}^{(1)} = \frac{0,2886}{0,2886 + 1,2165} \cdot 1,118 = 0,2144.$$

$$\text{Проверка: } I_{\kappa 2(0)W3}^{(1)} + I_{\kappa 2(0)AT4-AT5}^{(1)} = 0,9036 + 0,2144 = 1,118 = I_{\kappa 2(0)-K9}^{(1)}.$$

Найдем распределение токов нулевой последовательности по ветвям, примыкающим к точке К9 (см. рис. 3.2.3):

$$I_{\kappa 0(0)W3}^{(1)} = \frac{(x_{79} + x_{76})}{(x_{79} + x_{76}) + (x_{78} + x_{75})} \cdot I_{\kappa 0(0)-K9}^{(1)} = \frac{0,568 + 0,0271}{(0,568 + 0,0271) + (0,976 + 0,0536)} \cdot 1,118 = 0,4095;$$

$$I_{\kappa 0(0)AT4-AT5}^{(1)} = \frac{(x_{78} + x_{75})}{(x_{79} + x_{76}) + (x_{78} + x_{75})} \cdot I_{\kappa 0(0)-K9}^{(1)} = \frac{(0,976 + 0,0536)}{(0,568 + 0,0271) + (0,976 + 0,0536)} \cdot 1,118 = 0,7085.$$

$$\text{Проверка: } I_{\kappa 0(0)W1}^{(1)} + I_{\kappa 0(0)AT4-AT5}^{(1)} = 0,4095 + 0,7085 = 1,118 = I_{\kappa 0(0)-K9}^{(1)}.$$

Действующие значения периодической составляющей тока однофазного КЗ в начальный момент времени в ветвях, примыкающих к точке К9:

$$I_{\Pi(0)W3}^{(1)} = (I_{\kappa 1(0)W3}^{(1)} + I_{\kappa 2(0)W3}^{(1)} + I_{\kappa 0(0)W3}^{(1)}) \cdot I_{6-K9} = (0,872 + 0,9036 + 0,4095) \cdot 1,121 = 2,449 \text{ кА};$$

$$I_{\Pi(0)AT4-AT5}^{(1)} = (I_{\kappa 1(0)AT4-AT5}^{(1)} + I_{\kappa 2(0)AT4-AT5}^{(1)} + I_{\kappa 0(0)AT4-AT5}^{(1)}) \cdot I_{6-K9} = \\ = (0,246 + 0,2141 + 0,7085) \cdot 1,121 = 1,310 \text{ кА}.$$

Расчет тока двухфазного короткого замыкания в точке К9

С учётом данных табл. 2.3.1 ($x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 0,2715$ и $m^{(2)} = \sqrt{3}$) найдём действующее значение периодической составляющей тока поврежденной фазы в месте КЗ в начальный момент времени в относительных и именованных единицах:

$$I_{\kappa 1(0)-K9}^{(2)} = \frac{E_{1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)}} = \frac{1,031}{0,2715 + 0,2715} = 1,899;$$

$$I_{\kappa 2(0)-K9}^{(2)} = -I_{\kappa 1(0)-K9}^{(2)} = -1,899; \quad I_{\kappa 0(0)-K9}^{(2)} = 0;$$

$$I_{*\Pi(0)-K9}^{(2)} = m^{(2)} I_{\kappa 1(0)-K9}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 1,899 = 3,289;$$

$$I_{\Pi(0)-K9}^{(2)} = I_{*\Pi(0)-K9}^{(2)} \cdot I_{6-K9} = 3,289 \cdot 1,121 = 3,687 \text{ кА}.$$

3.3. Программа *ToKo* и её применение для расчёта токов коротких замыканий

Программа *ToKo* разработана на кафедре «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета для расчёта токов симметричных и несимметричных коротких замыканий в электроэнергетических системах напряжением свыше 1000 В [15]. Для проведения расчётов в учебных целях предусмотрена версия программы *ToKo Student*, изначально настроенная на расчёт с общепринятыми допущениями, аналогичными, используемым в данной курсовой работе. Программа совместима с операционными системами **Windows 2000/XP/Vista/Seven** и включает в себя редактор расчётных схем, базу данных каталожных параметров электрооборудования, оцифрованные наборы типовых кривых и справочную систему. Для автоматической установки программы следует воспользоваться соответствующим инсталляционным дистрибутивом.

Главное окно программы показано на рис. 3.3.1 и представляет собой графический редактор расчётных схем с элементами управления расчётом и просмотра результатов. Расчётная схема составляется на рабочем поле (1) открытого доку-

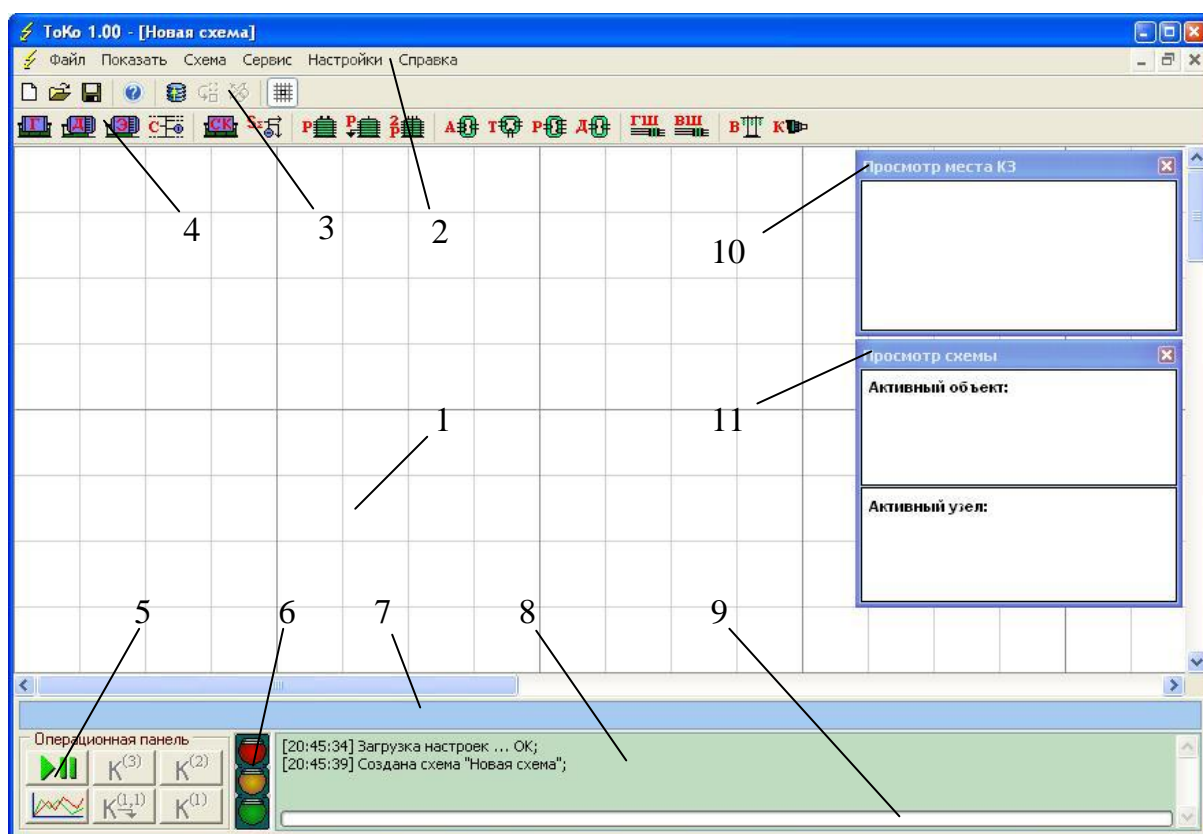


Рис. 3.3.1. Главное окно программы *ToKo* (1 – рабочее поле документа; 2 – главное меню программы; 3 – панель инструментов; 4 – панель элементов расчётной схемы; 5 – операционная панель с кнопками расчёта; 6 – индикатор проверки схем; 7 – строка состояния активного элемента; 8 – поле вывода служебных сообщений; 9 – индикатор хода операций; 10 – окно просмотра результатов расчёта в месте КЗ; 11 – окно просмотра результатов расчёта для выделенного элемента расчётной схемы)

мента из условных графических изображений элементов, представленных на панели (4). Для **добавления элемента в схему** достаточно навести на изображение указатель мыши и нажать ее левую кнопку, а затем с помощью этой же кнопки

*Перемещать элементы на рабочем поле можно не только с помощью указателя мыши, но и посредством нажатия клавиш со стрелками на клавиатуре. Для быстрого перемещения используйте их комбинацию с клавишей **Shift**.*

указать точку на рабочем поле. Электрические связи элементов расчётной схемы задаются графическими связями между соответствующими контактами условных изображений. Для **задания связи** между элементами сле-

дует навести указатель мыши на контакт активного элемента, выделенного красным цветом, нажать левую кнопку мыши, затем протянуть связь к контакту другого элемента и зафиксировать её нажатием той же кнопки мыши. Для **удаления связи** наведите на контакт элемента указатель мыши и нажмите ее правую кнопку, после чего во всплывающем меню выберите пункт «**Удалить связи**».

Иногда необходимо **развернуть изображение элемента** или, как в случаях с трёхобмоточными трансформаторами и реакторами, **зеркально отразить**. Для этого следует нажатием правой кнопки мыши вызвать всплывающее меню активного элемента и выбрать соответствующий пункт.

У сборных шин по умолчанию отображается в программе только одна секция. Для **добавления секций** наведите на один из боковых контактов элемента на схеме указатель мыши, а затем, зажав ее левую кнопку, растяните сборную шину. **Удалить секцию** можно из всплывающего меню активного элемента, если навести указатель мыши на соответствующий контакт сборной шины.

*Собирать схему и вводить параметры однотипных элементов можно одновременно. В этом Вам поможет функция **копирования элементов**. Задайте параметры только для одного элемента и скопируйте его несколько раз.*

Параметризация элементов в программе выполняется в специальных окнах, вызываемых двойным нажатием левой кнопки мыши на активном элементе. Примеры таких окон для синхронного генератора, трёхобмоточного трансформатора и воздушной линии электропередачи приведены на рис. 3.3.2. Ввод параметров можно выполнять вручную или путем подстановки значений из встроенной базы данных каталожных параметров электрооборудования. Для этого достаточно поставить галочку в пункте «**Выбрать из списка**». Для упрощения процесса параметризации предусмотрено отдельное окно «**Помощник ввода**» (см. рис. 3.3.2),

*При составлении схемы используйте клавиши на клавиатуре и их комбинации. Список всех доступных комбинаций можно найти в справке к программе в разделе «**Содержание – Дополнительные возможности – Быстрые клавиши**»*

где отображаются пояснения, рекомендации и некоторая справочная информация по вводимым параметрам. Для отображения текстовых подписей (меток) рядом с элементами на расчётной схеме по-

ставьте галочку в пункте «**Показать метку**» и введите текст в соответствующем поле. Ориентацию метки относительно изображения элемента можно изменить позднее, вызвав всплывающее меню элемента на схеме. По завершении ввода следует нажать кнопку «**ОК**».

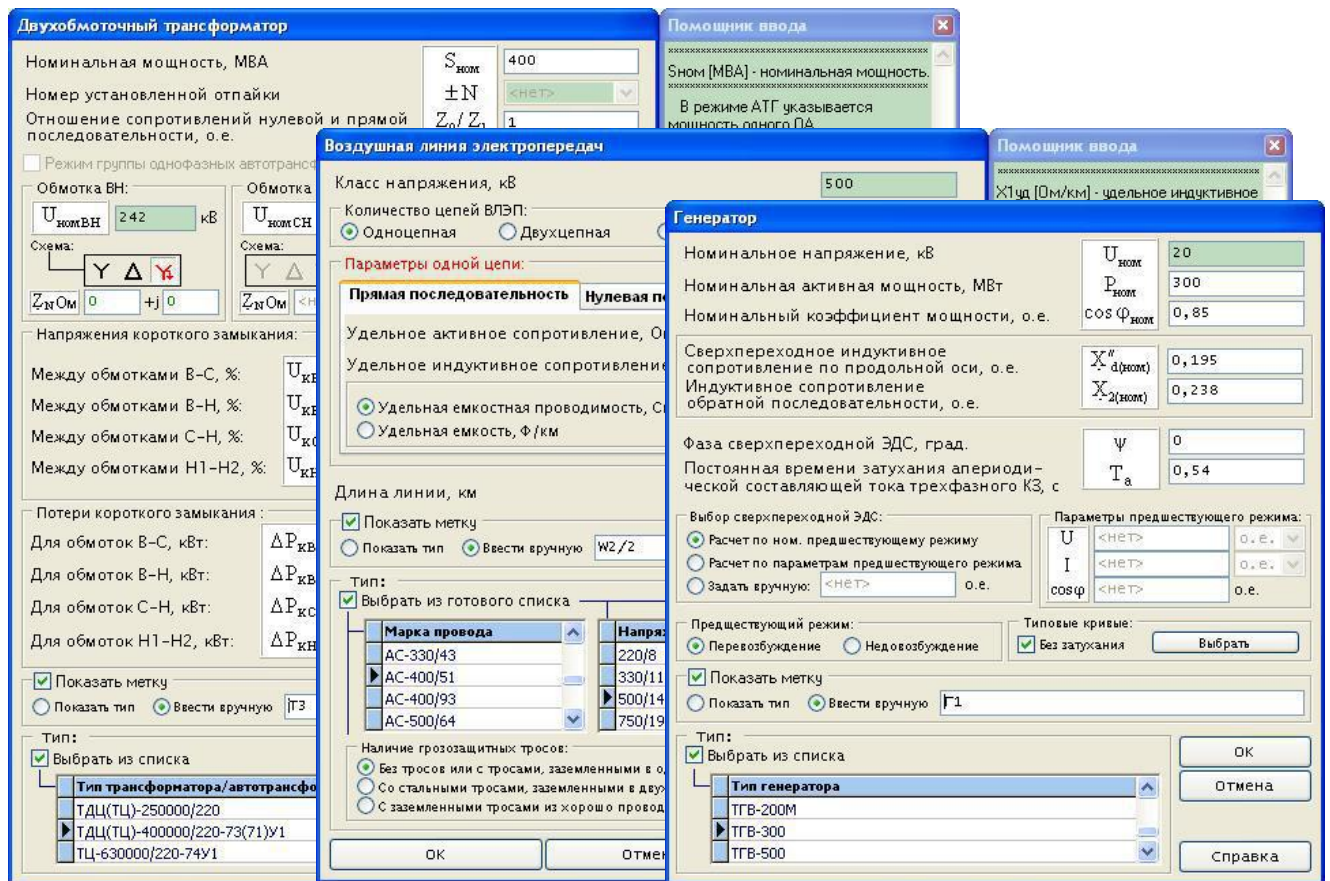






Рис. 3.3.2. Окна параметризации некоторых элементов расчётной схемы, а также окно помощника ввода параметров элементов в программе *ToKo*


Для проверки **правильности собранной схемы** предусмотрена соответствующая служба. Для ее запуска следует нажать кнопку  на операционной панели (5) главного окна. Результаты проверки отображаются в поле вывода сообщений (8) и дублируются индикатором (6). В случае **успешной проверки** индикатор загорается зелёным цветом, и **активируются кнопки** выполнения расчётов.

Программа позволяет рассчитывать периодический, апериодический и ударный токи КЗ в любом узле расчётной схемы, а также их распределение: периодического тока – по всем элементам схемы; апериодического и ударного – только по

У элемента – линия электропередачи – специальные контакты для включения ее в схему отсутствуют, однако к ее концам можно подключить любой другой элемент с такими контактами. Для последовательного включения двух линий следует использовать сборные шины.

элементам, примыкающим к точке КЗ. Для начала расчета необходимо первоначально **задать точку КЗ**. Достаточно привести указатель мыши на любой контакт активного элемента и в выпадающем меню

выбрать пункт «**Закоротить контакт**». После чего появится метка с изображением КЗ. **Убрать метку КЗ** можно двойным щелчком левой кнопки мыши. После задания точки КЗ следует запустить службу проверки расчётных схем и в случае успеха **начать расчёт**, нажав на одну из кнопок операционной панели (5):  – для трёхфазного КЗ;  – для двухфазного КЗ;  – для однофазного КЗ.

Для расчёта токов КЗ в **произвольный момент времени** необходимо вызвать окно настройки расчётов, нажав кнопку  на операционной панели (5) главного окна. В новом окне следует указать момент времени от возникновения КЗ, для которого будет выполнен расчёт, а также можно включить **вывод графиков** изменения периодического и апериодического токов в точке КЗ для указанного интервала времени. По завершении ввода следует нажать кнопку «ОК» и повторить приведенную выше последовательность действий.

Максимальное число элементов в расчётной схеме ограничено только возможностями Вашего компьютера. При этом из связующего контакта каждого из элементов схемы можно провести неограниченное число связей.

Отметим, что в программе для расчёта токов КЗ в произвольный момент времени применяются **типовые кривые** изменения периодической составляющей токов источников. Наборы типовых кривых размещаются в отдельных файлах программы и включены в состав инсталляционного дистрибутива. Поэтому для выполнения таких расчётов необходимо в ходе параметризации расчётной схемы для каждого источника, за исключением системы, **указать набор типовых кривых** или выбрать пункт «Без затухания» (включён по умолчанию) (см.

Каждому элементу схемы автоматически присваивается порядковый номер. Для поиска элемента по номеру или его текстовой метке вызовите специальную панель из главного меню: «Показать – Поиск элементов»

рис. 3.3.2). Список доступных наборов, а также управление ими и просмотр самих кривых, осуществляется в специальном окне программы, вызываемом из главного

меню (2) следующим образом «**Настройки – Типовые кривые...**».

По умолчанию апериодический и ударный токи КЗ не рассчитываются. Для включения этих токов в общий расчёт следует правой кнопкой мыши вызвать всплывающее меню рабочего поля (1) открытого документа и в пункте «**Режим расчета**» активировать опцию «**Рассчитывать апериодический и ударный токи КЗ**». Так как одним из допущений, принятых и в курсовой работе и в программе *ToKo Student*, является пренебрежение активными сопротивлениями элементов, то для расчёта распределения апериодического тока по ветвям расчётной схемы потребуется ввод эквивалентных постоянных времени затухания его составляющих в месте КЗ. Запрос на ввод значений и соответствующее окно ввода появятся автоматически в ходе расчёта. При заполнении полей этого окна следует руководствоваться табл. П6.1 и П6.2 (**Приложение 6**). По завершении ввода следует нажать кнопку «**Продолжить расчёт**».

Изображение расчётной схемы можно сохранить в файл графического формата, для этого из главного меню программы вызовите окно «Сохранить схему» и выберите нужный формат в поле «Тип файла».

Процесс выполнения расчётов в программе сопровождается индикатором хода операций (9), расположенным в низу главного окна. По завершении расчёта выводится окно с **результатом в точке КЗ**, эта же информация заносится и в поле текстовых сообщений (8). Для того чтобы проследить **распределение найденного тока КЗ** по элементам схемы, необходимо закрыть окно с результатом, навести на интересующий нас элемент указатель мыши и нажать её левую кнопку. При этом в **окне просмотра схемы** (11) появятся **токи в элементе**.

Просмотр **напряжений** осуществляется в этом же окне, для чего необходимо навести указатель мыши на один из контактов активного элемента. Если элемент примыкает к точке КЗ, то в **окне просмотра места КЗ (10)** будет показана информация об апериодическом и ударном токах. Узнать значения этих токов в точке короткого замыкания можно, нажав левой кнопкой мыши на метке КЗ.

Более подробную информацию о возможностях и особенностях программы *ToKo* можно почерпнуть из **справки и руководства пользователя**, устанавливаемых вместе с программой.

Результаты расчёта по программе *ToKo*

Воспользуемся программой *ToKo* с целью проверки ранее выполненных расчётов токов КЗ (см. пп. 3.1 и 3.2). Для этого на рабочем поле нового документа соберём заданную расчётную схему сети (см. рис. 3.1.1) и зададим параметры элементов согласно табл. 3.1.1, используя графический интерфейс программы. Затем последовательно выполним расчёты интересующих нас видов КЗ в заданных точках схемы. В качестве примера на рис. 3.3.3 приведено изображение набранной в программе расчётной схемы с меткой КЗ в точке К9.

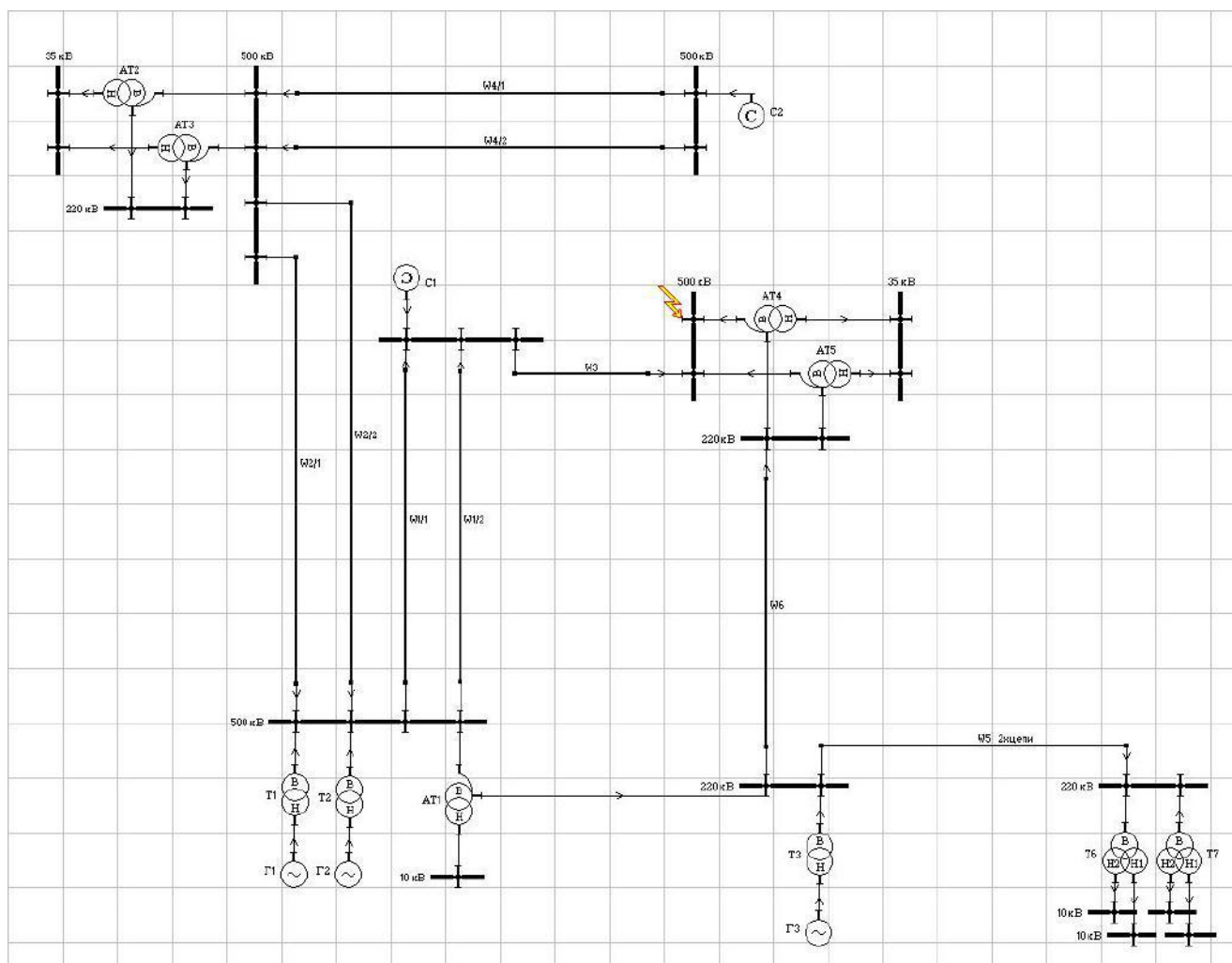


Рис. 3.3.3. Расчётная схема из документа программы *ToKo*

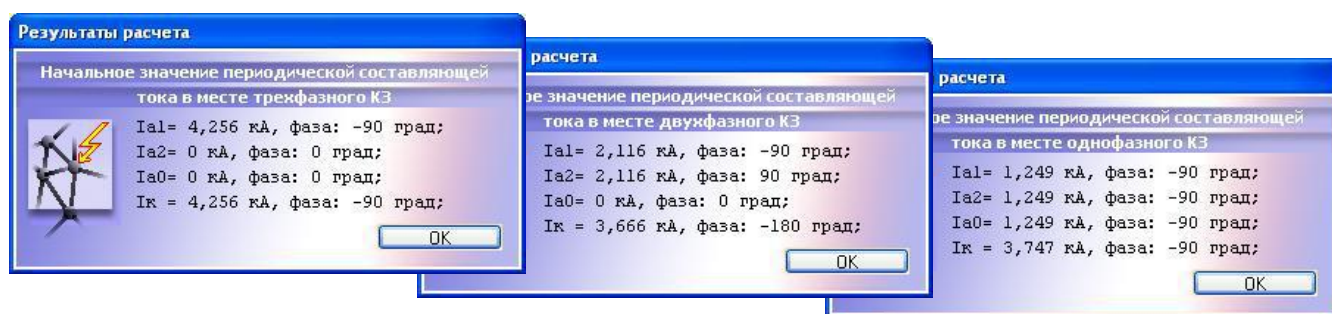


Рис. 3.3.4. Окна с результатами расчётов тока КЗ в точке К9 исходной схемы сети

В связи с тем, что список параметров некоторых элементов, запрашиваемых программой, выходит за рамки табл. 3.1.1, значения для этих параметров могут быть взяты либо из встроенной базы данных каталожных параметров электрооборудования, либо из справочной литературы. При этом рекомендуется следовать подсказкам, появляющимся в окне «Помощник ввода». В частности, для элемента «энергосистема» при вводе значения ударного коэффициента $K_{уд}$ следует использовать данные из табл. П6.2 (см. Приложение 6). Примеры окон с результатами расчетов токов различных КЗ в одной и той же точке схемы приведены на рис. 3.3.4.

Обобщенные результаты расчётов по программе *ToKo* действующих значений периодической составляющей токов КЗ, а также их сравнение с ранее полученными результатами представлены в табл. 3.3.1.

Таблица 3.3.1

Результаты расчётов и их сравнение

Точка КЗ	Вид КЗ и расчётный момент времени		$I_{п}$, кА		Расхождение Δ , %
			расчёт вручную	<i>ToKo</i>	
К7	$K^{(3)}$	$t=0$	54,546	54,552	0,01
		$t=0,3$ с	54,546	54,552	0,01
К9	$K^{(3)}$	$t=0$	4,256	4,256	0,00
		$t=0,3$ с	4,256 (4,208*)	4,256 (4,201*)	0,00 (-0,17)
К9	$K^{(1)}$	$t=0$	3,759	3,747	-0,32
		$t=0,3$ с	3,759	3,747	-0,32
К9	$K^{(2)}$	$t=0$	3,687	3,666	-0,57
		$t=0,3$ с	—	—	—

* При использовании обобщённого набора типовых кривых

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

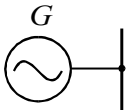
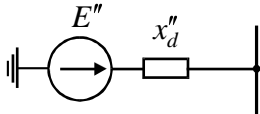
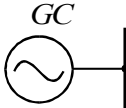
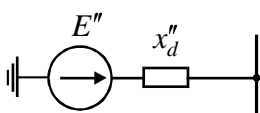
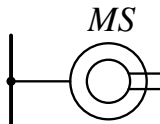
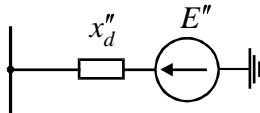
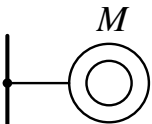
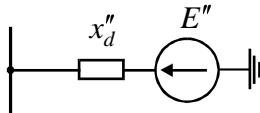
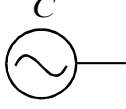
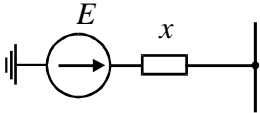
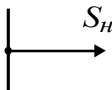
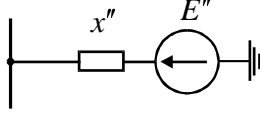
1. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 59735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007. – 36 с.
2. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 530 с.
3. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.
4. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учебное пособие / Ю.А. Куликов. – Новосибирск: НГТУ; М.: Мир: Изд-во АСТ, 2003. – 283 с.
5. 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.
6. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник / В.Н. Винославский, Г.Г. Пивняк, Л.И. Несен и др.; под ред. В.Н. Винославского. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 422 с.
7. Сенигов, П.Н. Переходные процессы в синхронных машинах: учебное пособие / П.Н. Сенигов. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1993. – 44 с.
8. Столбов, Ю.А. Электромагнитные переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие / Ю.А. Столбов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 251 с.
9. Беляева, Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания / Е.Н. Беляева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
10. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций: учебник / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1987. – 648 с.
11. Сенигов, П.Н. Расчет токов короткого замыкания в электрических системах: учебное пособие к курсовому проектированию / П.Н. Сенигов. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1987. – 56 с.
12. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 575 с.
13. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учебное пособие / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
14. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009611523. ТоКо: Расчет токов короткого замыкания в электрических системах / ООО «ТоКо»: К.Е. Горшков, Ю.В. Коровин, Е.И. Пахомов. – №2009610177; заявл. 22.01.2009.

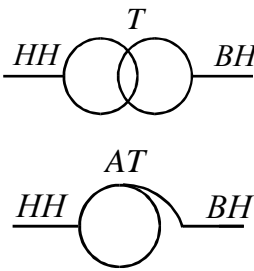
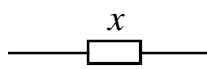
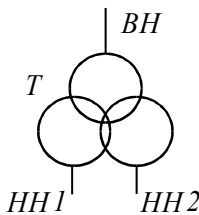
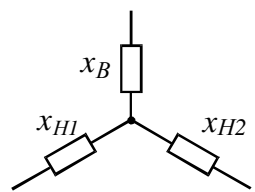
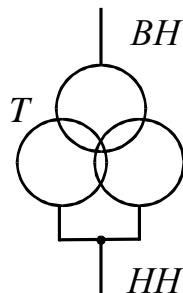
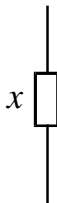
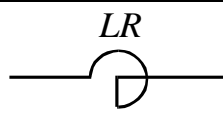
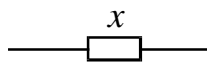
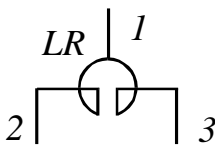
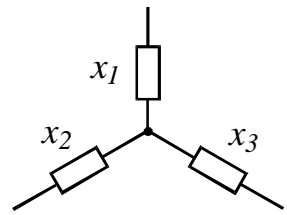
ПРИЛОЖЕНИЯ

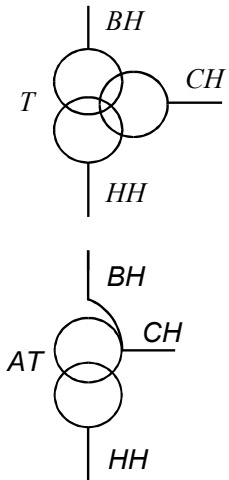
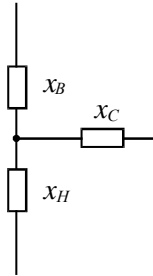
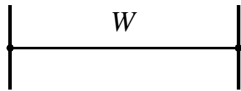
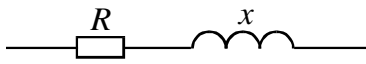
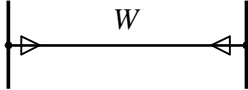
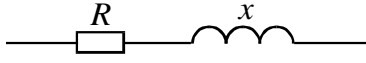
Приложение 1

Схемы замещения элементов электрических систем

Таблица П1.1

Наименование элемента и его основные параметры	Условное обозначение	Схема замещения
1	2	3
Генератор $S_{\text{ном}}$ (МВ·А) или $P_{\text{ном}}$ (МВт); $U_{\text{ном}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{ном}}$; $x''_{*d(\text{ном})}$; $x_{*2(\text{ном})}$; T_a (с);		
Синхронный компенсатор $S_{\text{ном}}$ (МВ·А) или $P_{\text{ном}}$ (МВт); $U_{\text{ном}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{ном}}$; $x''_{*d(\text{ном})}$; $x_{*2(\text{ном})}$; T_a (с)		
Синхронный двигатель $S_{\text{ном}}$ (МВ·А) или $P_{\text{ном}}$ (МВт); $U_{\text{ном}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{ном}}$; $x''_{*d(\text{ном})}$ или $K_{\text{П}} = I_{*\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$ и $M_{*\text{пуск}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$; $x_{*2(\text{ном})}$; T_a (с)		
Асинхронный двигатель $P_{\text{ном}}$ (МВт) (механическая на валу); $U_{\text{ном}}$ (кВ); $\cos\varphi_{\text{ном}}$; $\eta(\%)$; $K_{\text{П}} = I_{*\text{пуск}} = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$		
Эквивалентный источник (система) $U_{\text{ном}}$ или $U_{\text{ср}}$ (кВ); $S_{\text{к}}$ (МВ·А) или $I_{\text{отк.ном.}}$ (кА), или $x_{*}(\text{ном})$ и $S_{\text{ном}}$ (МВ·А).		
Обобщённая нагрузка $U_{\text{ном}}$ (кВ); $S_{\text{ном}}$ (МВ·А).		

1	2	3
Двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор) $S_{\text{ном}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВНном}}$ (кВ); $U_{\text{ННном}}$ (кВ); $u_{\text{к}}$ (%)		
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН $S_{\text{ном}}$ (МВ·А) $U_{\text{ВНном}}$ (кВ); $U_{\text{НН1ном}}$ (кВ); $U_{\text{НН2ном}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}$ (%).		
Двухобмоточный трансформатор с расщепленной на две части обмоткой НН, при параллельной работе обмоток низшего напряжения $S_{\text{ном}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВНном}}$ (кВ); $U_{\text{НН1ном}}$ (кВ); $U_{\text{НН2ном}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}$ (%).		
Реактор $U_{\text{ном}}$ (кВ); $I_{\text{ном}}$ (А); $x_{\text{ном}}$ (Ом).		
Сдвоенный реактор $U_{\text{ном}}$ (кВ); $I_{\text{ном}}$ (А); $x_{\text{ном}}$ (Ом); $k_{\text{св}}$.		

1	2	3
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор) $S_{\text{ном}}$ (МВ·А); $U_{\text{ВНном}}$ (кВ); $U_{\text{СНном}}$ (кВ); $U_{\text{ННном}}$ (кВ); $u_{\text{кВ-Н}}(\%)$; $u_{\text{кВ-С}}(\%)$; $u_{\text{кС-Н}}(\%)$.		
Воздушная линия электропередачи $U_{\text{ном}}$ (кВ); $x_{\text{пог}}$ (Ом/км); $r_{\text{пог}}$ (Ом/км)		
Кабельная линия электропередачи $U_{\text{ном}}$ (кВ); $x_{\text{пог}}$ (Ом/км); $r_{\text{пог}}$ (Ом/км);		

Расчетные выражения для определения сопротивлений элементов электрических систем

Таблица П2.1

Наименование элемента	Исходный параметр	Сопротивление элемента, Ом
1	2	3
Генератор (синхронный компенсатор)	$U_{\text{ном}}; S_{\text{ном}}$ (или $P_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi_{\text{ном}}$); $x''_{*d(\text{ном})}$	$x = x''_d = x''_{*d(\text{ном})} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$
Синхронный двигатель	$U_{\text{ном}}; S_{\text{ном}}$ (или $P_{\text{ном}}$ и $\cos\varphi_{\text{ном}}$); $x''_{*d(\text{ном})}$ (или $I_{*\text{пуск}} \equiv K_{\text{П}};$ $M_{*\text{пуск}}$)	$S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi_{\text{ном}}};$ $x = x''_d = x''_{*d(\text{ном})} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}};$ $x''_{*d(\text{ном})} = \frac{1}{I_{*\text{пуск}}} \cdot \sqrt{1 - (M_{*\text{пуск}} / I_{*\text{пуск}})^2}$
Асинхронный двигатель	$P_{\text{ном}};$ $\cos\varphi_{\text{ном}};$ $U_{\text{ном}};$ $K_{\text{П}};$ $\eta\%$	$x = x'' = x''_{*(\text{ном})} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}};$ $x''_{*(\text{ном})} = \frac{1}{K_{\text{П}}}; \quad S_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\cos\varphi_{\text{ном}} \cdot \frac{\eta\%}{100\%}}$
Обобщённая нагрузка	$U_{\text{ном}};$ $S_{\text{ном}}.$	$x = x'' = 0,35 \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$
Эквивалентный источник (система)	$U_{\text{ср}};$ $S_{\text{К}}^{(3)}$	$x = U_{\text{ср}}^2 / S_{\text{К}}^{(3)}$
	$I_{\text{откл.ном}}$ (номинальный ток отключения выключателя)	$x = U_{\text{ср}} / (\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}})$ (формула позволяет определить x очень приближённо)
	$U_{\text{ном}};$ $S_{\text{ном}};$ $x''_{*(\text{ном})}.$	$x = x''_{*(\text{ном})} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$

1	2	3
Двухобмоточный трансформатор	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}.$	$x = \frac{u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$U_{ВНном};$ $U_{СНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-С}; u_{кВ-Н};$ $u_{кС-Н}$	$x_{HB} = \frac{0,5(u_{кВ-С} + u_{кВ-Н} - u_{кС-Н})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{CH} = \frac{0,5(u_{кВ-С} + u_{кС-Н} - u_{кВ-Н})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{HH} = \frac{0,5(u_{кВ-Н} + u_{кС-Н} - u_{кВ-С})}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}.$	$x_{BH} = \frac{0,125 \cdot u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$ $x_{HH1} = x_{HH2} = \frac{1,75 \cdot u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части, при параллельной работе обмоток НН	$U_{ВНном};$ $U_{ННном};$ $S_{ном};$ $u_{кВ-Н}$	$x = \frac{u_{кВ-Н}}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$
Реактор	$x_{ном}$	$x = x_{ном}$
Сдвоенный реактор	$x_{ном};$ $k_{св}$	$x_1 = -k_{св} \cdot x_{ном}$ $x_2 = x_3 = (1 + k_{св}) \cdot x_{ном}$
Воздушная линия электропередачи	$x_{пог};$ $r_{пог};$ l	$x = x_{пог} \cdot l$ $r = r_{пог} \cdot l;$
Кабельная линия электропередачи	$x_{пог};$ $r_{пог};$ l	$x = x_{пог} \cdot l;$ $r = r_{пог} \cdot l$

Приведенные параметры элементов схемы замещения в системе относительных единиц при средних коэффициентах трансформации

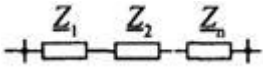
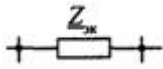
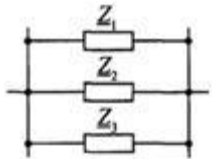
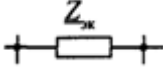
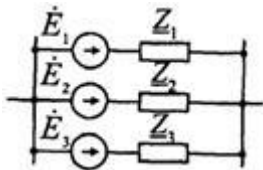
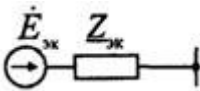
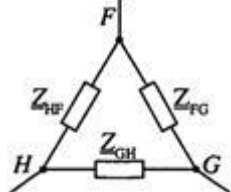
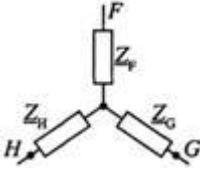
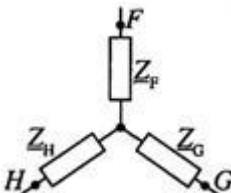
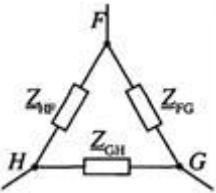
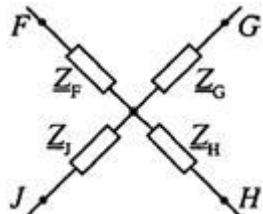
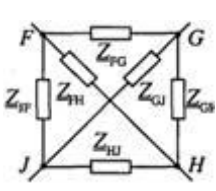
Таблица ПЗ.1

Наименование элемента		Относительные единицы
1		2
Генератор, синхронный компенсатор, синхронный двигатель		$x_*'' = x_{*d(\text{НОМ})}'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
Генератор, синхронный двигатель	в режиме пере-возбуждения	$E_*'' = \sqrt{(U_{*0(\text{НОМ})} + I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_0)^2}$ <p>При предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(\text{НОМ})} = 1 \quad I_{*0(\text{НОМ})} = 1 \quad \varphi_0 = \varphi_{\text{НОМ}}$</p>
	в режиме недо-возбуждения	$E_*'' = \sqrt{(U_{*0(\text{НОМ})} - I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_0)^2}$
Синхронный компенсатор	в режиме пере-возбуждения	$E_*'' = U_{*0(\text{НОМ})} + I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}''$ <p>При предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(\text{НОМ})} = 1 \quad I_{*0(\text{НОМ})} = 1$</p>
	в режиме недо-возбуждения	$E_*'' = U_{*0(\text{НОМ})} - I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*d(\text{НОМ})}''$
Асинхронный двигатель		$x_*'' = x_{*(\text{НОМ})}'' \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
		$E_*'' = \sqrt{(U_{*0(\text{НОМ})} - I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \sin \varphi_0)^2 + (I_{*0(\text{НОМ})} \cdot x_{*(\text{НОМ})}'' \cdot \cos \varphi_0)^2}$ <p>При предшествующем номинальном режиме: $U_{*0(\text{НОМ})} = 1 \quad I_{*0(\text{НОМ})} = 1 \quad \varphi_0 = \varphi_{\text{НОМ}}$</p>
Эквивалентная система		$x_* = \frac{S_6}{S_K^{(3)}}$
		$x_* = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{НОМ.отк}} \cdot U_{\text{ср}}}$
		$x_* = x_{*(\text{НОМ})} \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}}$
		$E_* = \frac{U_0}{U_{\text{НОМ}}} = U_{*0(\text{НОМ})}$ обычно принимают $E_* = 1$

1	2
Обобщённая нагрузка	$x_*'' = 0,35 \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$E_*'' = 0,85$
Двухобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$x_* = \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части	$x_{*B} = \frac{0,125 \cdot u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*H1} = x_{*H2} = \frac{1,75 \cdot u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Трехобмоточный трансформатор (автотрансформатор)	$x_{*BH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кВ-Н}} - u_{\text{кС-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*CH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-С}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-Н}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{*HH} = \frac{0,5(u_{\text{кВ-Н}} + u_{\text{кС-Н}} - u_{\text{кВ-С}})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Двухобмоточный трансформатор с обмоткой НН, расщепленной на две части, при параллельной работе обмоток НН	$x_* = \frac{u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{S_{\text{НОМ}}}$
Реактор	$x_* = x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Сдвоенный реактор	$x_{*1} = -k_{\text{св}} \cdot x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
	$x_{*2} = x_{*3} = (1 + k_{\text{св}}) \cdot x_{\text{НОМ}} \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Воздушная линия	$x_* = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2} \quad r_* = r_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$
Кабельная линия	$x_* = x_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2} \quad r_* = r_{\text{пог}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\text{ср}}^2}$

Выражения для преобразования схем замещения

Таблица П4.1

Вид преобразования	Исходная схема	Преобразованная схема	Сопротивления элементов преобразованной схемы
Последовательное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$
Параллельное соединение			$\underline{Z}_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}}$ <p>где $\underline{Y}_{эк} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$</p> $\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2}; \underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3};$ <p>При двух ветвях</p> $\underline{Z}_{эк} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Замена нескольких источников эквивалентным			$E_{эк} = \frac{1}{\underline{Y}_{эк}} \sum_{K=1}^n \underline{Y}_K E_K$ <p>При двух ветвях</p> $\dot{E}_{эк} = \frac{\dot{E}_1 \underline{Z}_2 + \dot{E}_2 \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$
Преобразование треугольника в звезду			$\underline{Z}_F = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_G = \frac{\underline{Z}_{FG} \cdot \underline{Z}_{GH}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$ $\underline{Z}_H = \frac{\underline{Z}_{GH} \cdot \underline{Z}_{HF}}{\underline{Z}_{FG} + \underline{Z}_{GH} + \underline{Z}_{HF}}$
Преобразование трехлучевой звезды в треугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F + \underline{Z}_G + \frac{\underline{Z}_F \underline{Z}_G}{\underline{Z}_H}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_H + \frac{\underline{Z}_G \underline{Z}_H}{\underline{Z}_F}$ $\underline{Z}_{HF} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_F + \frac{\underline{Z}_H \underline{Z}_F}{\underline{Z}_G}$
Преобразование многолучевой звезды в полный многоугольник			$\underline{Z}_{FG} = \underline{Z}_F \underline{Z}_G \sum \underline{Y}$ $\underline{Z}_{GH} = \underline{Z}_G \underline{Z}_H \sum \underline{Y}$ <p>где $\sum \underline{Y} = \underline{Y}_F + \underline{Y}_G + \underline{Y}_H + \underline{Y}_J$</p> <p>Аналогично и при большем числе ветвей</p>

Типовые кривые

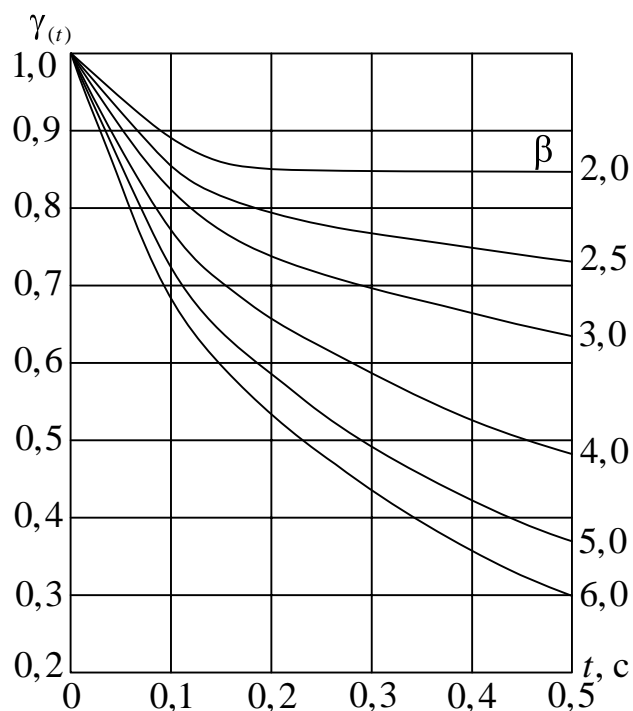


Рис. П5.1. Типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной системой самовозбуждения: ТВФ-100, ТВФ-110, ТВФ-120, ТВВ-160, ТВВ-167, ТВВ-200, ТВВ-220, ТГВ-220, ТЗВ-220, ТЗВ-320

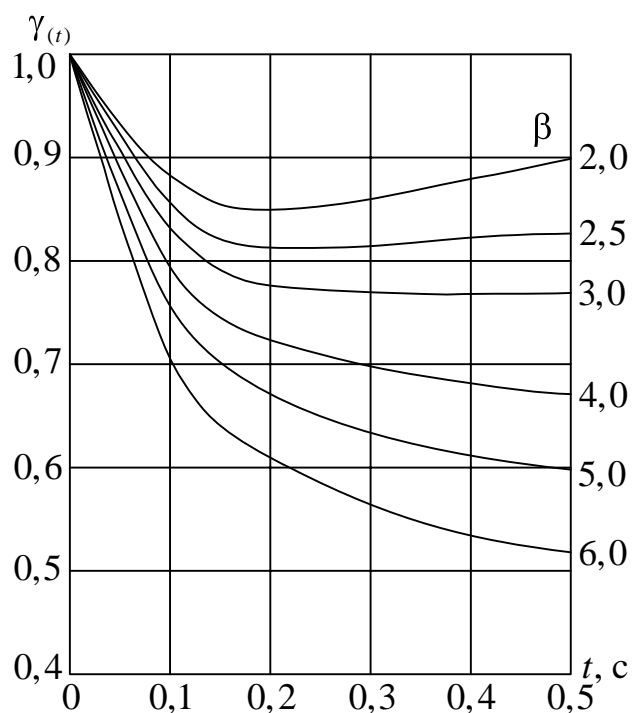


Рис. П5.2. Типовые кривые для турбогенераторов с тиристорной независимой системой возбуждения: ТВВ-300, ТВВ-500, ТВВ-800, ТГВ-300, ТГВ-800

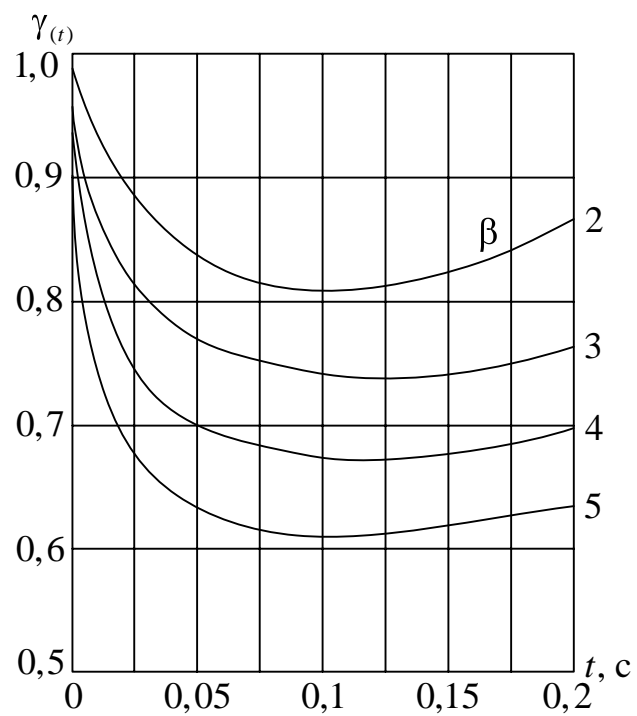


Рис. П5.3. Типовые кривые для синхронного электродвигателя

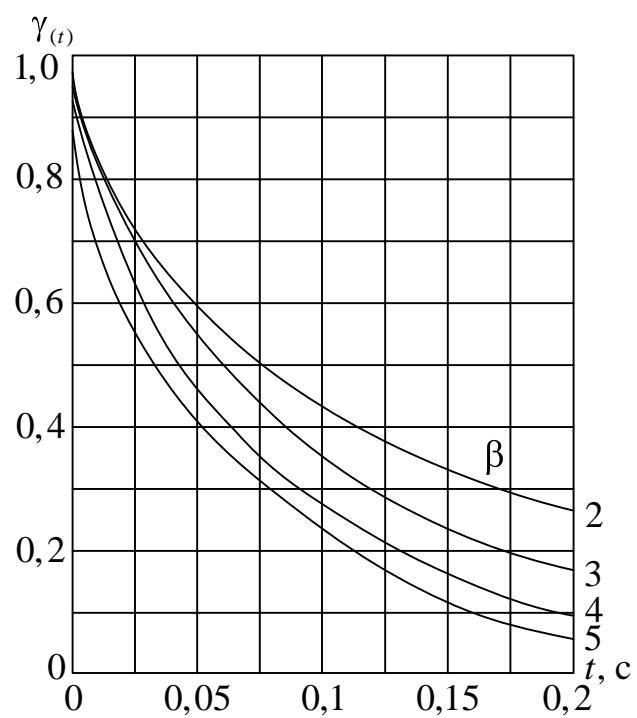


Рис. П5.4. Типовые кривые для асинхронного электродвигателя

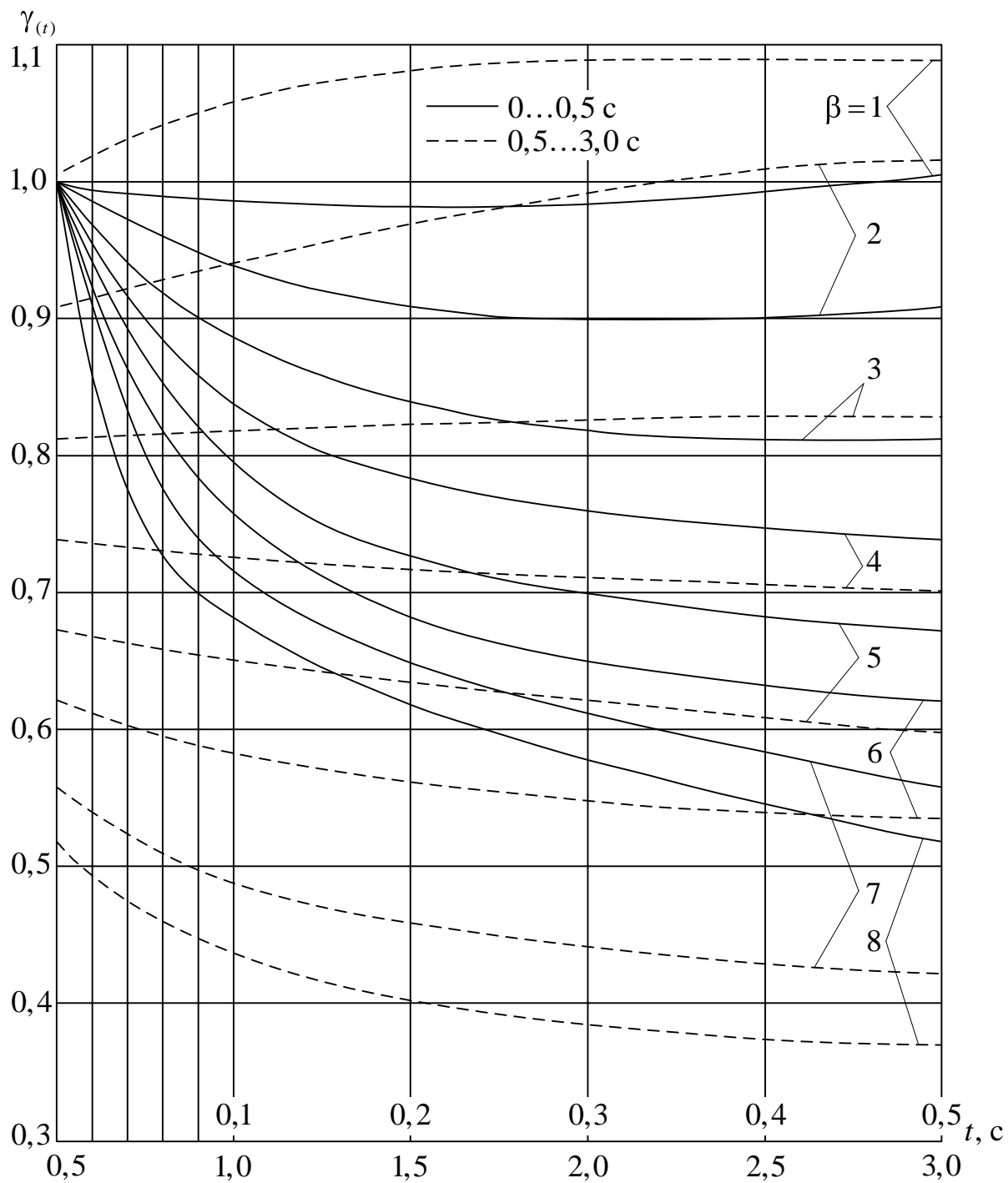


Рис. П5.5. Обобщенный набор типовых кривых

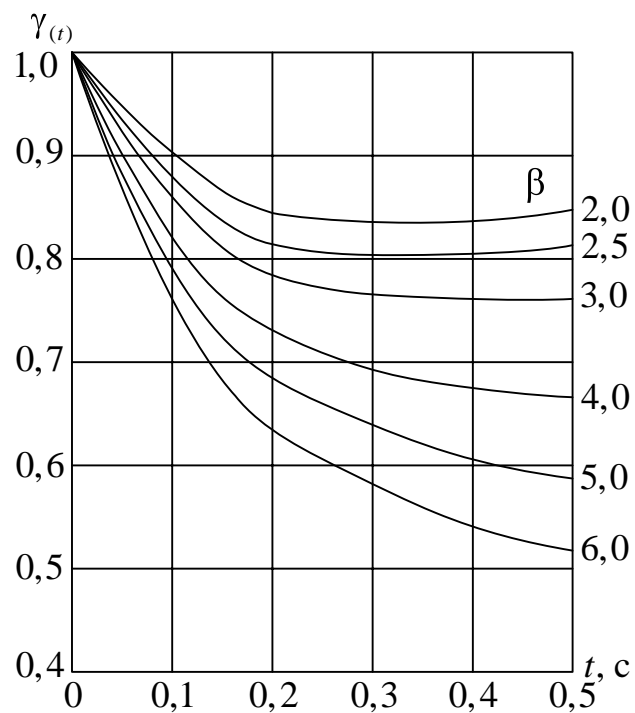


Рис. П5.6. Типовые кривые для турбогенераторов с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения: ТВФ-63, ТВФ-110

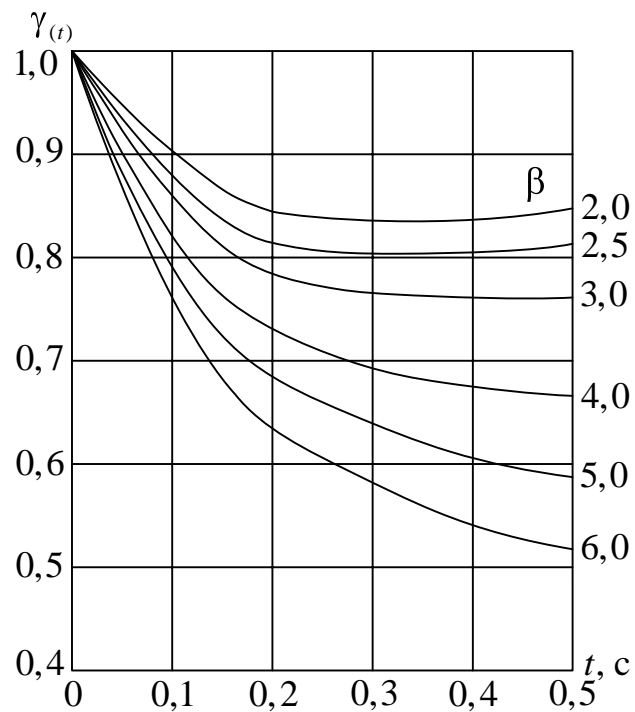


Рис. П5.7. Типовые кривые для турбогенераторов с диодной бесщеточной системой возбуждения: ТВВ-1000 и ТВВ-1200

**Параметры характерных ветвей электрических систем
(средние значения отношения x/r , постоянной времени T_a и ударного
коэффициента K_y для характерных ветвей, примыкающих к точке
короткого замыкания [1, 10])**

Таблица П6.1

Наименование ветви или место КЗ	x/r	K_y	T_a , с
Ветвь генератор – трансформатор	30–50	1,9–1,95	0,1–0,2
Ветвь асинхронного двигателя	6,3	1,6	0,02
КЗ за линейным реактором на электростанции	30	1,9	0,1
КЗ за линейным реактором на подстанции	18–20	1,85	0,06
КЗ за кабельной линией 6–10 кВ	3	1,4	0,01
КЗ за трансформатором мощностью до 1000 кВ·А	6,3	1,6	0,02
КЗ на присоединении распределительного устройства повышенного напряжения подстанции	15	1,8	0,05
КЗ на присоединении вторичного напряжения подстанции	20	1,85	0,06
КЗ на шинах собственных нужд электростанции за трансформаторами 16–80 МВ·А	20–30	1,85–1,9	0,06–0,1

Таблица П6.2

Характерные ветви электрической системы, примыкающие к точке КЗ	$T_a, \text{с}$	K_y
Турбогенераторы мощностью: 12 – 60 МВт 100 – 1000 МВт	0,16 – 0,25 0,40 – 0,54	1,940 – 1,995 1,975 – 1,980
Блок турбогенератор (60 МВт) – трансформа- тор при номинальном напряжении генератора: 6,3 кВ 10,5 кВ	0,20 0,15	1,950 1,935
Блок турбогенератор – повышающий транс- форматор при мощности генератора: 100 – 200 МВт 300 МВт 500 МВт 800 МВт	0,26 0,32 0,35 0,30	1,965 1,977 1,983 1,967
Система, связанная с шинами, где рассматри- вается КЗ, воздушными ЛЭП напряжение: 35 кВ 110 – 150 кВ 220 – 330 кВ 500 – 750 кВ	0,02 0,02 – 0,03 0,03 – 0,04 0,06 – 0,08	1,608 1,608 – 1,717 1,717 – 1,780 1,850 – 1,895
Система, связанная со сборными шинами 6 – 10 кВ через трансформаторы единичной мощностью: 80 МВ·А и выше 32 – 80 МВ·А 5,6 – 32 МВ·А 1000 кВ·А и ниже	0,06 – 0,15 0,05 – 0,10 0,02 – 0,05 0,02	1,85 – 1,935 1,82 – 1,904 1,60 – 1,820 1,60
Ветви, защищенные реактором с номинальным током, А: 1000 А и выше 630 А и ниже	0,23 0,10	1,956 1,904
Распределительные сети напряжением 6 – 10 кВ	0,01	1,369

Параметры элементов комплексной нагрузки

Таблица П7.1

Потребители комплексной нагрузки	Сверхпереходная ЭДС, отн. ед.	Сопротивление, отн. ед.	
		прямой последовательности	обратной последовательности
Синхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	1,074	$0,008+j0,15$	$0,008+j0,15$
Синхронные двигатели напряжением до 1 кВ	1,079	$0,03+j0,16$	$0,03+j0,16$
Асинхронные двигатели напряжением свыше 1 кВ	0,93	$0,01+j0,17$	$0,01+j0,17$
Асинхронные двигатели напряжением до 1 кВ	0,9	$0,07+j0,18$	$0,07+j0,18$
Газоразрядные источники света	0	$0,85+j0,53$	$0,382+j0,24$
Преобразователи	0	$0,9+j0,45$	$1,66+j0,81$
Электротермические установки	0	$1,0+j0,49$	$0,4+j0,2$

Здесь приведены усреднённые параметры элементов, взятые из работ [1, 5]. Более точные сведения по параметрам конкретных типов синхронных и асинхронных двигателей можно найти в справочной литературе, например в [12].

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. РАСЧЁТ ТОКА ПРИ ТРЁХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ	
1.1. Общее представление о характере тока короткого замыкания.....	4
1.2. Основные допущения и порядок расчета.....	9
1.3. Приведение сопротивлений к основной ступени напряжения	10
1.4. Система относительных единиц	13
1.5. Выражения для определения ЭДС и сопротивлений элементов расчетной схемы и приведения их к базисным условиям	15
1.6. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в начальный момент времени	19
1.7. Расчет аperiodической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени и ударного тока	20
1.8. Расчет действующего значения периодической составляющей тока короткого замыкания в произвольный момент времени	23
1.9. Учет влияния электродвигателей при расчете тока трехфазного короткого замыкания	24
1.10. Особенности расчета токов короткого замыкания в системах собственных нужд электростанций.....	32
Глава 2. РАСЧЁТ ТОКА ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ	35
2.1. Метод симметричных составляющих.....	35
2.2. Виды несимметричных коротких замыканий и их анализ	40
2.3. Правило эквивалентности прямой последовательности	49
2.4. Параметры элементов электрических систем для схем замещения разных последовательностей.....	50
2.5. Схемы замещения отдельных последовательностей	62
2.6. Порядок расчёта токов несимметричных коротких замыканий	64
2.7. Расчёт токов несимметричных коротких замыканий в произвольной ветви	66
Глава 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ	
3.1. Расчет тока при трёхфазном коротком замыкании	71
3.2. Расчет токов при однофазном и двухфазном коротких замыканиях	83
3.3. Программа <i>ТоКо</i> и её применение для расчета токов коротких замыканий	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	98
ПРИЛОЖЕНИЯ	
Приложение 1. Схемы замещения элементов электрических систем	99
Приложение 2. Расчётные выражения для определения сопротивлений элементов электрических систем	102
Приложение 3. Приведенные параметры элементов схемы замещения в системе относительных единиц при средних коэффициентах трансформации	104
Приложение 4. Выражения для преобразования схем замещения	106
Приложение 5. Типовые кривые	107
Приложение 6. Параметры характерных ветвей электрических систем.....	111
Приложение 7. Параметры элементов комплексной нагрузки	113